

***Teilbericht zum Forschungsprojekt:***

*Kanalsanierung: Entwicklung innovativer Konzeptionen und Verfahren zur Sanierung von öffentlichen und privaten Kanälen mit dem Schwerpunkt Grundstücksentwässerung*

***Einzelauftrag 5***

*Entwicklungsunterstützende Untersuchung zur „Infiltrationsdichtheit“ bei Werkstoffwechsel bzw. Übergängen insbesondere im Zusammenhang mit der Fremdwassersanierung*

***Arbeitspaket 4***

*Abnahmekriterien Infiltrationsdichtheit*

Bericht an: **IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH**  
45886 Gelsenkirchen  
Exterbruch 1

erstellt durch: **Universität der Bundeswehr München**  
Institut für Wasserwesen, Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik  
Dipl.-Ing. Sascha Rödel  
Werner-Heisenberg-Weg 39  
85577 Neubiberg

---

*Entwurf eingereicht am:* 27. Oktober 2010

*Finaler Endbericht eingereicht am:* 02.03.2011

## Kontakt

### **IKT**

IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH  
Exterbruch 1

45886 Gelsenkirchen

Telefon: 0209-17806-0

Telefax: 0209-17806-88

E-Mail: [info@ikt.de](mailto:info@ikt.de)

Web: <http://www.ikt.de>

### **Dipl.-Ing. Daniela Färber**

Telefon: 0209 17806-26

Fax: 0209 17806-88

E-Mail: [faerber@ikt.de](mailto:faerber@ikt.de)

### **Universität der Bundeswehr**

Institut für Wasserwesen, Siedlungswasserwirtschaft und  
Abfalltechnik

Werner-Heisenberg-Weg 39

85577 Neubiberg

Telefon: 089-6004-3484-2156

Fax: 089-6004-3858

E-Mail: [wolfgang.guenther@unibw.de](mailto:wolfgang.guenther@unibw.de)

Web: <http://www.unibw.de/ifw/Institut>

### **Dipl.-Ing. Sascha Rödel**

Telefon: 089-6004-3499

Fax: 089-6004-3858

E-Mail: [sascha.roedel@unibw.de](mailto:sascha.roedel@unibw.de)

Neubiberg, 02. März 2011

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>VI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>1</b>
<b>1 Einleitung und Zielsetzung .....</b>	<b>5</b>
1.1 Einführung .....	5
1.2 Zielsetzung.....	5
<b>2 Themenschwerpunkt Fremdwasser .....</b>	<b>7</b>
2.1 Begriff Fremdwasser.....	8
2.2 Fremdwasserquellen.....	10
2.3 Bestimmung von Fremdwasser.....	13
2.4 Siedlungswasserwirtschaftliche Relevanz von Fremdwasser.....	15
<b>3 Themenschwerpunkt Kriterien zur Materialauswahl und Regelwerke Dichtheitsprüfung .....</b>	<b>17</b>
3.1 Dichtheitsprüfung.....	20
3.2 Kriterien zur Materialauswahl.....	23
<b>4 Themenschwerpunkt Exfiltration .....</b>	<b>30</b>
4.1 Allgemeines .....	31
4.2 Untersuchungen zur Exfiltration.....	36
4.2.1 Untersuchungen in Aachen.....	38
4.2.2 Untersuchungen in Innsbruck .....	42
4.2.3 Untersuchungen in Rastatt .....	45
4.2.4 Untersuchungen an der Universität der Bundeswehr München .....	46
<b>5 Themenschwerpunkt Infiltration.....</b>	<b>49</b>
5.1 Allgemeines .....	51
5.2 Untersuchungen zur Infiltration.....	53
5.2.1 Untersuchungen in Aachen (Dohmann, Decker,1998).....	54
5.2.2 Untersuchungen in Aachen (Hennerkes, 2006) .....	54

5.2.3	Untersuchungen in Dresden (APUSS-Studie) .....	59
5.2.4	Untersuchungen in Karlsruhe (Klinger, 2007) .....	63
<b>Literaturverzeichnis .....</b>		<b>66</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Herkunft von Fremdwasser am Beispiel eines Trennsystems .....	11
Abbildung 2:	Faktoren zur Materialauswahl .....	25
Abbildung 3:	Anforderungen an die Werkstoffeigenschaften von Abwasserleitungen .....	27
Abbildung 4:	Übersicht über die verschiedenen Einbauverfahren im Kanalbau .....	28
Abbildung 5:	speziellen Anforderungen an einen Rohrwerkstoff unter Einsatz von Fräs- und Pflugverfahren .....	28
Abbildung 6:	Abwasserableitungssystem mit verschiedenen Exfiltrationsquellen .....	32
Abbildung 7:	Prinzip der Exfiltration .....	35
Abbildung 8:	Verlauf einer Exfiltrationsmessung mit Reinwasser an einem gebetteten Rohr .....	39
Abbildung 9:	Verlauf einer Exfiltrationsmessung mit Abwasser an einem eingebetteten Rohr .....	40
Abbildung 10:	24-h Werte der Abwasserexfiltration.....	40
Abbildung 11:	Exfiltrationsrate einer undichten Rohrverbindung im nicht bindigen Boden..	41
Abbildung 12:	Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Exfiltration bei unterschiedlichen Böden .....	43
Abbildung 13:	Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Exfiltration bei unterschiedlichen Feststoffgehalten .....	43
Abbildung 14:	Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Exfiltration bei unterschiedlichen Fließtiefen nach (Stegner 1995) .....	44
Abbildung 15:	Aufzeichnung der Exfiltrationsmessungen in Rastatt.....	45
Abbildung 16:	ermittelte Exfiltrationsraten über die gesamte Versuchslaufzeit .....	46
Abbildung 17:	Vermischung von exfiltriertem Abwasser mit versickernden Regenwasser..	47
Abbildung 18:	Übersicht der Ansätze zur Nachbildung der Grundwasserinfiltration.....	53
Abbildung 19:	Versuchsstand im Längsschnitt .....	55
Abbildung 20:	Grundwasserinfiltration $q_F$ in Abhängigkeit der Schadensfläche und der hydrostatischen Druckhöhe für den schwach-bindigen Boden I.....	58
Abbildung 21:	Grundwasserinfiltration $q_F$ in Abhängigkeit der Schadensfläche und der hydrostatischen Druckhöhe für den rolligen Boden II .....	58
Abbildung 22:	Programmoberfläche AquaBase.....	63
Abbildung 23:	Schamtische Darstellung eines Kanalrohres unterhalb des Grundwasserspiegels .....	64

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht Literaturquellen zum Themenschwerpunkt Fremdwasser.....	7
Tabelle 2:	Übersicht über die Begriffsdefinition Abwasser .....	9
Tabelle 3	Übersicht über die Begriffsdefinition Fremdwasser .....	9
Tabelle 4:	Regelungen der Bundesländer zum Abwasserabgabengesetz.....	10
Tabelle 5:	Quellen von Fremdwasser in Misch- und Trennsystemen .....	12
Tabelle 6:	verschiedenen Ursachen für unerwünschten Fremdwasseranfall.....	13
Tabelle 7:	Übersicht über Fremdwasserbestimmungsmethoden .....	14
Tabelle 8:	Messtechniken für Fremdwasserbestimmung im Kanalnetz .....	15
Tabelle 9:	allgemeine Übersicht über die Auswirkungen von Fremdwasser.....	16
Tabelle 10:	Literaturquellen zum Themenschwerpunkt Regelwerke zur Dichtheitsprüfung.	17
Tabelle 11:	Literaturquellen zum Themenschwerpunkt Kriterien zur Materialauswahl .....	19
Tabelle 12:	Übersicht relevanter Prüfrichtlinien für Dichtheitsprüfung .....	22
Tabelle 13:	Zusammenfassung der charakteristischen Unterpunkte der Faktoren zur Materialauswahl.....	25
Tabelle 14:	Übersicht Literaturquellen zum Themenschwerpunkt Exfiltration.....	30
Tabelle 15:	Klassifizierung der Schadensarten nach Umweltgefährdung .....	33
Tabelle 16:	Untersuchungsergebnisse zur Bestimmung des Leakage Faktors .....	36
Tabelle 17:	Bodenarten und deren korrespondierende Leakage Faktoren.....	37
Tabelle 18:	Übersicht von ermittelten Exfiltrationsraten einzelner Untersuchungen .....	37
Tabelle 19:	Zusammenstellung der Versuchsparameter nach (Dohmann 1994).....	38
Tabelle 20:	Berechnung des Leakage Faktor L .....	41
Tabelle 21:	Zusammenstellung der verwendeten Bettungsmaterialien.....	42
Tabelle 22:	Übersicht Literaturquellen zum Themenschwerpunkt Infiltration.....	49
Tabelle 23:	mittlere Infiltrationsraten undichter Rohrverbindungen einer Haltung Ei 500/750 B .....	54
Tabelle 24:	Versuchsprogramm zur Bestimmung der Grundwasserinfiltration .....	56
Tabelle 25:	Zusammenstellung der in den Versuchen ermittelten Vorfaktoren.....	57
Tabelle 26:	erforderlichen Informationen und Daten für die Kalibrierung des Modellwerkzeuges.....	61

## Abkürzungsverzeichnis

AbwAG	Abwasserabgabengesetz
AbwV	Abwasserverordnung
APS	Arbeitskreis Prüfinstitute Schlauchliner
APUSS	Assessing infiltration and exfiltration on the performance of urban sewer systems
ATV	Abwassertechnische Vereinigung
BMFT	Bundesministerium für Forschung und Technologie
BSK	Biogene Säurekorrosion
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V. bzw. Deutsche Industrienorm
DN	Nennweite
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
DVWK	Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau
DWA	Deutscher Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
EN	Europäische Norm
EPA	Environmental Protection Agency
FBS	Fachvereinigung Betonrohre und Stahlbetonrohre e.V.
FEFLOW	Finite Element Subsurface FLOW System
FH	Fachhochschule
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GGG	Duktiler Grauguss
GWA	Gewässerschutz – Wasser - Abwasser
IKT	Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH
IRSA	Instituto di Ricerca sulle Acque
$k_f$	Durchlässigkeitsbeiwert

L	Leakage Faktor
Ifw	Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
LWG	Landeswassergesetz
MID	Magnetisch Induktiver Durchflussmesser
NEIMO	Network Exfiltration and Infiltration Model
NRW	Nordrhein-Westfalen
PE	Polyethylen
PVC	Polyvinylchlorid
RSV	Rohrleitungssanierungsverband e.V.
RWTH-Aachen	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
SE	Bodenklassifizierung mit S = Sand, E = enggestufte Korngrößenverteilung
StMUG	Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit
StZ	Steinzeug
SU	Bodenklassifizierung mit S = Sand, U = Schluff
SWA	Siedlungswasserwirtschaft
TU	Technische Universität
U	Ungleichförmigkeit
UniBW	Universität der Bundeswehr
WHG	Wasserhaushaltsgesetz



## Zusammenfassung

Aufgrund von erhöhten Anforderungen an den Gewässerschutz und den zusätzlichen ökonomische Herausforderungen bei den Kommunen rückt das Thema Fremdwasser in Hinblick auf effiziente und günstige Sanierungskonzepte immer mehr in den Fokus. In Bezug auf diese Arbeit sind neben der Darstellung der siedlungswasserwirtschaftlichen Relevanz von Fremdwassereinträgen und deren Auswirkungen auf abwassertechnischen Anlagen und Bauteile, auch die Erfassung aller möglichen wichtigen Einflussfaktoren und Parameter (Grundwasserneubildungsrate, Grundwasserstand, Bodenart,  $k_f$ -Wert, Einbauart, Schadensart, hydraulische Einflüsse etc.) auf die Infiltration und dessen Häufigkeit und Intensität sowie die literaturbezogene Nachweisführung möglicher Korrelationen bzw. Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Einflussgrößen von Bedeutung. Im Rahmen dieser Arbeit wurden vier essentielle Themenschwerpunkte herausgearbeitet:

- Themenschwerpunkt 1  
**„Fremdwasser“**
- Themenschwerpunkt 2  
**„Kriterien zur Materialauswahl und Regelwerke Dichtheitsprüfung“**
- Themenschwerpunkt 3  
**„Exfiltration“**
- Themenschwerpunkt 4  
**„Infiltration“**

### **„Fremdwasser“**

Die Herausforderung Fremdwasser ist in Deutschland kein regionales Problem, jedoch ist der entsprechende Handlungsbedarf bei unerwünschten Fremdwasseraufkommen unterschiedlich. Fremdwasser ist kein Rechtsbegriff im Bundes- oder Landesrecht. In technischen Regelwerken hingegen wird Fremdwasser unterschiedlich definiert. In den meisten gesichteten Literaturquellen wird Fremdwasser als unerwünscht eindringendes Grund- Oberflächen- oder Niederschlagswasser über Haus- und Grundstücksdrainagen, unddichte Kanalabschnitte, an die Kanalisation angeschlossene Bachläufe oder sonstige Einträge, definiert. Jedoch gibt es keine einheitliche wasserrechtliche Regelung bezüglich des zulässigen Fremdwasseranfalls auf Bundes- oder Länderebene. Die Ursachen von einem zu hohen und unerwünschten Fremdwasseranfall in das Abwassersystem sind bekannt und sehr vielfältig. Neben Grundwasserinfiltration, Schichtenwasserinfiltration stellen Fehlanschlüsse bei der Oberflächen- und Dränageentwässerung stellen die Hauptquellen dar. In der Praxis kommen die verschiedensten Ver-

fahren zum Messung von Fremdwasser zum Einsatz. So lässt sich auch in der überprüften Literatur feststellen, dass im Laufe der Zeit diverse Technologien und Verfahren entwickelt worden sind und sich bewährt haben. Der siedlungswasserwirtschaftlichen Relevanz von Fremdwasser kommt eine hohe Bedeutung zu, da die Auswirkungen sehr vielfältig und unterschiedlich sind. Neben technischen Konsequenzen (zum Beispiel hydraulische Belastungen) sind auch ökonomische Aspekte zu nennen (höherer Energieaufwand, zusätzliche Betriebskosten).

### **„Kriterien zur Materialauswahl und Regelwerke Dichtheitsprüfung“**

Grundsätzlich sind Abwasserkanäle und -leitungen sowie Schächte entweder mit Luft oder mit Wasser auf Dichtheit zu prüfen. Die Dichtheitsprüfung von Freispiegelleitungen ist gemäß DIN EN 1610 bzw. DWA-A 139 durchzuführen. Abweichend hiervon gilt für die Prüfung von Abwasserkanälen und -leitungen in Wassergewinnungsgebieten das DWA-A 142. In der Praxis erfolgt die Dichtheitsprüfung von Abwasserleitungen in dem meisten Fällen nach DWA- A 139. Bei dieser Innendruckprüfung mit Wasser wird ein konstanter Überdruck von 50 kPa erzeugt. Die Wahl eines Prüfverfahrens hängt üblicherweise von den vorhandenen Randbedingungen ab. Ein wichtiger Kritikpunkt bei der Dichtheitsprüfung nach DWA-A 139 ist der, dass ein wesentlicher Einflussparameter vernachlässigt bzw. nicht berücksichtigt wird. Der anliegende Grundwasserstand bzw. Grundwasserspiegel kann die Innendruckprüfung maßgeblich beeinflussen. Liegt dieser weit über den Rohrscheitel so ist der tatsächliche Exfiltrationsausfluss im Vergleich zu einem niedriger anliegenden Grundwasserstand geringer. Es sollte grundlegend überprüft werden, ob bei einem Prüfverfahren die Wasserbewegung aus dem Rohr in den Boden, der Wasserbewegung aus dem Boden ins Rohrinne gleichzusetzen ist.

Das grundlegende Ziel in Hinblick auf den Kanalbau sollte der Einsatz von Materialien sein, die den einwirkenden Beanspruchungen während des Nutzungszeitraums schadlos standhalten. Abwasserleitungen müssen so hergestellt werden, dass diese in dem geforderten Betrachtungszeitraum das Abwasser sicher ableiten und einen geringen Betriebs- und Instandhaltungsaufwand bedürfen. Darüber hinaus ist eine Optimierung von betrieblichen und verfahrenstechnischen Maßnahmen zur Verringerung bzw. Vermeidung von schädigenden Prozessen von Bedeutung. Im DWA-Merkblatt 159 sind die essentiellsten Kriterien zur Materialauswahl detailliert erläutert. Dabei werden im Wesentlichen sechs Faktoren genannt:

- Randbedingungen
- Einbaubedingungen
- Einbauverfahren

- Anforderungen an Betrieb
- Qualitätsanforderungen
- Wirtschaftlichkeit

In Bezug auf die Festlegung der Kriterien für die Materialauswahl für die Modellierung/Simulation sowie für den späteren Pilotversuch sind bestimmte Ziele und Randbedingungen zu berücksichtigen. Unter anderem sollte eine Vorauswahl von grundsätzlich geeigneten Systemen auf Grundlage von recherchierten Informationen zur technischen Anwendbarkeit, zur Beständigkeit und zur Dauerhaftigkeit getroffen werden. Des Weiteren ist eine Erfassung der mechanischen und chemischen Widerstandsfähigkeit der zu untersuchenden Materialien und Werkstücke ein wichtiger Aspekt. Eine Klassifizierung und Bewertung der einzusetzenden Materialien nach bestimmten Kriterien sollte durchgeführt werden.

### **„Exfiltration“**

Unter Exfiltration ist u.a. ein unerwünschtes Ausströmen von Schmutzwasser aus dem Kanal in das Grundwasser zu verstehen. Undichte Kanäle können das Abwasserleitungssystem auf unterschiedliche Art und Weise negativ beeinträchtigen. Darunter gehören unter anderem die Belastung von Böden und Grundwasser. Die Exfiltration von Abwasser aus defekten Kanälen ist dabei von verschiedenen Einflussgrößen abhängig (zum Beispiel: Abwasserdurchfluss, der Lage und der Art des Schadens im Kanal, der vertikalen und horizontalen Wasserbewegung im Boden). Zur Beurteilung des Gefährdungspotentials bei unterschiedlichen Schadensarten und zur Ermittlung von Exfiltrationsraten wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Dabei unterscheiden diese sich meistens in Ihrer Zielstellung sowie in den Parametervariationen wie Bodenart, Schadensart, Grundwasserspiegel. Wichtig für die Abschätzung der Beeinflussung der Grundwasserqualität durch Exfiltration sind Direktmessungen im Untersuchungsgebiet und Informationen aus Kamerabefahrungen. Untersuchungen zur tatsächlich aus einem Rohrschaden exfiltrierenden Abwassermenge wurden u.a. an folgenden Orten bzw. Institutionen durchgeführt:

- Untersuchungen RTWH Aachen, 1994
- Untersuchungen Universität Innsbruck, 1994/1995
- Untersuchungen in Rastatt, 2006

Bei den meisten Untersuchungen wird mit der bekannten Darcy-Gleichung in Verbindung mit dem Leakage-Faktor eine Funktion zur Bestimmung der Exfiltrationsmenge in Abhängigkeit von der Schadensgröße und der Fließtiefe im Abwasserkanal aufgestellt. Neben oben ange-

fürten Untersuchungen liefert Klinger (2007) in seiner Arbeit eine kurze und vereinfachte Übersicht über Untersuchungen zur Ermittlung von Exfiltrationsraten. Die Schwierigkeit der Vergleichbarkeit begründet sich durch die jeweils gewählte räumliche Skala der durchgeführten Versuche. Direkte Exfiltrationsmessungen am Einzelschaden geben die Exfiltrationsmengen in Liter pro Tag an, während Massenbilanzen oder statistische Verfahren die Austrittsmengen auf die Länge des betrachteten Kanalnetzes beziehen und die Mengen in Liter pro Meter und Zeiteinheit angeben (Klinger 2007).

An der Universität der Bundeswehr München wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes ein Berechnungsansatz erarbeitet, bei dem unter Berücksichtigung zulässiger Stoffkonzentrationen beim Eintritt in den Grundwasserleiter, eine Funktion abgeleitet werden kann, mit der zulässige messbare Exfiltrationsraten berechnet werden können. Als Berechnungsgrundlage wurden Literaturdaten für bestimmte Stoffkonzentrationen im häuslichen Abwasser und im Dachabfluss sowie für Stoffumsetzungen und Eliminationsraten während der Bodenpassage herangezogen.

### **„Infiltration“**

Infiltrierendes Grundwasser zählt zur Kategorie des Fremdwassers und ist somit ein unerwünschter Bestandteil des abzuleitenden Schmutzwassers. Infiltration kann zu verschiedenen Auswirkungen sowohl für das Kanalsystem als auch für Abwasserbehandlungsanlagen führen. Die Literaturrecherche ergab, dass nur vereinzelt Berechnungsansätze zur Quantifizierung der Grundwasserinfiltration erarbeitet wurden und ganzheitliche Ansätze unter Berücksichtigung aller möglichen Einflussgrößen nur wenig bekannt sind. Verschiedene Modellansätze zur Quantifizierung der Grundwasserinfiltration sind in der Dissertation von Hennerkes (2006) zu finden. Hennerkes (2006) selbst führte Untersuchungen an einem Versuchstand durch, um einen geeigneten Berechnungsansatz zu entwickeln. Das Versuchsprogramm zur Ermittlung von Infiltrationsraten berücksichtigte wesentliche Einflussparameter wie Bodenart, Grundwasserspiegel und Schadensart. Die wichtigsten recherchierten Untersuchungen zur Entwicklung von Berechnungsansätzen zur Simulation der Grundwasserinfiltration sind:

- Hennerkes (Aachener Untersuchungen, 2006)
- Dohmann (Aachener Untersuchungen, 1998)
- Klinger (Karlsruher Untersuchungen, 2007)
- APUSS-Studie (Dresdner Untersuchungen, 2004)

Die oben angeführten Ansätze verwenden als Grundlage ihres Modellansatzes die von DARCY entwickelte Berechnungsgleichung unter Einbezug des Leakage Faktors.

# 1 Einleitung und Zielsetzung

## 1.1 Einführung

Die länder und -bundesweit dokumentierten Undichtigkeiten in den öffentlichen und privaten Abwassersystemen sind in der Siedlungswasserwirtschaft eines der wesentlichsten Hauptprobleme. Neben monetären Aspekten und Gefährdungspotentialen werden Handlungsempfehlungen sowie Fremdwasserkonzepte diskutiert. Eine Fremdwasserreduktion zu 100% kann allerdings nicht erreicht werden. Doch bevor belastbare Aussagen dazu gemacht werden können, ist eine genaue Fremdwasseranalyse empfehlenswert. Hierzu wird der Detaillierungsgrad je nach Erkenntnisstand zum Fremdwasseraufkommen im Laufe der Bearbeitung erhöht. Die Art und der Umfang eines Fremdwasserkonzeptes hängen dabei im Wesentlichen von den Rahmenbedingungen des Einzugsgebietes ab. In den häufigsten Fällen werden die Wechselwirkungen von infiltrierendem Wasser und der resultierenden Grundwasserabsenkung oberhalb der Schadstellen im Kanalnetz unzureichend berücksichtigt, da diesbezüglich bisher noch keine hinreichenden Untersuchungen durchgeführt wurden sind. Aus diesem Grund soll im Rahmen dieses Projektes eine umfangreiche Literaturrecherche dazu beitragen, den Einfluss der Fremdwasserinfiltrationen auf die Bodenmechanik besser zu verstehen. Dementsprechend werden wichtige Einflüsse wie Bodenart (Permeabilität), Grundwasserstand, Materialkriterien, Schadensart und ausschlaggebende Parameter wie Infiltrationsrate, Exfiltrationsrate eingehend betrachtet. Die Ergebnisse und die verifizierbaren Aussagen aus der Literaturrecherche dienen gleichzeitig auch dazu um das Modellierungswerkzeug FEFLOW, mit dem das Verhalten des Aquifers bei unterschiedlichen Infiltrationsraten und Bodenarten bestimmt werden kann, zu konstruieren. Die verwertbaren Erkenntnisse aus diesem Teilprojekt dienen weiterhin dazu, ein rechnerisches Modellnetz mit umgebendem Modellboden zu entwerfen, um anhand von Parametervariationen geeignete maximale Infiltrationskriterien aufzustellen. Dies bezieht sich insbesondere auf das Infiltrationsvermögen bei Restleckagen je nach Bodenart und auf die erwartbare Qualität der Werkstoffwechsel bzw. Verbindungssysteme beim Neubau und bei der Sanierung. Ein geeigneter Modellansatz für die Nachbildung von Grundwasserinfiltration ist für die Quantifizierung von Fremdwasser unbedingt notwendig, um dadurch lokalspezifisch Priorisierungen vornehmen und ein entsprechendes Fremdwasserreduzierungskonzept entwickeln zu können.

## 1.2 Zielsetzung

Die Universität der Bundeswehr München vertreten durch Prof. Dr.-Ing. F.W. Günthert, Institut für Wasserwesen, Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik begleitet als Unterauftrag-

nehmer, das vom IKT beim Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, beantragte Projekt (Einzelauftrag Nr. 6) mit der Bezeichnung: „Entwicklung von Abnahmekriterien für Infiltrationsdichtheit und Erstellung eines Prüfprogrammes für vergleichende Untersuchungen an Werkstoffwechseln bzw. Übergängen“. Die Ziele des Gesamtvorhabens sowie die Notwendigkeit dieses Forschungsprojektes werden im Projektantrag näher erläutert. Insbesondere in Hinblick auf Phase I des Projektes liefert die Universität der Bundeswehr München (SWA) als Projektpartner fundierte Erkenntnisse, Informationen, Daten sowie Erfahrungswerte zum Themenschwerpunkt Abnahmekriterien bezüglich Infiltrationsdichtheit. Als wesentlicher Subauftragnehmer hat die UniBw (SWA) die Hautaufgabe Arbeitspaket 4 der Projektphase I (Angebotsposition 4) zu bearbeiten. Hierfür sind die von der IKT geforderten Leistungen zu erbringen. Als weitere unterstützende Hilfeleistung werden seitens der UniBW (SWA) gesicherte wissenschaftliche Erkenntnisse, Erfahrungsberichte, und im Rahmen einer Literaturrecherche neu gewonnene und verwertbare Informationen sowie Daten wie zum Beispiel aus Vergleichsprojekten, ähnlichen Forschungsvorhaben und Forschungs- und Projektdatenbanken ausgetauscht.

Im Rahmen einer umfangreichen Literaturrecherche werden verschiedene Themen bzw. Aspekte angesprochen und näher betrachtet. Neben der Darstellung der siedlungswasserwirtschaftlichen Relevanz von Fremdwassereinträgen und deren Auswirkungen auf abwassertechnischen Anlagen und Bauteile sind auch die Erfassung aller möglichen wichtigen Einflussfaktoren und Parameter (Grundwasserneubildungsrate, Grundwasserstand, Bodenart, Kf-Wert, Einbauart, Schadensart, hydraulische Einflüsse etc.) auf die Infiltration und dessen Häufigkeit und Intensität sowie die literaturbezogene Nachweisführung möglicher Korrelationen bzw. Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Einflussgrößen von Bedeutung. In einem weiteren Schritt soll die Frage geklärt werden, welche Infiltrationsdichtheit von einzelnen Bauteilen überhaupt erwartet werden können. Zudem ist u.a. eine konzeptionelle Erarbeitung von Kriterien zur Materialauswahl und Standsicherheit für Abwasserleitungen und -Kanäle unter Berücksichtigung bestimmter Faktoren und Randbedingungen (Einbaubedingungen, Werkstoffkennwerte, Qualitätsanforderungen) Bestandteil der Literaturrecherche. Des Weiteren ist der Prozess der Exfiltration näher zu beleuchten, indem berechnete sowie zulässige Exfiltrationsraten und ermittelte Leakage-Faktoren aufgezeigt werden.

## 2 Themenschwerpunkt Fremdwasser

In Hinblick auf den Begriff Fremdwasser wurden verschiedene relevante Literaturquellen überprüft und nach folgenden Unterpunkten gesichtet:

- Begriff Fremdwasser
- Fremdwasserquellen, Ursachen von Fremdwasser
- Auswirkungen/Konsequenzen Fremdwasser
- Bestimmung von Fremdwasser
- Fremdwassersanierung/Fremdwasserreduzierung

Die wichtigsten und interessantesten Literaturquellen zum Thema Fremdwasser sind in Tabelle 1 angeführt. Eine komprimierte und dennoch detaillierte Abhandlung zum Thema Fremdwasser in Entwässerungsanlagen ist im Merkblatt DWA-M 182 (Gelbdruck) zu finden. Hier werden die bedeutendsten Teilaspekte, wie oben angeführt, eingehend erläutert.

Tabelle 1: Übersicht Literaturquellen zum Themenschwerpunkt Fremdwasser

Autor	Literatur
Joachim Decker (1998)	„Auswirkungen von Fremdwasser auf Abwasseranlagen und Gewässer“, GWA Schriftenreihe 168, Aachen
Michalska A. und Pecher K. H. (2000)	„Betriebliche und kostenmäßige Auswirkung des Fremdwassers auf Kanalisation und Kläranlage. Gewässerschutz - Wasser – Abwasser“, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, RWTH Aachen, 27/1- 27/17.
Steffen Lucas (2003)	„Auftreten, Ursachen und Auswirkungen hoher Fremdwasserabflüsse – eine zeitliche und räumliche Analyse“ Universität Karlsruhe, Schriftenreihe des ISWW, Band 115, Karlsruhe
Jörg Andre Hennerkes (2006)	„Reduzierung von Fremdwasser bei der Abwasserentsorgung“ Aachener Schriften zur Stadtentwässerung, Band 10, Aachen
Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2007)	„Fremdwasser in kommunalen Kläranlagen – Erkennen, bewerten und vermeiden“, Karlsruhe
DWA	Merkblatt DWA- M 182, „Fremdwasser in Entwässerungssystemen“ (Stand Dezember 2010)

## 2.1 Begriff Fremdwasser

In der Wassergesetzgebung ist der Begriff Fremdwasser nicht zu finden. Fremdwasser ist kein Rechtsbegriff im Bundes- oder Landesrecht. Allein über ein Verbot der Verdünnung von Abwasser zur Einhaltung zulässiger Schadstoffkonzentrationen und die Forderung nach einer Einhaltung der a.a.R.d.T. beim Bau und Betrieb von Abwasseranlagen wird auf die Fremdwasserproblematik Bezug genommen (LUBW 2007).

In technischen Regelwerken hingegen wird Fremdwasser unterschiedlich definiert. DIN 4045 definiert Fremdwasser nach seiner Herkunft als „in die Kanalisation eindringendes Grundwasser (Undichtigkeiten), unerlaubt über Fehllanschlüsse eingeleitetes Wasser (z.B. Drainagewasser, Regenwasser) sowie einem Schmutzwasserkanal zufließendes Oberflächenwasser (z.B. über Schachtabdeckungen)“ definiert. DIN EN 752-1 (1996) gibt an: „Fremdwasser sei ein unerwünschter Abfluss in einem Entwässerungssystem“. Die damalige DVWK Arbeitsgruppe ES-1.3 „Fremdwasser“ hatte folgende umfassende Fremdwasserdefinition eingeführt (ATV-DVWK 2003): „Fremdwasser ist das in Abwasseranlagen abfließende Wasser, welches weder durch häuslichen, gewerblichen, landwirtschaftlichen oder sonstigen Gebrauch in seinen Eigenschaften verändert ist, noch bei Niederschlägen von bebauten oder befestigten Flächen gesammelt und gezielt eingeleitet wurde. Fremdwasser erfordert aufgrund seiner Qualität keine Abwasserbehandlung, erschwert diese bzw. belastet aufgrund seiner Quantität Abwasseranlagen unnötig und ist unter dem Aspekt des Gewässerschutzes unerwünscht.“ Eine Übersicht über die Definitionen der Begriffe Abwasser und Fremdwasser werden nach Decker (1998) zusammengefasst. Folgende Tabellen geben einen Einblick über die Definitionen des Begriffs Abwasser und Fremdwasser in verschiedenen Normen und Regelwerken der ATV bzw. DWA.



Tabelle 2: Übersicht über die Begriffsdefinition Abwasser (Decker 1998)

Definition von Abwasser in Norm ...	DIN 4045 [161]	EN 1085 (Entwurf) [164]	EN 752-1 [165]	ATV-A 118 [12]
Schmutzwasser (häuslich/gewerblich/industriell)	x	x	x	x
Regenwasser	x	x	x	x
Fremdwasser	x	x	-	x
Mischwasser	x	-	-	-
Kühlwasser	x	-	-	-

Tabelle 3 Übersicht über die Begriffsdefinition Fremdwasser (Decker 1998)

Definition von Fremdwasser in Norm ...	DIN 4045 [161]	EN 1085 (Entwurf) [164]	EN 752-1 [165]	ATV-A 118 [12]
Grundwasser	x	x	} pauschale verbale Festlegung	x
Fehllanschlüsse (Drän- und Regenwasser)	x			x
Oberflächenwasser	x (nur in SW-Kanal)	x (außer Regenwasser in MW-Kanal)		x

In den meisten gesichteten Literaturquellen wird Fremdwasser als unerwünscht eindringendes Grund- Oberflächen-oder Niederschlagswasser über Haus-und Grundstücksdrainagen, undichte Kanalabschnitte, an die Kanalisation angeschlossene Bachläufe oder sonstige Einträge, definiert. Jedoch gibt es keine einheitliche wasserrechtliche Regelung bezüglich des zulässigen Fremdwasseranfalls auf Bundes- oder Länderebene. Nach § 7a WHG liegen die wasserwirtschaftlichen Ziele des Gesetzgebers auf einer Reduzierung der Schadstofffrachten und nicht der Schadstoffkonzentrationen. In diesem Sinne ist auch das grundsätzliche wasserrechtliche Verdünnungs- und Vermischungsverbot nach § 3 AbwV zu sehen (Hennerkes 2006). In Hinblick auf die länderspezifischen Festlegungen des Grenzwertes einer unzulässigen Verdünnung von Abwasser durch Fremdwasser im Sinne des Abwasserabgabengesetzes, fasst Hennerkes (2006) die Regelungen der Bundesländer zum Abwasserabgabengesetz zusammen (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Regelungen der Bundesländer zum Abwasserabgabengesetz (Hennerkes 2006)

Bundesland	Konkretisierung
Baden-Württemberg	Nach § 115a WG Baden-Württemberg (2005) ist für die Gewährung einer Ermäßigung der Abwasserabgabe ab einem Fremdwasseranteil von 50 % im Jahresmittel der Nachweis zu führen, dass ein höherer Anforderungswert $AW = Q_T / (Q_T - Q_F) \cdot \dot{U}W_{max}$ die Mindestanforderungen der Kläranlage einhält. Aufwendungen, die zur Verringerung der Verdünnung führen (bspw. fremdwasserreduzierende Maßnahmen) können mit der gezahlten Abwasserabgabe von 3 Jahren verrechnet werden. Das Fremdwasseraufkommen wird seit dem Jahr 2000 über das gleitende 21-Tage Minimumverfahren ermittelt.
Bayern	Das zulässige Fremdwasseraufkommen wird seit 1992 auf einen Fremdwasseranteil von 25 % im Jahresmittel begrenzt, bei Überschreitung ist ein höherer Anforderungswert für die Kläranlage maßgebend; dieser wird an jedem einzelnen amtlichen Messwert überprüft (Art. 8a BayAbwAG, 2005; VwVBayAbwAG, 2003; EÜV Bayern, 2003). D. h. die konzentrationsbezogenen Anforderungen nach AbwV werden verschärft. Die Ermittlung des Fremdwasseraufkommens erfolgt durch die Nachtminimum-Methode.
Hessen	Der Fremdwasseranteil soll den Schmutzwasseranteil nicht überschreiten. Ausnahmen existieren bei der Abwasserreinigung bei Nachweis der ausreichenden Stofffrachtminimierung (CSB, N, P) und ordnungsgemäßer Behandlung der Abwassermenge (Allg. VwV für den Vollzug des AbwAG, 1995; HAbwAG, 2005)
Nordrhein-Westfalen	Eine unzulässige Verdünnung oder Vermischung liegt nicht vor bei einem spez. Abwasseranfall von $q_{T,d} \leq 300 \text{ l/(E} \cdot \text{d)}$ . Bei $300 < q_{T,d} < 450 \text{ l/(E} \cdot \text{d)}$ ist ein Nachweis über den Wirkungsvergleich für den CSB für 6 Monate im Winterhalbjahr zu führen. Bei nicht erbrachtem Nachweis oder $q_{T,d} \geq 450 \text{ l/(E} \cdot \text{d)}$ liegt eine unzulässige Verdünnung vor (Runderlassentwurf des MUNLV NRW, 1998). Als Berechnungsgrundlage war die Jahresschmutzwasseremethode vorgesehen.
Sachsen	Es besteht die Möglichkeit der Reduzierung der Abwasserabgabe, wenn die Kläranlagen trotz Fremdwasser keine hydraulische Überlastung aufweisen und einen Mindestwirkungsgrad hinsichtlich der Frachten des Parameters CSB leisten (VwV des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landesentwicklung zur Erhebung der Abwasserabgabe, 1992).
Thüringen	Die Ermäßigung der Abwasserabgabe entfällt bei einem Fremdwasseranteil $\geq 50 \%$ . Ermäßigungen sind zulässig, wenn ein entsprechender Wirkungsgrad bei der Frachtelimination nachgewiesen werden kann. Die Maßnahmen zur Fremdwasserreduzierung sind mit der Abwasserabgabe nicht verrechnungsfähig (ThürVwVAbwAG, 2003; ThürAbwAG, 2005).
Rheinland-Pfalz	Es gibt keine Definition einer zulässigen Verdünnung, allerdings Hinweise in § 9 LAbwAG auf die Verfahrensweise zum Versagen der Ermäßigung der Abwasserabgabe bei Vorliegen einer unzulässigen Verdünnung (LAbwAG, 2006).

## 2.2 Fremdwasserquellen

Die Ursachen von einem zu hohen und unerwünschten Fremdwasseranfall in das Abwassersystem sind bekannt. Grundwasserinfiltration, Schichtenwasserinfiltration, Fehlanschlüsse bei der Oberflächen- und Drainageentwässerung stellen die Hauptquellen dar. Eine Veranschaulichung der Herkunft von Fremdwasser am Beispiel eines Trennsystems ist in Abbildung 1 dargestellt.

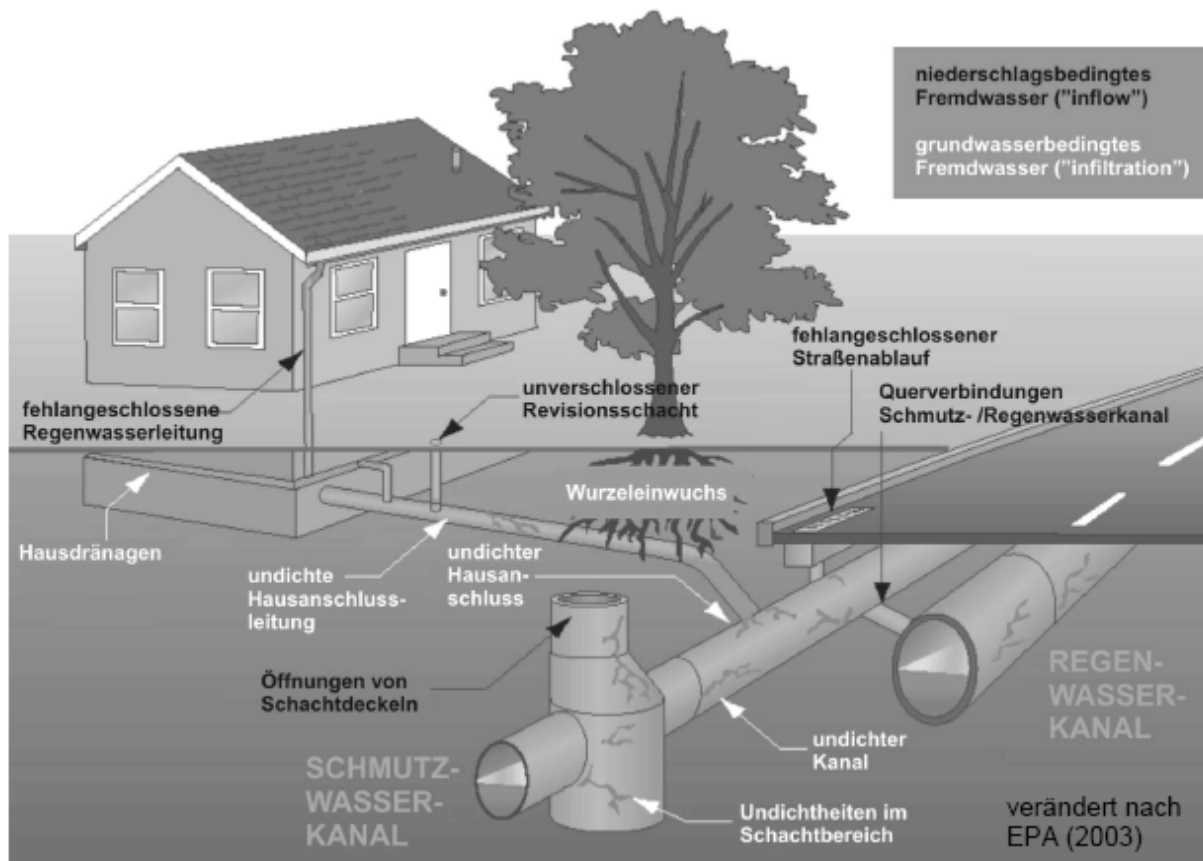


Abbildung 1: Herkunft von Fremdwasser am Beispiel eines Trennsystems (Hennerkes 2006)

Eine umfassende Übersicht über die verschiedenen Quellen von Fremdwasser in Misch- und Trennsystemen wurde von Hennerkes (2006) erstellt und ist in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 5: Quellen von Fremdwasser in Misch- und Trennsystemen (Hennerkes 2006)

Quellen des Fremdwassers		beeinflusst durch (...)	Fremdwasserquelle im (...)		
			Mischsystem	Schmutzwasserkanal	Regenwasserkanal
Undichtigkeiten	kommunale Abwasserkanäle und Schachtbauwerke	Grundwasser	●	●	●
	Hausanschlüsse / Hausanschlussleitungen und Grundstücksentwässerungsleitungen	Grundwasser	●	●	●
Fehlanschlüsse und Fehleinleitungen	Dränagen (Grundstücke, Baustellen, landwirtschaftliche Flächen, unter Abwasserkanälen verlegte Dränagen)	Niederschlag Grundwasser	●	●	
	durch die Öffnungen von Schachtdeckeln zufließendes Oberflächenwasser				
	Überläufe vom Regenwasser- in den Schmutzwasserkanal	Niederschlag		●	
	Dach- und Straßenabläufe an den Endpunkten der Schmutzwasserkanäle				
	Wegeseitengräben, Siefen und Außengebiete, unbefestigte Flächen	Niederschlag	●	●	●
	Bachläufe, Quelfassungen und Brunnenüberläufe	Niederschlag Grundwasser	●	●	●
	nicht behandlungsbedürftiges Regenwasser von befestigten Flächen (siehe MERTSCH, 2001)	Niederschlag		●	●
Flusswasser (Überflutungen)	Niederschlag	●	●		
sonstige Einleitungen	nicht schädlich verunreinigtes Kühlwasser, Wasser aus Wärmepumpen	anthropogen	●	●	
	Trinkwasserverluste	anthropogen	●	●	●
	Löschwasser, Spülwasser aus der Kanal- und Schachtreinigung	anthropogen	●	●	

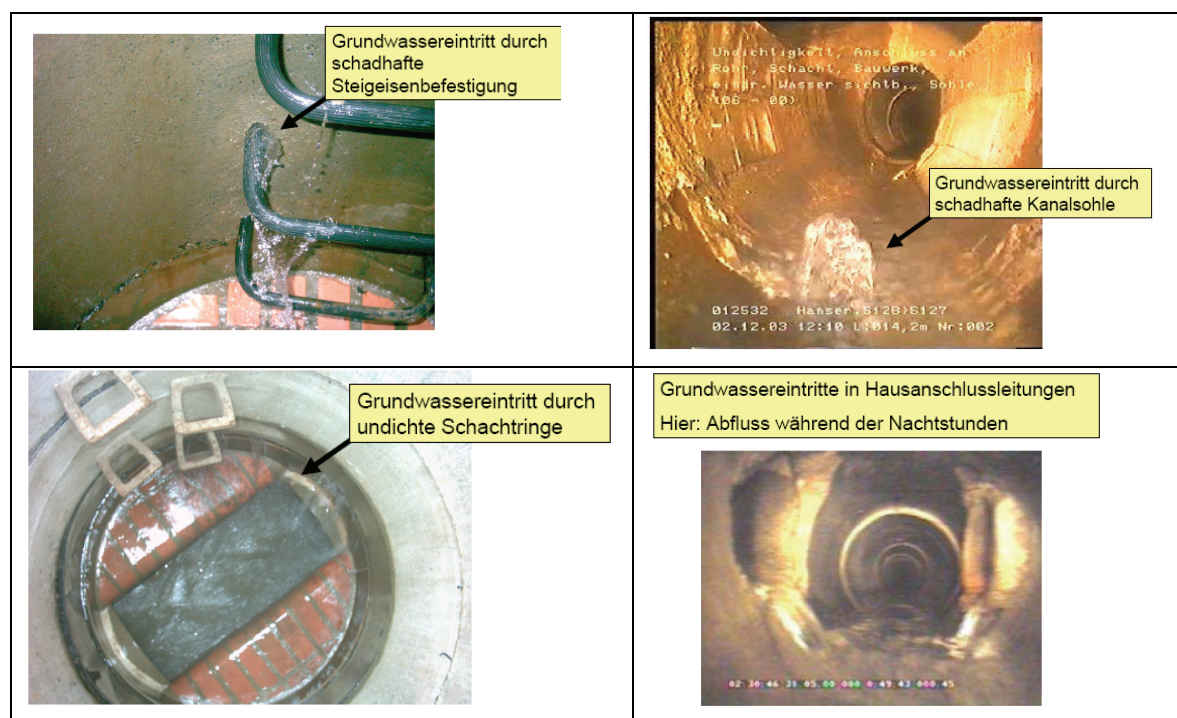
Dabei unterscheidet Hennerkes (2006) durch Grundwasser verursachtes Fremdwasser, durch Niederschlag verursachtes Fremdwasser sowie durch menschlichen Einfluss verursachtes Fremdwasser. Tabelle 6 zeigt beispielhaft die verschiedenen Ursachen für unerwünschten Fremdwasseranfall.

Neben der eigentlichen Quelle für den Fremdwasseranfall haben auch verschiedene Faktoren Einfluss auf die räumliche, zeitliche und mengenmäßige Verteilung des Fremdwassers. Darunter gehören unter anderem:

- Grundwasserspiegel und Schwankungseinflussfaktoren
- saisonales Niederschlagsverhalten

- Art des Entwässerungssystems
- Eigenschaften des Einzugsgebietes (Hydrogeologie, Bodenmechanik, Morphologie)

Tabelle 6: verschiedenen Ursachen für unerwünschten Fremdwasseranfall (Jardin 2004)



### 2.3 Bestimmung von Fremdwasser

Will man den Fremdwasserzutritt in Abwasserkanäle untersuchen, so sind grundsätzlich zwei wesentliche Fragestellungen zu berücksichtigen. Zum einen spielt das Verfahren der Ermittlung der Infiltrationsmenge eine wichtige Rolle, zum anderen kommt der Detektion von Leckagen eine große Bedeutung zu. In der Praxis kommen die verschiedensten Verfahren zum Einsatz. So lässt sich auch in der überprüften Literatur feststellen, dass im Laufe der Zeit diverse Technologien und Verfahren entwickelt worden sind und sich bewährt haben. Fremdwassermessungen werden routinemäßig auf der Kläranlage durchgeführt, um die Fremdwasserbelastung der Kläranlage und damit des ganzen Kanalnetzes zu bestimmen. Sie sind für den Vollzug des AbwAG notwendig und dienen zur Einordnung der Fremdwasserbelastung der Kläranlage (LUBW 2007).

Nach Lucas (2003) ist die Ermittlung von Fremdwasserabflüssen in der Siedlungsentwässerung grundsätzlich schwierig. Des Weiteren sind die Ergebnisse mit vergleichsweise hohen Unsicherheiten hinsichtlich der Genauigkeit behaftet (Lucas 2003). Grund hierfür sind die Fremdwasserkomponenten, welche sich im Kanal unmittelbar mit dem restlichen Abfluss vermischen können und deshalb nur gemeinsam mit diesem gemessen werden können. Der

Fremdwasserabfluss lässt sich deshalb in der Regel ausschließlich über eine Subtraktionsrechnung ermitteln. Die Methoden zur Bestimmung der Fremdwassermenge sind weder genormt noch im Regelwerk der ATV bzw. DWA exakt beschrieben (Lucas 2003).

Die Wahl der Methode bestimmt die erzielbare Genauigkeit und die Auslegung bzw. die Art der Resultate. Dadurch lassen sich folgende Verfahren zu Fremdwasserermittlung unterschiedlich bewerten:

- Jahresschmutzwasser-Methode
- Nachtmessungsmethode
- Chemische Methode
- Methode des gleitenden Minimums
- (Isotopen-Methode)

Lucas (2003) und LUBW (2007) liefern eine umfangreiche Bewertung der gängigsten Fremdwassermessmethoden. Lucas (2003) fasst diese u.a. in folgender Tabelle zusammen.

Tabelle 7: Übersicht über Fremdwasserbestimmungsmethoden (Lucas 2003)

„Jahresschmutzwasser“-Methode	Benötigte Daten	Tagesabflussmengen, Wetterschlüssel, Ansatz für Schmutzwasserabfluss
	Aussagen über Saisonalität möglich?	tägliche Fremdwasserabflüsse nur, wenn die Methode für jeden Trockenwettertag einzeln angewandt wird; Lücken an Regentagen
	Vorteile	einfache Standardmethode für Abwasserabgabeklärung
	Nachteile	nur Trockenwettertage gehen in Ermittlung ein, willkürlicher Wetterschlüssel. Wenn nur wenige Trockenwettertage vorhanden sind, sehr fehlerbehaftete Ergebnisse, latente Unterschätzung von $Q_f$
Nachtmessungsmethode	Benötigte Daten	Minimaler Nachtzufluss an mindestens einem Trockenwettertag pro Monat, Ansatz für nächtlichen Schmutzwasserzufluss
	Aussagen über Saisonalität möglich?	tägliche Fremdwasserabflüsse nur, wenn die Methode für jeden Trockenwettertag einzeln angewandt wird; Lücken an Regentagen
	Vorteile	einfache Standardmethode für Abwasserabgabeklärung
	Nachteile	Nachtminimum muss aufgezeichnet werden; nur einzelne Trockenwettertage gehen in Ermittlung ein, willkürliche Auswahl der Messtage, unsichere Abschätzung des nächtlichen Schmutzwasserzuflusses, latente Unterschätzung von $Q_f$
„Chemische“ Methode	Benötigte Daten	mittlere und minimale Trockenwetterabflüsse und zugehörige Schmutzkonzentrationen
	Aussagen über Saisonalität möglich?	theoretisch tägliche Fremdwasserabflüsse bestimmbar, wenn die Methode für jeden Trockenwettertag einzeln angewandt würde; dazu ist jedoch der Aufwand zu groß
	Vorteile	ergänzendes Verfahren zur Plausibilitätskontrolle der vorgenannten Methoden
	Nachteile	sehr aufwändig (Probenahme und -analyse notwendig), nicht für tägliche Untersuchungen geeignet
Methode des gleitenden Minimums	Benötigte Daten	Tagesabflussmengen, Ansatz für Schmutzwasserabfluss
	Aussagen über Saisonalität möglich?	ja, liefert Tageswerte für Fremdwasser und Regenwasser
	Vorteile	einfaches, rechnergestütztes Verfahren. Keine Datenlücken in der Ergebnisganglinie. Wetterschlüssel wird nicht benötigt. Auch Regentage gehen ein. Liefert auch Aussagen über Regenwassermenge.
	Nachteile	rein phänomenologisches Verfahren

Darüber hinaus wird in der Studie des LUBW (2007) eine vergleichende Bewertung der verschiedenen Methoden zur Abflussmessung im Rahmen von Fremdwassermessungen im Kanalnetz aufgezeigt (siehe Tabelle 8)

Tabelle 8: Messtechniken für Fremdwasserbestimmung im Kanalnetz (LUBW 2007)

<b>Mobiler MID</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ sehr genaue Messung</li> <li>+ je nach Randbedingungen kein Einstieg in Schacht notwendig (Arbeitsschutz)</li> <li>+ Aufzeichnung von Ganglinien möglich</li> <li>+ schneller Einbau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- kann nicht längere Zeit im Kanal verbleiben (wg. Einengung des Kanalquerschnitts insbes. bei Mischwasserabfluss)</li> <li>- empfindlich gegenüber Luftblasen im Abwasser (z.B. durch Absturzbauwerke im Oberstrom)</li> <li>- Anschaffungskosten</li> </ul>
<b>Kombinierter Messwert-aufnehmer (Ultraschall-Doppler- bzw. Kreuzkorrelationsverfahren)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ sehr genaue Messung (ausreichende Fließtiefe vorausgesetzt)</li> <li>+ Messwertaufnehmer kann beliebig lange im Kanal bleiben</li> <li>+ kaum Verlegung des Messwertaufnehmers</li> <li>+ Aufzeichnung von Ganglinien möglich</li> <li>+ schneller Einbau des Messwertaufnehmers mittels Montagesystemen der Hersteller</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- bei geringen Fließtiefen nicht oder nur mit Einstau des Messwertaufnehmers anwendbar</li> <li>- bei sehr kleinen Kanalquerschnitten nicht anwendbar</li> <li>- Anschaffungskosten</li> <li>- zum Einbau Einstieg in den Kanal notwendig</li> </ul>
<b>Messwehr mit kontinuierlicher Wasserstandsaufzeichnung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ bei richtiger Auswahl des Messwehres sehr genaue Messung</li> <li>+ Aufzeichnung von Ganglinien möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Installation aufwändig</li> <li>- Kalibrierung notwendig</li> <li>- Verlegung des Messwehres</li> <li>- zum Einbau Einstieg in den Kanal notwendig</li> </ul>
<b>Mobiles Messwehr mit manueller Ablesung des Überfallhöhe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ bei richtiger Auswahl des Messwehres sehr genaue Messung</li> <li>+ schneller Einbau</li> <li>+ kostengünstig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Messung stellt nur Momentaufnahme dar zum Einbau und zur Messung Einstieg in den Kanal notwendig</li> <li>- keine Aufzeichnung von Ganglinien möglich</li> </ul>
<b>Fließtiefenbestimmung mittels Meterstab</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ sehr kostengünstig</li> <li>+ sehr schnelle Messung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Messung ist relativ ungenau</li> <li>- zur Messung in tieferen Schächten Einstieg in den Kanal notwendig</li> </ul>
<b>Nächtliche Sichtkontrolle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ sehr kostengünstig</li> <li>+ sehr schnelle Messung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nur qualitative Aussagen zum Fremdwasseraufkommen möglich</li> </ul>

## 2.4 Siedlungswasserwirtschaftliche Relevanz von Fremdwasser

Generell kann behauptet werden, dass Fremdwasser die Abwasserentsorgung erschwert und zusätzliche Kosten in der Siedlungswasserwirtschaft verursacht. Unerwünschte Abflüsse durch Fremdwasser führen zu Konsequenzen für den Betrieb und die Funktionsfähigkeit von siedlungswasserwirtschaftlichen Anlagen und Systemen. Fremdwasser hat zum einem eine Verdünnungsfunktion bei Trockenwetter und fungiert gleichzeitig als teilweise erwünschter Spüleffekt (Remobilisierung von Feststoffen, Mittransport von Ablagerungen). Neben den zahlreichen betrieblichen Auswirkungen gibt es auch ökologische und ökonomische Auswirkungen. Tabelle 9 fasst die wesentlichsten Auswirkungen von Fremdwasser zusammen. Die Intensität der Auswirkung ist dabei stark vom Fremdwasseraufkommen und der räumliche und zeitliche Verteilung des Fremdwassers sowie von möglichen Interaktionen mit dem Grundwasser abhängig.

Tabelle 9: allgemeine Übersicht über die Auswirkungen von Fremdwasser

betriebllich	ökologisch	ökonomisch
Einfluss auf die Bemessung der biologischen Abwasserreinigung	Stoffeintrag in Gewässer	erhöhte Baukosten und Kapitalkosten
hydraulischen Belastung der Abwasserkanäle	Temperaturänderung des Gewässers	
erhöhte Entlastung aus Mischwasser- netzen	Stoffeintrag durch KA (erhöhte emittierte Nährstofffrachten im Ablauf von Kläranlagen)	höhere Investitionen für die Fremdwassermitbehandlung auf der Kläranlage und bei der Niederschlagswasserbehandlung
Verdünnung und Zuflusserhöhung zur Kläranlage		
verlängerten Laufzeiten und höherer Schaltintervalle bei Pumpsystemen	Einfluss auf Hydraulik und den Stofftransport von Fließgewässern	höhere Betriebskosten (insbesondere Pumpwerke Abwasserbehandlungsanlage)
Bildung von Lagerungsdefekten und Hohlräumen (Gefährdung der Standsicherheit von Kanälen durch eindringendes Grundwasser)		
Korrosion von Rohren, Verockerung (abhängig von Material der Rohre und Inhaltsstoffen im Wasser)	Einfluss auf die Gewässergüte (pH-Wert, Nitratgehalt, Sauerstoffgehalt) (Immissionsprinzip)	höhere Abwasserabgabe
Einspülung von Feststoffen		

Sowohl die Arbeiten von Hennerkes (2006) und Lucas (2003), als auch die Studie des LUBW (2007) sowie die Arbeit von Decker (1998) geben einen detaillierten Einblick über die verschiedenen Auswirkungen eines erhöhten Fremdwasseranfalls. In Bezug auf oben angeführten Sachverhalte und die in der Literatur zahlreich dokumentierten Auswirkungen von Fremdwasser, macht es Sinn im Rahmen dieses Projektes ein detailliertes Untersuchungsprogramm zur Identifizierung der Fremdwasserquellen und zur Ableitung von geeigneten Sanierungsstrategien zu konzipieren.



### 3 Themenschwerpunkt Kriterien zur Materialauswahl und Regelwerke Dichtheitsprüfung

Auch bezüglich dieses Schwerpunkts wurden relevante Literaturquellen überprüft und nach verwertbaren Aussagen recherchiert. Das Kapitel zeigt eine Übersicht über die Regelwerke und Richtlinien zur Dichtheitsprüfung und nennt die wichtigsten Kriterien und Faktoren bei der Materialauswahl von Rohrsystemen und Werkstoffen. Sowohl die Materialauswahl bei Neubau als auch die verschiedenen Verfahren zur Dichtheitsprüfung bei bestehenden und neu eingebauten Leitungen stehen im direkten Zusammenhang mit der Schadensentstehung im Abwasserableitungssystem. Die meistens Schadensursachen für Undichtigkeiten: sind

- Nichtbeachtung von DIN EN 1610, DIN EN 12889, DIN EN 476, DIN EN 14457, DWA-A 139, DWA-A 125
- Nichtbeachtung Planungsnormen
- falsche Werkstoff- und Bauteilauswahl
- nicht ordnungsgemäße Bauausführung
- nicht ordnungsgemäßer Betrieb
- Werkstoffalterung
- Lageabweichung

Folgende Tabellen fassen die wesentlichsten Literaturquellen zu den Themen Dichtheitsprüfung und Kriterien zur Materialauswahl zusammen. Darüber hinaus werden Richtlinien aufgezeigt, welche Anforderungen und Prüfverfahren für Rohrleitungssysteme, Rohre, Formstücke und Werkstoffen festlegen. Neben diesen Richtlinien werden auch Regelwerke genannt, die die Planung, die Sanierung und verschiedene Bauverfahren für den Kanalbau reglementieren.

Tabelle 10: Literaturquellen zum Themenschwerpunkt Regelwerke zur Dichtheitsprüfung

Richtlinie, Autor	Literatur, Thema
§61 a LWG NRW	Wassergesetz für das Land Nordrhein-Westfalen (Landeswassergesetz - LWG -), Selbstüberwachung von Abwasseranlagen
APS-Prüfrichtlinie	IKT, Wasserdichtheit von Baustellenproben aus vor Ort härtenden Schlauchlinern

DIN 19565-1	Rohre und Formstücke aus glasfaserverstärktem Polyesterharz (UP-GF) für erdverlegte Abwasserkanäle und -leitungen; geschleudert, gefüllt; Maße, Technische Lieferbedingungen
DIN 4279	Innendruckprüfung von Druckrohrleitungen für Wasser; Druckrohre aus duktilem Gußeisen und Stahlrohre mit Zementmörtelauskleidung
DIN EN 12666-1	Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte Abwasserkanäle und -leitungen – Polyethylen (PE) – Teil 1: Anforderungen an Rohre, Formstücke und das Rohrleitungssystem
DIN EN 1277	Kunststoff-Rohrleitungssysteme – Erdverlegte Rohrleitungssysteme aus Thermoplasten für drucklose Anwendungen – Prüfverfahren für die Dichtheit von elastomeren Dichtringverbindungen
DIN EN 12889	Grabenlose Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen
DIN EN 1401-1	Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte drucklose Abwasserkanäle und -leitungen – Weichmacherfreies Polyvinylchlorid (PVCU) – Teil 1: Anforderungen an Rohre, Formstücke und das Rohrleitungssystem
DIN EN 14457	Allgemeine Anforderungen an Bauteile, die bei grabenlosem Einbau von Abwasserleitungen und -kanälen verwendet werden
DIN EN 1610	Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen
DIN EN 1852-	Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte Abwasserkanäle und -leitungen – Polypropylen (PP) – Teil 1: Anforderungen an Rohre, Formstücke und das Rohrleitungssystem
DIN EN 1916:	Rohre und Formstücke aus Beton, Stahlfaserbeton und Stahlbeton
DIN EN 1986-30	Dichtheitsprüfung privater Abwasserleitungen
DIN EN 295-3	Steinzeugrohre und Formstücke sowie Rohrverbindungen für Abwasserleitungen und -kanäle – Teil 3: Prüfverfahren
DIN EN 476	Allgemeine Anforderungen an Bauteile für Abwasserkanäle und -leitungen für Schwerkraftentwässerungssysteme
DIN EN 598	Rohre, Formstücke, Zubehörteile aus duktilem Gusseisen und ihre Verbindungen für die Abwasser-Entsorgung – Anforderungen und Prüfverfahren
DIN EN 752	Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden Teil 2: Anforderungen und Teil 5: Sanierung
DIN V 1201	Rohre und Formstücke aus Beton, Stahlfaserbeton und Stahlbeton für Abwasserleitungen und -kanäle – Typ 1 und Typ 2 – Anforderungen, Prüfung und Bewertung der Konformität
DVGW-W 400-2	Druckprüfung von Wasserleitungen
DWA-A 139	Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen

DWA-A 142	Abwasserkanäle und -leitungen in Wassergewinnungsgebieten
DWA-M 143, Teil 6	Dichtheitsprüfungen bestehender, erdüberschütteter Abwasserleitungen und -kanäle und Schächte mit Wasser, Luftüber- und Unterdruck - Inspektion, Instandsetzung, Sanierung und Erneuerung von Abwasserkanälen und -leitungen
FBS-Qualitätsrichtlinie	Rohre und Formstücke aus Beton und Stahlbeton in FBS-Qualität für erdverlegte Abwasserleitungen und -kanäle – Ausführungen, Anforderungen, Prüfungen
Günzel, W. (2006)	Gesetzliche Regelwerke und Rahmenrichtlinien zur Dichtheit von Hauptkanälen u. Grundstücksentwässerungsleitungen, Vortrag im Rahmen des 4. Schlauchlinertages in Nürnberg
Hasselmeier, M. (2010)	(2010).Dichtheitsprüfung privater Abwasserleitungen gemäß §61a Landeswasser-Gesetz NRW
Merkblatt Nr. 4.3/6 des StMUG Bayern	StMUG Bayern, Teil 2 Prüfverfahren und Teil 3 Dichtheitsprüfung von GE-Leitungen im Freispiegelabfluss ,Prüfung alter und neuer Abwasserkanäle
Stein, D. (2005)	Leitfaden zur Auswahl von Rohrwerkstoffen für kommunale Entwässerungssysteme, Teilexpertise „Wasserdichtheit“, Bochum

Tabelle 11: Literaturquellen zum Themenschwerpunkt Kriterien zur Materialauswahl

Richtlinie, Autor	Literatur, Thema
§ 45 der Landesbauordnung NRW	Allgemeines sowie Anforderungen an zu errichtete sowie bestehenden Abwasserleitungen
DIN 18300	Einteilung Bodenklassen für Erarbeiten
DIN 18916	Erd-und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke
DIN EN 206-1	Beton; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
DOHMANN, M. et al. (1999)	Wassergefährdung durch undichte Kanäle – Erfassung und Bewertung. Berlin: Springer Verlag
Dr. rer. Nat. Hüttl, MBF Berlin (2009)	Materialentwicklungen und –prüfungen, 2. Symposium zur Nachhaltigkeit von abwassertechnischen Anlagen in Berlin
DVGW-GW 325	Grabenlose Bauweisen für Gas- und Wasser-Anschlussleitungen; Anforderungen, Gütesicherung und Prüfung
DWA-A 127	Statische Berechnung von Abwasserkanälen und -leitungen

DWA-M 159	Kriterien zur Materialauswahl für Abwasserleitungen und -kanäle
Günthert, W. et al. (2001)	Zerstörungsfreie Dichtheitsprüfung von Grundstücksentwässerungsanlagen, München
Günzel, W. (2006)	Gesetzliche Regelwerke und Rahmenrichtlinien zur Dichtheit von Hauptkanälen u. Grundstücksentwässerungsleitungen, Vortrag im Rahmen des 4. Schlauchlinertages in Nürnberg
Horst Zech (2006)	Technische Regeln und Richtlinien für grabenlose Bauweisen, 3. international Heft 9/2006, Lingen
Horst Zech (2009)	Übersicht der Techniken und Erfahrungen in der Kanalsanierung, Horst Zech in 3R international, 10/2009 Lingen Ems
Institut für das Bauen mit Kunststoffen e.V. (1999)	Forschungsarbeit zum Thema Wirtschaftlichkeit und Langzeitbewährung von Wasserleitungs- und Entwässerungsrohren aus Kunststoffen im Vergleich unter Einbeziehung technischer, ökologischer, hygienischer und toxikologischer Aspekte, Darmstadt
Köhler, Rolf (1997)	Tiefbauarbeiten für Rohrleitungen, 6. Auflage, Köln
Prof. Bernd Hillemeier (2009)	Entwicklung und bauaufsichtliche Zulassung nachhaltiger Korrosionsschutz- und Sanierungsverfahren am Beispiel der Dünnglasauskleidung, 2. Symposium zur Nachhaltigkeit von abwassertechnischen Anlagen in Berlin
Prof. Dr.-Ing. Körkemeyer, ZERNA (2009)	zum Thema Kriterien der Werkstoffauswahl bei abwassertechnischen Anlagen, 2. Symposium zur Nachhaltigkeit von abwassertechnischen Anlagen in Berlin
RSV-Merkblätter	Technische Regeln und Richtlinien des Rohrleitungssanierungsverband e. V.

### 3.1 Dichtheitsprüfung

Grundsätzlich sind Abwasserkanäle und -leitungen sowie Schächte entweder mit Luft oder mit Wasser auf Dichtheit zu prüfen. Sogar eine getrennte Prüfung von Rohren und Schächten, z.B. Rohre mit Luft und Schächte mit Wasser, ist möglich. Des Weiteren ist im Falle des Nichtbestehens einer Prüfung mit Luft, der Übergang zur Prüfung mit Wasser zulässig, und das Ergebnis der Prüfung mit Wasser ist dann allein entscheidend (Saint-Gobain 2010).

Die Dichtheitsprüfung von Freispiegelleitungen ist gemäß DIN EN 1610 bzw. DWA-A 139 durchzuführen. Abweichend hiervon gilt für die Prüfung von Abwasserkanälen und -leitungen in Wassergewinnungsgebieten das DWA-A 142. Die Prüfung für Druckleitungen erfolgt nach DIN EN 805 bzw. DVGW Arbeitsblatt W400-2. Die DIN EN 1610 gilt insbesondere auch für neu erbaute Kanäle und Leitungen, wobei die Wahl der Prüfung mit Luft oder Wasser durch

den Auftraggeber bestimmt werden darf (Günzel 2006). Das Arbeitsblatt DWA-A 139 Juni 2009 unterscheidet sich im Vergleich zur Prüfrichtlinie DIN EN 1610. Die in DIN EN 1610 vom Oktober 97 enthaltenen Prüfverfahren LA und LB mit 1 und 5 kPa Prüfdruck entfallen. Des Weiterem wurden die Prüfzeiten für die Verfahren LC und LD mit 10 und 20 kPa korrigiert (Saint-Gobain 2010).

Nach Ifw (1999) hängt die Wahl eines Prüfverfahrens von den vorhandenen Randbedingungen ab. Folgende Fragen sind zu klären:

- Handelt es sich um ein Freispiegel-, Druck- oder Unterdrucksystem?
- Handelt es sich um eine öffentliche oder private Anlage zur Abwasserableitung?
- Wird in der Grundstücksentwässerungsanlage häusliches oder gewerbliches / industrielles Abwasser abgeleitet?
- Befindet sich das Prüfobjekt in einem wasserwirtschaftlich kritischen Bereich
- Handelt es sich um eine Neubauabnahme, Gewährleistungsabnahme, Sanierungsabnahme oder Wiederholungsprüfung
- Befindet sich das Prüfobjekt ober- oder unterhalb des Grundwasserspiegels?
- In welcher Höhe befindet sich der Grundwasserstand?
- Welche Einsatzgrenzen hat das Prüfverfahren.

Die Dichtheitsprüfung von Abwasserleitungen in der Praxis erfolgt in dem meisten Fällen nach DWA- A 139. Bei dieser Innendruckprüfung mit Wasser wird ein konstanter Überdruck von 50 kPa erzeugt. Dies entspricht ungefähr dem Druck einer 5 m hohen Wassersäule. Ausschlaggebendes Kriterium für das Bestehen der Prüfung ist die über einen bestimmten Zeitraum exfiltrierende Wassermenge. Nach DWA-A 139 darf die maximale Wasserabgabe innerhalb von 30 min nicht mehr als  $0,15 \text{ l/m}^2$  betragen. Bei einem Rohr mit der Nennweite DN 300 mm, einer Leitungslänge von 50 m würde die Wasserabgabe für die gesamte Leitung 6,78 Liter betragen. Die Größenordnung der Wasserabgabe ist dabei abhängig von der Nennweite bzw. den Innendurchmesser des zu prüfenden Rohres. Nachstehende Tabelle fasst die wichtigsten Prüfrichtlinien und die dazugehörigen Wasserabgabewerte zusammen.

Tabelle 12: Übersicht relevanter Prüfrichtlinien für Dichtheitsprüfung

Prüfverfahren	Wasserabgabewert
DWA-A 139 (DIN EN 1610), Prüfdruck abhängig von Geländeniveau (10 kPa bis max. 50 kPa)	
30 min Rohrleitung (100 m)	0,15 [l/m <sup>2</sup> ]
30 min Rohrleitung + Schächte	0,20 [l/m <sup>2</sup> ]
30 min Schächte und Inspektionsöffnungen	0,40 [l/m <sup>2</sup> ]
DIN 1986-30, GE-Leitung, Auffüllen bis Oberkannte des tiefsten Entwässerungsgegenstandes	
15 min	0,1 [l/m <sup>2</sup> ]
DWA-M 143, Teil 6	
bei 50 mbar über Rohrscheitel, 15 min, (Leitungen einschließlich Schächte)	0,2 [l/m <sup>2</sup> ]
bei 50 mbar, 15 min bei Schächten	0,4 [l/m <sup>2</sup> ]
DIN 4279 (Wasserverlustverfahren)	
Spannbeton, t = 12 h oder 18 h je nach Nennweite	0,02 [l/m <sup>2</sup> *h]
Stahlbeton, t = 12 h oder 18 h je nach Nennweite	0,15 [l/m <sup>2</sup> *h]
DIN V 1201 (Stahl, Beton)	
NW < 600	0,08 [l/m <sup>2</sup> ]
NW 700 bis 100	0,08 [l/m <sup>2</sup> ]
NW > 1100	0,05 [l/m <sup>2</sup> ]
DIN EN 295-3 (Steinzeug)	
bei 0,5 bar	< 0,07 [l/m <sup>2</sup> ]
DIN EN 295-3 (Polymerbeton)	
bei 2,4 bar über 15 min	< 0,05 [l/m <sup>2</sup> ]
DIN EN 598 (duktiler Guss)	
2 bar über 2 h	0 [l/m <sup>2</sup> ]
Merkblatt Nr. 4.3/6 StMUG Bayern	
Mindestprüfzeit = 15 min, zulässiger Wasserverlust pro laufenden Meter durchflossener Grundleitung	0,1 [l/m]
APS-Prüfrichtlinie	
bei 30 min und 500 mbar	dicht oder undicht

Die Anwendung der gängigsten Verfahren nach DIN 1610, DIN 1986-30, ATV-M 143-6 für die Wiederholungsprüfung von Grundleitungen birgt laut Günthert et al. (2001) die Probleme, dass u.a. Schäden im Scheitel- und Kämpferbereich des Rohres erfasst werden, die auf Grund der üblichen Fließtiefen in der Grundleitung für die Abwasserexfiltration und damit für die Umweltbelastung von untergeordneter Rolle sind. Darüber hinaus können durch die Überdruckprüfung Muffendichtungen zerstört und dadurch erst oft undicht werden. Ein weiterer Kritikpunkt bei der Dichtheitsprüfung nach DWA-A 139 ist der, dass ein wesentlicher Einflussparameter vernachlässigt bzw. nicht berücksichtigt wird. Der anliegende Grundwasserstand bzw. Grundwasserspiegel kann die Innendruckprüfung maßgeblich beeinflussen. Liegt dieser

weit über den Rohrscheitel so ist der tatsächliche Exfiltrationsausfluss im Vergleich zu einem niedriger anliegenden Grundwasserstand geringer. Der anstehende Druck durch die Wassersäule wirkt der nach außen gerichteten Wasserströmung in den Boden entgegen. Dieser Aspekt ist in Hinblick auf mögliche Analogieschlüsse zwischen Exfiltration und Infiltration von Interesse. Hier stellt sich die Frage, ob bei einem Prüfverfahren die Wasserbewegung aus dem Rohr in den Boden, der Wasserbewegung aus dem Boden ins Rohrinne gleichzusetzen ist. Dies würde bedeuten, dass unter gleichen Randbedingungen die Exfiltrationsrate vergleichbar mit der Infiltrationsrate wäre. Das ist aber bei hohen Grundwasserständen nicht der Fall, da für die Exfiltration und Infiltration unterschiedliche Druckpotentiale gelten. Der modelltechnische Nachweis belegt, dass die maximalen Exfiltrationsraten der Innendruckprüfung nicht mit den Infiltrationsraten gleich gesetzt werden können. Grund hierfür ist die Ausbildung unterschiedlicher Druckpotentiale zwischen Exfiltration und Infiltration (Keilholz 2010). So ist bei hohen Grundwasserständen im Vergleich zur Exfiltrationsrate mit einer höheren Infiltrationsrate zu rechnen. Bei gleichen Randbedingungen würde mehr Wasser infiltrieren als exfiltrieren.

### **3.2 Kriterien zur Materialauswahl**

In den Untersuchungen an der Ruhruniversität Bochum wurden Schäden an Abwasserkanälen und –leitungen unter Berücksichtigung der Standsicherheit und Funktionsfähigkeit beurteilt (Stein 1994). Es wurde festgestellt, dass je nach der Größe des Schadens bei der Infiltration ein Materialeintrag auftreten oder bei der Exfiltration die Bettungsschicht unter dem Kanal beschädigt werden kann. Die Entstehung von Hohlräumen durch Feststofftransfer und die Verschiebung von Feinmaterial können u.a. die Standsicherheit des Kanals gefährden und zu Lageabweichungen und Abflusshindernissen führen. Eine Vielzahl anderer Prozesse und Gegebenheiten können die Sicherheit und Funktionalität im Abwasserableitungssystem beeinträchtigen und zu Schäden bestimmten Ausmaßes verursachen. Darunter gehören zum Beispiel mechanischer Verschleiß (Korrosion), Veränderung der Bettungsbedingungen, Wurzel einwuchs, Betriebsprozesse (Hochdruckreinigung sowie Dichtheitsprüfungen) Verkehrsbelastung, Zwängungsbeanspruchungen, Auftriebskräfte (Grundwasser), Suffusion und falsche Werkstoffwahl (insbesondere bei Übergängen).

Das einfachste Ziel in Hinblick auf den Kanalbau sollte der Einsatz von Materialien sein, die den einwirkenden Beanspruchungen während des Nutzungszeitraums schadlos standhalten. Abwasserleitungen müssen so hergestellt werden, dass diese in dem geforderten Betrachtungszeitraum das Abwasser sicher ableiten und einen geringen Betriebs- und Instandhaltungsaufwand bedürfen. Darüber hinaus ist eine Optimierung von betrieblichen und verfahren-

renstechnischen Maßnahmen zur Verringerung bzw. Vermeidung von schädigenden Prozessen von Bedeutung. Im Vorfeld müssen bei der Materialauswahl bestimmte Überlegungen aufgestellt und Fragen geklärt werden:

- Quantifizierung und Beurteilung der zu erwartenden Einwirkungen
  - Mechanische Einwirkungen (Ungewöhnliche Belastungen insbesondere bei den äußeren Einwirkungen aufgrund großer Tiefenlagen)
  - Äußere Einwirkungen (z.B.: Erddruck: Tiefenlagen bis 35m, Äußerer Wasserdruck: bis 3,5 bar, Großflächige Setzungen (Bergbau)), Innere Einwirkungen (z.B.: innerer Wasserüberdruck Reinigung, Abrasion), Einwirkungen aus Bauzuständen (z.B.: Vortriebskräfte, Zwangskräfte bei Rohrvortrieben, Überschüttung, Lagerung, Art des Verbaus bei offenen Bauweisen, Transport und Lagerung)
  - Chemische Einwirkungen (Vielzahl möglicher Angriffe von innen und außen)
  - Biogene Säurekorrosion (Gutachten: Gefährdung durch BSK ist mit hoher Wahrscheinlichkeit gegeben), Korrosion durch Abwasserinhaltsstoffe, (organische Inhaltsstoffe, z.B. aromatische und halogenierte Kohlenwasserstoffe), Außenkorrosion (Anorganische Substanzen: hauptsächlich Chloride, Sulfate, Organische Substanzen (Altlasten))
- Definition von Beanspruchungsszenarien
- Prüfung und Beurteilung der verschiedenen Rohr- und Korrosionsschutzsysteme
  - Vorauswahl grundsätzlich geeigneter Schutzsysteme wie Hochleistungsbeton, Polymerbeton, GFK, PE-HD, Glas, Steinzeug

Im DWA-Merkblatt 159 sind die essentiellsten Kriterien zur Materialauswahl detailliert erläutert. Dabei werden im Wesentlichen sechs Faktoren genannt. In Abbildung 2 sind die wichtigsten Faktoren zur Materialauswahl schematisch dargestellt. Weiterhin ist dem Merkblatt zu entnehmen, dass für jeden Faktor bzw. jedes Kriterium verschiedene Einzelaspekte genau beschrieben werden. Eine grobe Übersicht dazu liefert Tabelle 13



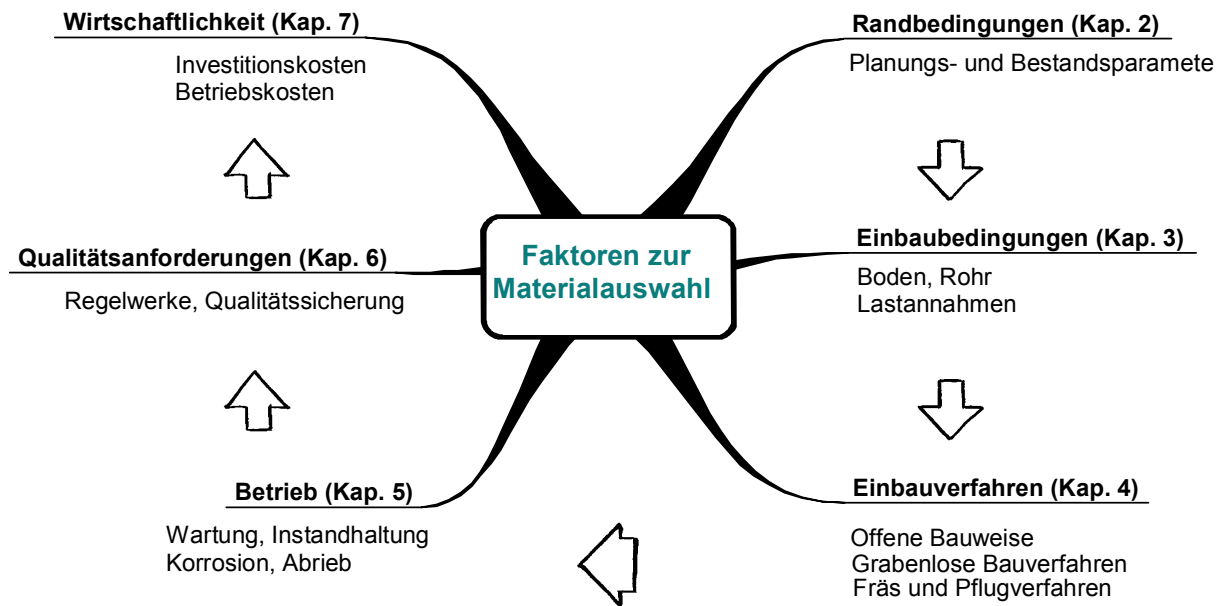


Abbildung 2: Faktoren zur Materialauswahl (DWA-M 159)

Tabelle 13: Zusammenfassung der charakteristischen Unterpunkte der Faktoren zur Materialauswahl

Randbedingungen	Einbaubedingungen	Einbauverfahren
Entwässerungsverfahren	Werkstoffverhalten	Offene Bauweise
Entwässerungssysteme	Boden	
Abwasserzusammensetzung	Bettung	Grabenlose Bauweise - mit eingezogenen Rohren - mit vorgetriebenen Rohren
Wassergewinnungsgebiete	Grabenverbau	
Sohlgefälle und Abfluss	Dynamische Belastung	Fräsverfahren
Tiefenlage	Bodensetzung und Bergsenkung	
Form der Querschnitte	Grundwasser	Pflugverfahren
Kanalverlauf		
Rohrquerschnitt (Begehbarkeit)	Anschluss an Bauwerke	
Anforderungen an Betrieb	Qualitätsanforderungen	Wirtschaftlichkeit
Anschlussmöglichkeiten	Allgemeine Regelwerke (Gütenormen für Beschaffenheit und Eigenschaft des Rohrwerkstoffes und Produktes und Normen für Einbau und den Betrieb)	Investitionskosten (Rohrmaterial, Erdaushub, Wasserhaltung, Rohreinbau, Wiederverfüllung, Wiederherstellung der Oberfläche)
Abriebfestigkeit		
Reinigungsfähigkeit		
Korrosionsbeständigkeit		
Inspizierbarkeit	Anforderungen des Herstellers	Jahres- und Betriebskosten (Personal, Reinigung, Inspektion, Material etc.)
Sanierbarkeit	Qualitätssicherung (Güteschutz Kanalbau)	
Lagerhaltung		

Laut DWA-M 159 ergeben sich aus dem Entwässerungsverfahren unterschiedliche Dimensionierungsansätze und daraus zugeordnete Leitungsquerschnitte. Daraus lassen sich direkte Auswirkungen auf druckunabhängige Bauverfahren und die Wahl des Werkstoffes ableiten. Die Abwasserzusammensetzung und Einleitungen sind bei der Wahl der Werkstoffe zu beachten, speziell wenn Schmutzwasser aus Industrie und Gewerbe eingeleitet wird (DWA-M 159). Darüber hinaus ist bei der Werkstoffauswahl zu berücksichtigen, dass das Sohlgefälle einen entscheidenden Einfluss auf die Bildung von Ablagerungen und auf die Fließgeschwindigkeit hat. In Folge dessen können Rohrmaterialien durch verstärkten Abrieb oder erhöhte Reinigungstätigkeit beeinflusst werden (DWA-M 159). Bestimmte Einbauverfahren können u.a. die Bandbreite der Abmessungen und die Form der Querschnitte limitieren bzw. einschränken. Die Wahl der Leitungsquerschnitte kann durch die Einbeziehung wichtiger Erfordernisse des Kanalbetriebes (z. B. Begehbarkeit) wesentlich beeinflusst werden. Ein wichtiges Standbein für den sicheren Betrieb eines Abwasserleitungssystems ist die Einhaltung von konkret festgelegten Betriebsbedingungen. So müssen Abwasserleitungen und -kanäle während der gesamten Betriebsdauer zur Entfernung von Ablagerungen gereinigt werden. Des Weiteren müssen die Inspizierbarkeit, die Korrosionsbeständigkeit, die Abriebfestigkeit und die Sanierbarkeit gegeben sein. Überlegungen für eine spätere Sanierung, mit einer eventuellen Verringerung des Rohrquerschnittes, sind zu beachten. Hierbei sollte auch überlegt werden, ob durch eine Begehbarkeit generell wirtschaftlichere Bedingungen erzielt werden können (DWA-M 159).

Die Werkstoffkennwerte für die üblichen Rohrmaterialien sind in ATV-DVWK-A 127, Tab. 3, zu finden. Eine grafische Darstellung der allgemeinen Anforderungen an die Werkstoffeigenschaften von Abwasserleitungen ist in Abbildung 3 zu sehen. Sowohl das Rohrmaterial (biegeweich (z. B. PVC, PE, GGG) oder biegesteif (z.B. Steinzeug, Beton)) als auch das Betungsverfahren sollten in Hinblick auf Verformung, Tragfähigkeit und Lastbeanspruchungen auf das Rohr und den Boden im Detail abgestimmt werden.

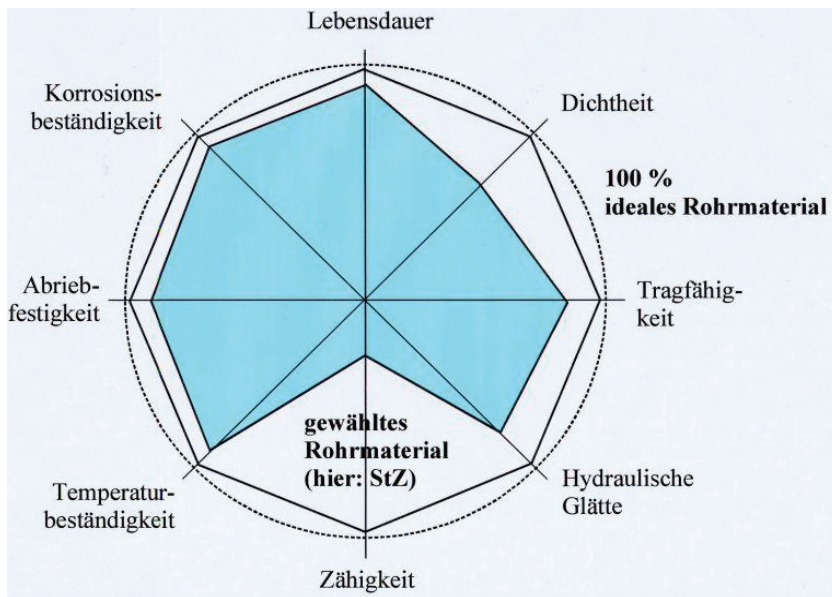


Abbildung 3: Anforderungen an die Werkstoffeigenschaften von Abwasserleitungen (Günther 2005)

Unter Punkt Einbaubedingungen wird u.a. der Teilaspekt Grundwasser als wichtiger Einflussparameter betrachtet. Denn Grundwasser kann bei Rohren zu Auftriebskräften führen. Dicht unter der Erdoberfläche eingebaute Rohre sind insbesondere wegen der geringen Auflast durch Auftrieb besonders gefährdet (DWA-M 159). Neben wirkenden Auftriebskräften durch Grundwasser ist die Suffosion aufgrund der Bodenverlagerungen im Rohrgrabenbereich und den daraus resultierenden Setzungen unerwünscht. Durch konstruktive Maßnahmen, z. B. Querdichtung kann dies vermieden werden. Ein weiterer Punkt welcher im Merkblatt angesprochen wird ist das korrosionschemische Verhalten des Grundwassers und des Bodens, welches bei der Materialauswahl zu berücksichtigen ist.

Nach DWA-M 159 spielen die Einbauverfahren bei der Auswahl des Rohrwerkstoffes eine maßgebliche Rolle. Im Gegensatz zur konventionellen offenen Bauweise (DIN EN 1610) ergeben sich bei anderen Einbautechnologien unter anderem durch die eingesetzte Verfahrenstechnik weitergehende Anforderungen an den Rohrwerkstoff. Eine Übersicht über die verschiedenen Einbauverfahren ist in folgender Grafik zu sehen.

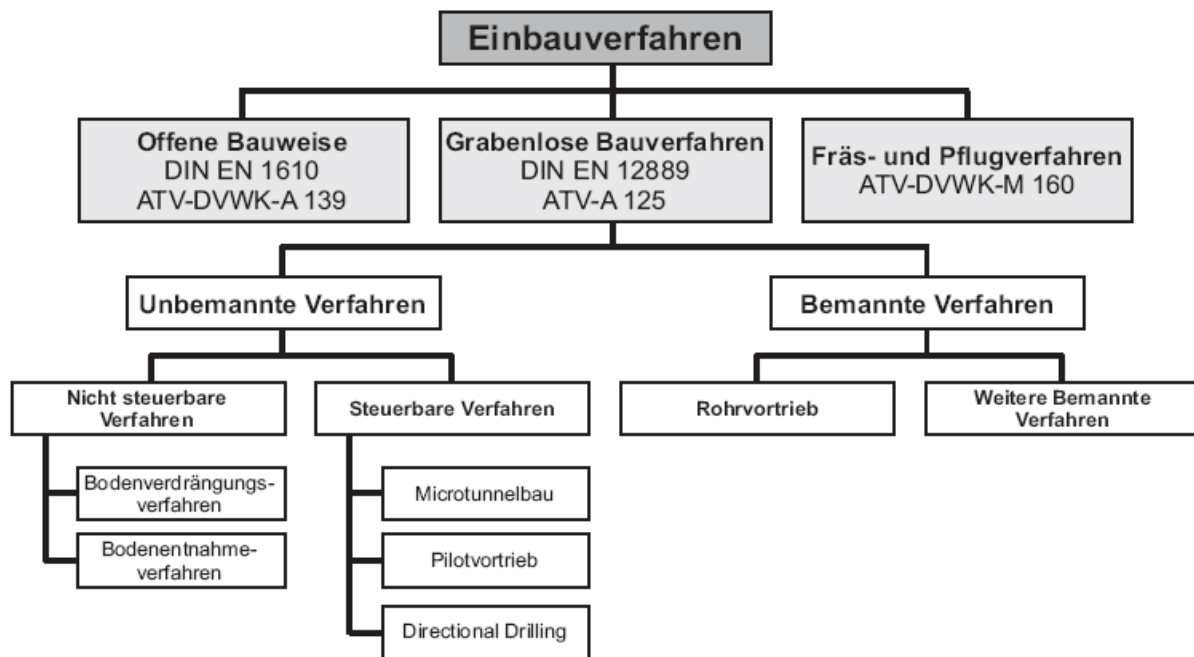


Abbildung 4: Übersicht über die verschiedenen Einbauverfahren im Kanalbau (DWA-M 159)

Abbildung 5 veranschaulicht zum Beispiel die speziellen Anforderungen an einen Rohrwerkstoff unter Einsatz von Fräs- und Pflugverfahren.

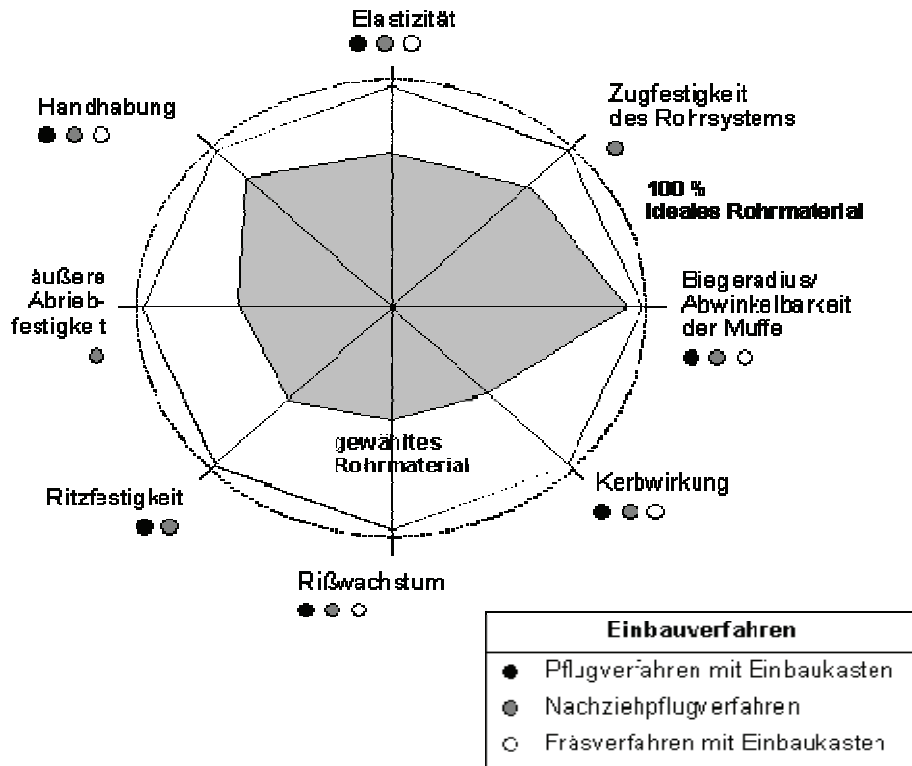


Abbildung 5: speziellen Anforderungen an einen Rohrwerkstoff unter Einsatz von Fräs- und Pflugverfahren (Günthert 2005)

Im Weiteren soll an dieser Stelle nicht näher auf die einzelnen Teilaspekte der sechs o.g. Faktoren zur Materialauswahl eingegangen werden. Die umfassenden Ausführungen zu den Kriterien sind dem DWA Merkblatt 159 zu entnehmen.

In Bezug auf die Festlegung der Kriterien für die Materialauswahl für die Modellierung/Simulation sowie für den späteren Pilotversuch sollten folgende Ziele berücksichtigt werden:

*Erstes Ziel:*

Vorauswahl von grundsätzlich geeigneten Systemen auf Grundlage von recherchierten Informationen zur technischen Anwendbarkeit, zur Beständigkeit und zur Dauerhaftigkeit.

*Zweites Ziel:*

Erfassung der mechanischen und chemischen Widerstandsfähigkeit unter variierten (schwachen bis extremen) mechanischen und chemischen Belastungen bzw. Randbedingungen, Ermittlung von vergleichbaren Ergebnissen für unterschiedlichste Materialien.

*Drittes Ziel:*

Klassifizierung und Bewertung der einzusetzenden Materialien nach bestimmten Kriterien. Die Beständigkeit gegenüber chemischen/mechanische Einwirkungen könnte in Bewertungsklassen eingeteilt werden.

- gering
- mittel
- hoch

Für eine weitere Betrachtung sollten auch Angaben zu der Anfälligkeit im Rahmen des Herstellungsprozesses sowie Informationen zur Sanierungsfähigkeit des eingesetzten Materials berücksichtigt werden. Ein weiterer Punkt, der bei der Versuchsdurchführung eine Rolle spielt, ist das am zu untersuchenden Material angewandte Sanierungsverfahren. Es sollte also eine Klassifizierung nach Art und Umfang der Sanierungsmethode vorgegeben werden. (siehe dazu zum Beispiel Gütezeichen Vergabe nach RSV-Blättern). Ein umfassender Überblick über bekannte Sanierungsverfahren ist u.a. aus folgenden Literaturquellen zu entnehmen.

- Dipl.-Ing. (FH) Jochen Bärreis (2010), Sanierungsverfahren im Abwasserbereich, Lingen/Ems
- Dipl.-Volkw. Horst Zech (2009), Übersicht der Techniken und Erfahrungen in der Kanalsanierung, Horst Zech in 3R international, 10/2009 Lingen Ems

## 4 Themenschwerpunkt Exfiltration

Undichte Kanäle können das Abwasserleitungssystem auf unterschiedliche Art und Weise negativ beeinträchtigen. Darunter gehören unter anderem die Belastung von Böden und Grundwasser. Ein Prozess der im Rahmen dieser Literaturrecherche ebenfalls näher untersucht wird, ist die sogenannte Exfiltration. Im Vordergrund steht hier das Aufzeigen von Untersuchungen zur Abwasserexfiltration aus beschädigten Kanalrohren. Die Betrachtung der Untersuchungen und der messtechnischen Erfassung des Abwasseraustritts bei gegebenen Randbedingungen und variierenden Parametereinstellungen hat das Ziel mögliche Analogieschlüsse zur Infiltration abzuleiten. Die wichtigsten Literaturquellen sind in Tabelle 14 zusammengefasst.

Tabelle 14: Übersicht Literaturquellen zum Themenschwerpunkt Exfiltration

Autor	Literatur
A. Hartmann et al. (1996)	„Untersuchungen von Schäden an öffentlichen Schmutz- und Mischwasserkanälen hinsichtlich der Auswirkung auf Grundwasser und Boden“, Abschlussbericht zum BMFT-Forschungsvorhaben 02 WK 9344/00. Braunschweig.
Jochen Klinger (2007)	„Beschreibung der Wasser- und Stoffflüsse in einem urbanen Raum unter besonderer Berücksichtigung von Kanalleckagen“, (Ex- und Infiltrationsmodell NEIMO (Network Infiltration & Exfiltration Model)), Dissertation an der Universität Karlsruhe
Max Dohmann et al. (1994)	„Untersuchungen zur quantitativen und qualitativen Belastung von Untergrund, Grund- und Oberflächenwasser durch undichte Kanäle“, BMFT-Verbundprojekt „Wassergefährdung durch undichte Kanäle – Erfassung und Bewertung“; Teil 1, Aachen
Max Dohmann et al. (1999)	„Wassergefährdung durch undichte Kanäle – Erfassung und Bewertung“, Berlin: Springer Verlag
Thomas Stegner (1995)	„Modellversuche zur Beurteilung der Grundwassergefährdung durch undichte kommunale Abwasserkanäle“, Diplomarbeit an der Universität Innsbruck

J. Klinger. et al. (2010)	„Defekte Abwasserkanäle – ein Risiko für Boden und Grundwasser? – Untersuchungen zur Quantifizierung und qualitativen Bewertung der Abwasserexfiltration“, Vortrag zum 2. Deutschen Tag der Grundstücksentwässerung in Dortmund
Robert S. Amick, P.E. (2000)	“Exfiltration in Sewer System”, Environmental Quality Management, Inc., National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati
Wolfgang Günther et al. (2001)	„Zerstörungsfreie Dichtheitsprüfung von Grundstücksentwässerungsanlagen“, 74. Mitteilungsheft des Instituts für Wasserwesen, München
Mandy Rutsch et al. (2008)	„Towards a better understanding of sewer exfiltration“, Institute for Urban Water Management, University of Technology Dresden, veröffentlicht in Water Research 42 (2008)
Mandy Rutsch et al. (2006)	“Assessment of sewer leakage by means of exfiltration measurements and modelling tests”, Dissertation an der TU-Dresden

#### 4.1 Allgemeines

Aus einer beschädigten Grundleitung exfiltriert Abwasser, wenn sich die Rohrsohle über dem Grundwasserspiegel befindet. Die Exfiltration von Abwasser aus defekten Kanälen ist abhängig vom Abwasserdurchfluss, der Lage und der Art des Schadens im Kanal, der vertikalen und horizontalen Wasserbewegung im Boden sowie einhergehender Zustandsveränderungen im Kanal (Sielhautwachstum, Ablagerungen) und im Boden in unmittelbarer Nähe zum Schaden (äußere und innere Kolmation) (Günther et al. 2001). Abbildung 6 zeigt ein Abwasserableitungssystem mit verschiedenen Exfiltrationsquellen.

Die Exfiltrationsrate von Schmutzwasser aus einem beschädigten Kanal ist hauptsächlich abhängig (Randbedingungen) von:

- der Schadensart
- der Schadensgröße
- der Lage des Rohrschadens
- den Abflussverhältnissen (Fließtiefe, Feststoffgehalt)
- der Exfiltrationsdauer
- der Bodenart und der Durchlässigkeit des Bodens
- Alter und Material der Halterungen

Weitere Faktoren, die maßgeblich einen Einfluss auf die Exfiltration haben sind die täglich und saisonal schwankende Füllstände im Kanal, mit Auswirkung auf die benetzte Fläche, den hydrostatischen Druck, die Schleppspannung im Kanal und die chemische Zusammensetzung des Abwassers (pH, el. Leitfähigkeit, Temperatur, etc.).

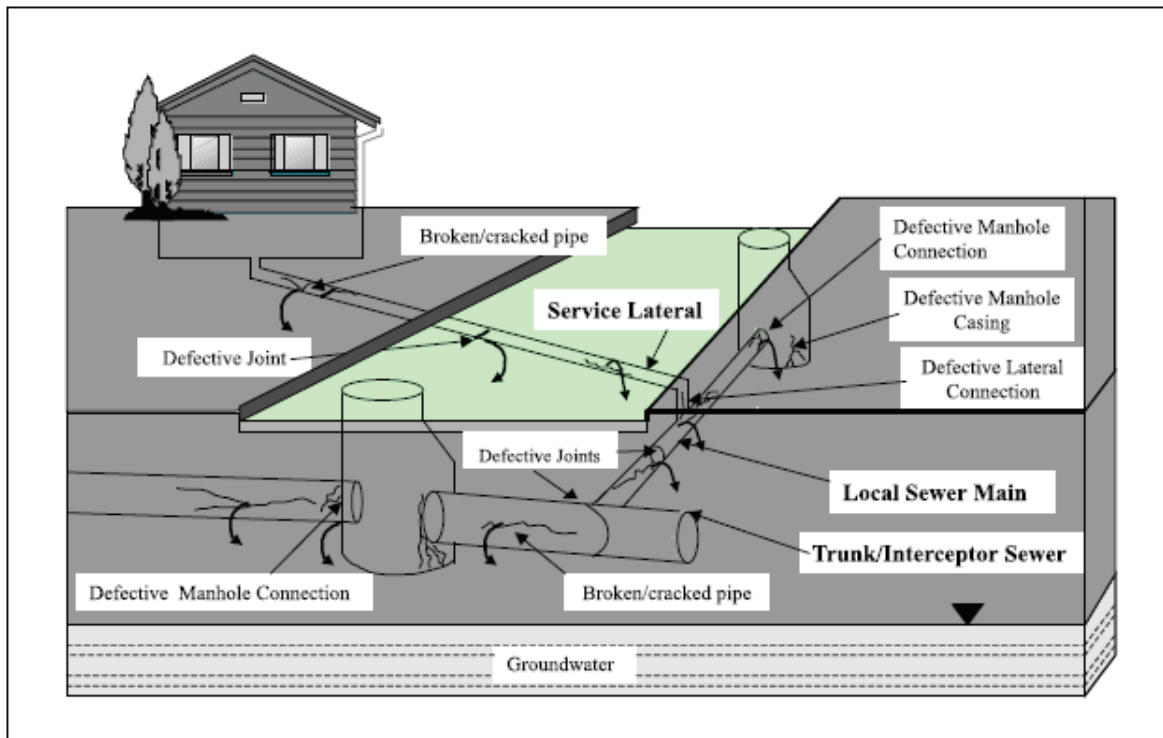


Abbildung 6: Abwasserableitungssystem mit verschiedenen Exfiltrationsquellen (Robert 2000)

Ein maßgeblicher Faktor, welcher die Exfiltration und die exfiltrierende Abwassermenge aus einem Kanal stark beeinflusst, ist die Schadensart. Dieser Aspekt spielt in Hinblick auf den Prozess der Infiltration und dessen modelltechnische Darstellung eine wichtige Rolle. Die Schadensart und Schadensgröße ist somit ein wichtiger Parameter für die spätere modelltechnische Simulation der Infiltration.

Dohmann (1999) führt an, dass das Gefährdungspotential eines Einzelschadens für die Umwelt von der Häufigkeit seines Auftretens, den hydraulischen Bedingungen im Kanal und von der Versickerungskapazität des Bodens abhängig ist. Aus den Ergebnissen der durchgeführten Untersuchungen kann nach Dohmann (1994) folgende Reihenfolge der Schadensarten von Rohren bezüglich ihrer Umweltgefährdung abgeleitet werden:



Tabelle 15: Klassifizierung der Schadensarten nach Umweltgefährdung (Dohmann 1994)

<b>Wertung</b>	<b>Schaden</b>
1	<i>Scherbenbildung</i>
2	<i>Lageabweichung von Rohrverbindungen</i>
3	<i>unsachgemäß angeschlossene Anschlussleitungen</i>
4	<i>Längs- und Querriss</i>
5	<i>Wurzeleinwuchs</i>

In Dohmanns (1994) Untersuchungen werden des Weiteren Zusammenhänge zwischen Exfiltration und Schadensart, Schadenslage, Abflussverhältnisse und Wasserspiegel im Rohr geschildert. So werden Längsrisse während eines ungestörten Abflusses fast vollständig durch die im häuslichen Abwasser enthaltenen Feststoffe abgedichtet (Dohmann 1994). Bei Rohrschäden mit einer größeren Querschnittsfläche (Muffenversatz, Scherben usw.) wird durch die auftretende innere und äußere Kolmation die Abwasserexfiltration zum Teil erheblich reduziert (Dohmann 1994). Die Lage eines Rohrschadens spielt zum Beispiel bei niedrigen Fließtiefen keine Rolle, wenn sich die Schäden im Kämpfer und Scheitelbereich befinden.

Ein weiterer Parameter, welcher die Exfiltration und damit die Exfiltrationsmenge beeinflusst ist die Druckhöhe bzw. der Wasserspiegel des Abwassers im Rohr. Die Druckhöhe ist wiederum abhängig vom Durchfluss, bestimmt durch die Anzahl der angeschlossenen Einwohner, deren Verbrauchergewohnheiten und dem Anteil aus Niederschlagsabfluss. Mitgeführte Feststoffe im Abwasser können sich bei bestimmten Bedingungen (Lage des Rohrschadens, Druckhöhe bzw. Fließtiefe im Kanal) am Rohrschaden festsetzen (äußere Kolmation). An der Schadensstelle findet aufgrund der Druckhöhe im Rohr eine vertikale Wasserbewegung statt. Dies führt dazu, dass Feststoffe in den Untergrund gelangen und in die Poren des Bodens sickern (innere Kolmation). Der Kolmationsprozess führt dazu, dass die Exfiltrationsmenge absinkt und bei längerer Kontaktzeit ein Biofilmwachstum erfolgt. Der Biofilm wiederum trägt dazu bei, dass der Porenraum und die Wasserdurchlässigkeit des Bodens verringert werden, welches zu einem weiteren Rückgang der Exfiltration führt. Dieser Vorgang wird als Selbstdichtung bezeichnet (Hartmann 1996).

Im Wesentlichen sind an der Exfiltration zwei Prozesse beteiligt, welche sich mittels der Gesetze der Hydraulik und der Bodenmechanik relativ gut beschreiben lassen. Zum einen ist das der Wasseraustritt aus einer Öffnung in einen wassergefüllten Hohlkörper und zum anderen

ist es die Bewegung des Wassers im Boden. Bei einer Exfiltration aus dem Rohr kommt es zu verschiedenen Wechselwirkung der Wasserinhaltsstoffe mit dem Untergrund bzw. Boden. Vereinfacht umfasst dies biologische (Stoffumwandlungsprozesse), mechanische (Filterwirkung) sowie chemisch-physikalische Prozesse (Ionenaustausch, Verdünnung). Nach Günthert et al. (2001) ist die Intensität der Prozesse abhängig von der Wassersättigung des Bodens. Des Weiteren können Stoffumsetzungen mit verschiedenen Reaktionsmechanismen stattfinden (Stoffdynamik).

Die vertikale Wasserbewegung (Versickerung, Exfiltration) ist abhängig von den bodenmechanischen Eigenschaften der vorliegenden Bodenart. Die Durchlässigkeit von Böden wird durch den Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  bestimmt. Grobkörnige Böden (Kies, Sand) haben aufgrund der Korngröße und des großen Porenvolumens eine höhere Durchlässigkeit. Feinkörnige, wassergesättigte Böden weisen geringe Porendurchmesser und demzufolge auch eine geringe Durchlässigkeit auf. Feinkörnige, trockene Böden können jedoch eine hohe Wasserdurchlässigkeit aufweisen. Bei schwankenden Grundwasserständen verändert sich dementsprechend die Wasserdurchlässigkeit des Bodens. Die sich aus dem Anfangswassergehalt, der Porengröße und der Durchlässigkeit des Bodens ergebende Versickerungskapazität, ist die maßgebende Größe für die Quantität der Exfiltration (Decker et al. 1995). Die Fließbewegung des exfiltrierten Wassers im Boden ist laminar und kann mit der Gleichung von Darcy mathematisch beschrieben werden:

$$Q_{GW} = k_f \cdot \frac{h}{l} \cdot A_{GW}$$

Darin bedeuten:

$Q_{GW}$  [m<sup>3</sup>/s] Grundwasserdurchfluss

$k_f$  [m/s] Durchlässigkeitsbeiwert

$\frac{h}{l}$  [-] Druckgefälle längs der Stromlinie

$A_{GW}$  [m<sup>2</sup>] Grundwasserquerschnittsfläche

Die Durchlässigkeit des Bodenmaterials und die Dicke der Kolmationsschicht im Bereich der Schadenszone kann in den meisten Fällen nicht angegeben werden. Aufgrund dieser Tatsache und um belastbare Aussagen über die Exfiltration in den Boden machen zu können wird

deshalb in der Regel der Ansatz eines Leakage Faktors  $L$  gewählt. Der Leakage-Faktor beschreibt eine fiktive Kolmationsschicht mit konstanter Dicke und mittlere Durchlässigkeit.

$$L = \frac{k_f}{l}$$

Darin bedeuten:

$L$  [1/s] Leakage Faktor

$l$  [m] Dicke der Kolmationsschicht

Aus der bekannten Darcy-Gleichung kann in Verbindung mit dem Leakage-Faktor eine Funktion zur Bestimmung der Exfiltrationsmenge in Abhängigkeit von der Schadensgröße und der Fließtiefe im Abwasserkanal aufgestellt werden:

$$Q_{\text{ex},h(m)} = A_{\text{ex}} \cdot h_{h(m)} \cdot L$$

Darin bedeuten:

$Q_{\text{ex},h(m)}$  [l/s] Exfiltrationsmenge

$A_{\text{ex}}$  [mm<sup>2</sup>] Fläche des Rohrschadens

$h_{h(m)}$  [mm] Fließtiefe im Abwasserkanal

Abbildung 7 veranschaulicht den Modellansatz der Exfiltration und illustriert die Exfiltration eines schadhaften Rohres in den Untergrund.

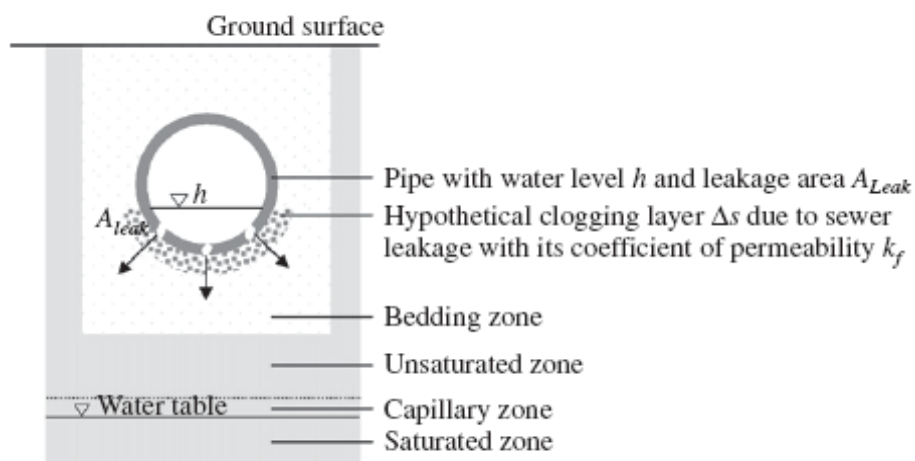


Abbildung 7: Prinzip der Exfiltration (Rutsch 2008)

## 4.2 Untersuchungen zur Exfiltration

Im Rahmen der Literaturrecherche dieses Teilprojekts wurden verschiedene Untersuchungen zur Exfiltration gesichtet. Dabei unterscheiden sich diese meistens in Ihrer Zielstellung sowie in den Parametervariationen wie Bodenart, Schadensart, Grundwasserspiegel. Dennoch liegt der Schwerpunkt bei vielen Untersuchungen in der Quantifizierung der Abwasserexfiltration aus undichten Kanälen. Insbesondere die quantitative Messung bzw. Bestimmung von Exfiltrationsraten bei gegebenen Randbedingungen spielt hier eine wichtige Rolle. Die Messungen und Werte sollen einen Eindruck über die Größenordnung von möglichen Exfiltrationsraten bei Vorliegen bestimmter Einflussparameter vermitteln.

Untersuchungen zur tatsächlich aus einem Rohrschaden exfiltrierenden Abwassermenge sind unter anderem in der Literatur von Dohmann (1999) und Stegner (1995) zu finden. Aus diesen Untersuchungsergebnissen werden Leakage Faktoren für drei konkrete Bodengruppen abgeleitet. Somit ist es möglich bei bekannter Schadensgröße und Bodenart die Exfiltration von Abwasser aus einem Rohrschaden für limitierende Vorgaben zu berechnen. Zur Festlegung der Grenzen möglicher Exfiltrationsraten in Abhängigkeit von der Bodenart und der Durchlässigkeit des Bodens wurde der minimale und maximale Leakage Faktor L aus den Untersuchungsergebnissen von Dohmann (1994) und Stegner (1995) bestimmt. Diese sind in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 16: Untersuchungsergebnisse zur Bestimmung des Leakage Faktors (Günthert et al. 2001)

<b>Autor</b>	<b>DOHMANN (1994)</b>		<b>STEGNER (1995)</b>	
<b>min L [1/s]</b>	0,0001		0,001	
	<i>Bodenart:</i>	<i>Feinsand (S, f)</i>	<i>Bodenart:</i>	<i>Grobsand (S, g)</i>
	<i>Durchlässigkeit k<sub>f</sub> (m/s):</i>	$5,7 \cdot 10^{-4}$	<i>Durchlässigkeit k<sub>f</sub> (m/s):</i>	$4 \cdot 10^{-3}$
<b>max L [1/s]</b>	0,0003		0,01	
	<i>Bodenart:</i>	<i>Feinsand (S, f)</i>	<i>Bodenart:</i>	<i>Grobkies (G, g)</i>
	<i>Durchlässigkeit k<sub>f</sub> (m/s):</i>	$5,7 \cdot 10^{-4}$	<i>Durchlässigkeit k<sub>f</sub> (m/s):</i>	$1,75 \cdot 10^{-1}$
<b>Anmerkungen</b>	<i>Sohllängsriss</i>		<i>lokal begrenzter Schaden</i> $15 \text{ cm}^2 \leq A \leq 30 \text{ cm}^2$	

Aus den Werten der Tabelle kann eine Berechnung möglicher Exfiltrationsraten in Abhängigkeit von der Bodenart, der Fließtiefe und der Schadensgröße erfolgen. In nachstehender Tabelle sind Bodenarten und deren korrespondierende Leakage Faktoren L zusammengestellt.

Tabelle 17: *Bodenarten und deren korrespondierende Leakage Faktoren (Günthert et al. 2001)*

<b>Bodenart</b>	<b>Leakage Faktor L</b>
Ton (T) – Feinsand (S, f)	0 – 0,0003
Feinsand (S, f) - Grobsand (S, g)	0,0003 – 0,001
Grobsand (S, g) - Grobkies (G, g)	0,001 – 0,01

Im Nachfolgenden werden die wichtigsten Untersuchungen zur Exfiltration kurz angeführt. Weitere Details sind den entsprechende Literaturquellen zu entnehmen. Die hier aufgezeigten Untersuchungen sind im 74. Mitteilungsheft des Institutes für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr (F:W. Günthert, G. Walther; „Zerstörungsfreie Dichtheitsprüfung von Grundstücksentwässerungsleitungen“) beschrieben. Tabelle 18 aus Klinger (2007) listet auszugsweise die ermittelten Exfiltrationsraten einzelner Untersuchungen auf.

Tabelle 18: *Übersicht von ermittelten Exfiltrationsraten einzelner Untersuchungen (Klinger 2007)*

Studie	Ansatz	Haltungslänge, Schadensart	Exfiltrationsmenge	Untersuchungs-Standort
Vollertsen & Hitved-Jacobsen 2003	Direkte Exfiltrationsmessung	Schadensfläche 18 cm <sup>2</sup>	0,3-0,8 l/d	Freijeiv, Dänemark
Fuchs et al. 2004	Direkte Exfiltrationsmessung	Schadensfläche: 5,6 cm <sup>2</sup>	1,3-3,0 l/d	Karlsruhe
Hoffmann & Lerner 1992	geschätzt	-	0,012 l/(s·km)	Deutschland
Härig 1991	Statistisch ermittelt, Massenbilanz	Kanalnetzlänge: 1320 km	0,2-0,3 l/(s·km)	Hannover
Dohmann et al. 1999	Geschätzte Exfiltration, Mischsystem	-	0,05 l/(s·km)	Deutschland
Gruenfeld 2000	Massenbilanz Trinkwasser-Abwasser	Kanalnetzlänge: 107 km	2 l/(s·km)	USA
Blackwood et al. 2005	Hochrechnung von Ergebnissen am Einzelschaden	-	2 l/(s·km)	Schottland
Rieckermann & Gujer 2002	Tracereingabe NaCl, Massenbilanz	Kanalnetzlänge: 2 km	~0,875 l/(s·km)	Schweiz
Rueedi et al. 2005	Massenbilanz	-	0,07-0,12 l/(s·km)	Doncaster, UK
Wolf & Hoetzel 2006	Monte Carlo Simulation	Kanalnetzlänge: 2,81 km	0,0106-0,1638 l/(s·km)	Rastatt
Wolf 2006	Monte Carlo Simulation	Stadtgebiet Rastatt	0,002 l/(s·km)	Rastatt

Die Schwierigkeit der Vergleichbarkeit begründet sich durch die jeweils gewählte räumliche Skala der durchgeführten Versuche. Direkte Exfiltrationsmessungen am Einzelschaden geben die Exfiltrationsmengen in Liter pro Tag an, während Massenbilanzen oder statistische Verfahren die Austrittsmengen auf die Länge des betrachteten Kanalnetzes beziehen und die Mengen in Liter pro Meter und Zeiteinheit angeben (Klinger 2007). Da die Prozesse der Exfiltration von zahlreichen lokalspezifischen Einflussfaktoren abhängig sind, ist es kaum möglich eine definierte Austrittsmenge pro Schaden anzugeben. Nach Klinger (2007) sind für die Bewertung eines urbanen Systems hinsichtlich einer Umweltgefährdung bzw. eine der nachhaltigen Beeinflussung der Grundwasserqualität durch defekte Abwasserkanäle, jeweils direkte Messungen im Untersuchungsgebiet durchzuführen. Angaben zu einer flächenbezogenen Exfiltrationsrate würden in Verbindung mit bekannten Schadensflächen aus Kamera-Zustandsbefahrungen grundlegende Datensätze zur Abschätzung der Exfiltrationsmengen aus defekten Abwasserkanälen liefern (Klinger 2007).

#### 4.2.1 Untersuchungen in Aachen

An der RWTH Aachen wurden Labor- und Feldversuche zur quantitativen Ermittlung der aus undichten Abwasserkanälen exfiltrierten Abwassermenge, durchgeführt (Dohmann 1994), (Decker et al. 1995), (Decker, 1997). Erfasst und gemessen wurde die Exfiltrationsmenge von Reinwasser aus einem Rohr ohne und mit Bettung, von Abwasser aus einem Rohr mit konkreter Schadensgröße und an einem real beschädigten Rohr. Die Randbedingungen für die jeweiligen Versuche sind in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 19: Zusammenstellung der Versuchsparameter nach (Dohmann 1994)

Größe	Untersuchung 1	Untersuchung 2	Untersuchung 3
Rohr	DN 200	DN 200	DN 200, DN 300
Fluid	Reinwasser	Reinwasser	Abwasser
Bettungsmaterial (U, $k_f$ )	ohne	Sand (SE; U=3,1; $k_f=5,7 \cdot 10^{-4}$ m/s)	Sand (SE; U=3,1; $k_f=5,7 \cdot 10^{-4}$ m/s)
Rissbreite	1 – 4 mm	4 mm	1 – 4 mm
Füllhöhe	1/4-, 1/2-, 3/4- und Vollerfüllung		

Die Untersuchungen der Exfiltrationsrate von Reinwasser aus einem nicht gebetteten Rohr mit definiertem Schaden ergaben, dass diese von der Rissbreite und der Druckhöhe abhängt. Mit

steigender Druckhöhe und größer werdender Rissbreite nahm die Exfiltrationsrate exponentiell zu (Günthert et al. 2001)

Mit einer Sandbettung war die Exfiltration einer zeitlichen Änderung unterworfen. Das Maximum der Exfiltrationsmenge wurde in den ersten 20 Minuten beobachtet, und fiel innerhalb weniger Stunden stark ab (Günthert et al. 2001). Ursache hierfür war eine Verringerung der Durchlässigkeit des Bodens aufgrund der Umlagerung von Feinkorn in die vorhandenen Poren. Eine zeitlich begrenzte Veränderung der Fließtiefe hatte keinen Einfluss auf die sich mit der Zeit einstellende Exfiltrationsrate (Günthert et al. 2001). Die Exfiltrationsrate stieg zwar bei einer Druckerhöhung kurzzeitig an, fiel aber innerhalb von einem Tag wieder auf die ursprüngliche Rate ab. Der zeitliche Verlauf der Exfiltrationsmessung mit Reinwasser unter veränderlichen Druckhöhen ist in folgender Grafik zu sehen.

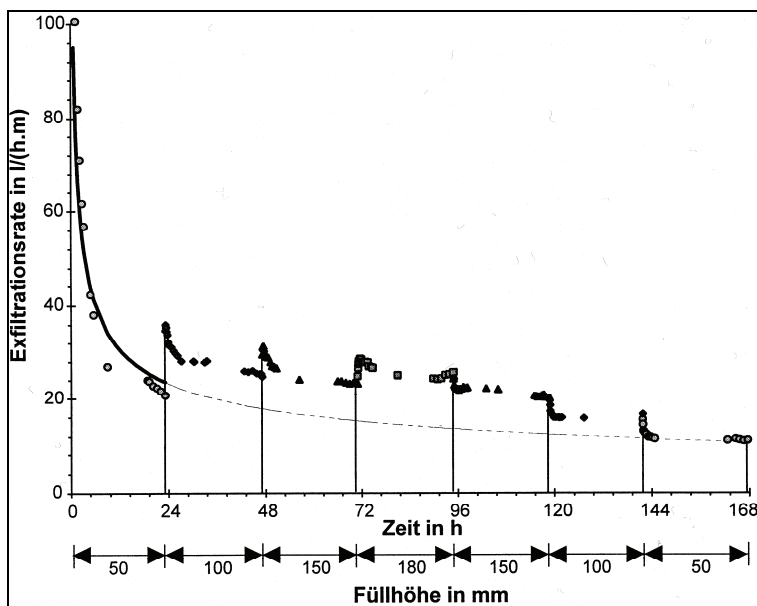


Abbildung 8: Verlauf einer Exfiltrationsmessung mit Reinwasser an einem gebetteten Rohr (Dohmann 1994)

Die Untersuchungen mit Abwasser unterschieden sich von denen mit Reinwasser in der Höhe der Absolutmenge und dem zeitlichen Verlauf der Exfiltration (Günthert et al. 2001). Die Exfiltrationsrate war wesentlich niedriger. Bei dieser Versuchsreihe wurde auch die Füllhöhe im Kanal verändert (Günthert) et al. 2001). Die Ergebnisse waren analog zu den Versuchen mit Reinwasser und sind in folgendem Bild dargestellt.

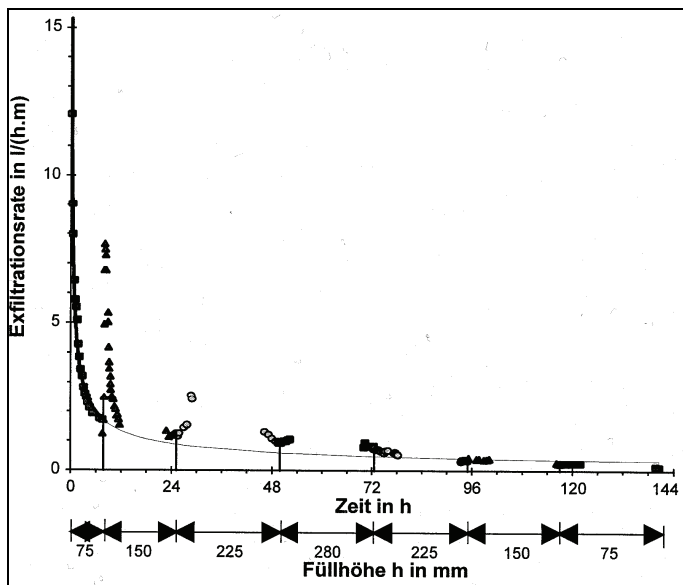


Abbildung 9: Verlauf einer Exfiltrationsmessung mit Abwasser an einem eingebetteten Rohr (Dohmann 1994)

Die im Abwasser vorhandenen Feststoffpartikel setzten sich im Rohrschaden fest und reduzierten dadurch den Schadensquerschnitt. Durch Gefügeumlagerungen im Boden und auftretender innerer Kolmation kam es zu einer Querschnittsreduzierung der Sickerporen und damit zu einer Verringerung der Durchlässigkeit des Bodens. Die gemessenen Endwerte nach 24 Stunden sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

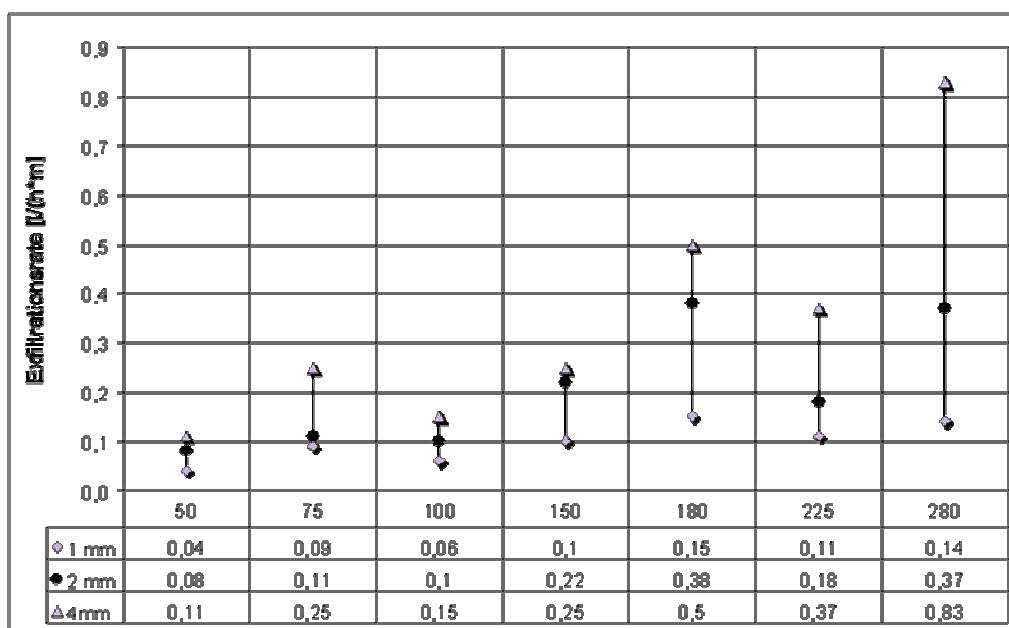


Abbildung 10: 24-h Werte der Abwasserexfiltration (Dohmann 1994)



Die Messwerte können auf den Leakage Faktor L umgerechnet werden. Dieser ist in nachstehender Tabelle als Minimum, Mittelwert und Maximum der festgestellten Exfiltrationsraten angegeben.

Tabelle 20: Berechnung des Leakage Faktor L (Dohmann 1994)

Leakage Faktor L [1/s]	
Minimum	0,0001042
Mittelwert	0,0001851
Maximum	0,0003333

In-situ Messungen der Exfiltration von kommunalem Abwasser an einer Großversuchsanlage zeigten, dass eine messbare Exfiltration erst ab einer Druckhöhe von 150 mm, entsprechend einer Halbfüllung des Rohres auftrat. In folgender Grafik ist dafür beispielhaft die Exfiltration aus einem Steinzeugrohr DN 300 mit Scherbenbruch dargestellt.

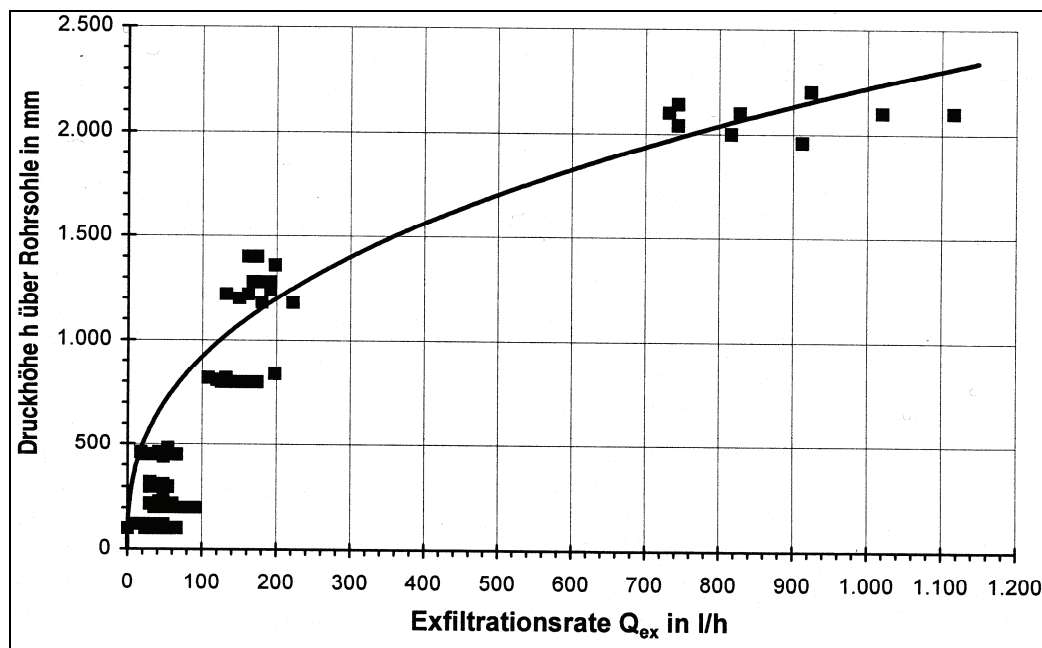


Abbildung 11: Exfiltrationsrate einer undichten Rohrverbindung im nicht bindigen Boden (Dohmann 1994)

Die Exfiltration stieg zuerst langsam und dann linear an. Dies war auf eine temporäre Abdichtung zurückzuführen, die nach einer Drucksteigerung aufbrach und so zu einer höheren Abwassermenge führte, die ins Erdreich exfiltrierte. Während einer Versuchsdauer von 200 Tagen wurde bei einer Muffendichtung ein sich wiederholendes Aufbrechen und Abdichten des

Schadenquerschnitts, entsprechend den hydraulischen Verhältnissen im Kanal beobachtet (Hartmann 1996). Eine vollständige Abdichtung des Systems erfolgte nicht.

Kanäle, die im Schwankungsbereich des Grundwassers liegen, weisen demnach eine höhere Exfiltrationsrate auf. Die in die Poren des Bodens eingesickerten Feinteile werden bei sich ändernden Grundwasserständen ausgespült. Dadurch wird die Durchlässigkeit des Bodens erhöht (Günthert et al. 2001).

#### 4.2.2 Untersuchungen in Innsbruck

An der Universität Innsbruck wurden ebenfalls Messungen zur Exfiltration von Abwasser an mehreren Modellen durchgeführt (Rauch und Stegner 1994), (Stegner 1995). Dabei wurden der Rohrdurchmesser von 50 mm bis 500 mm, der Durchfluss von 0,3 bis 4,0 l/s, die Fließtiefe von 20 bis 120 mm und der Feststoffgehalt von 2 bis 14 ml/l variiert. Darüber hinaus wurden die Bettungsmaterialien verändert. Tabelle zeigt die verwendeten Bettungsmaterialien.

*Tabelle 21: Zusammenstellung der verwendeten Bettungsmaterialien (Günthert et al. 2001)*

Boden	Quarzsand (0/3)	Quarzsand (1/4)	Kalkschotter (0/3)	Kalkschotter (1/4)
Bezeichnung	ZE 30	SG 1-4	P 2-4	P 4-8
Ungleichförmigkeit U	1,86	1,77	1,65	1,47
Durchlässigkeit $k_f$	$4 \cdot 10^{-3}$ m/s	$6 \cdot 10^{-3}$ m/s	$5,8 \cdot 10^{-2}$ m/s	$1,75 \cdot 10^{-1}$ m/s

In den Untersuchungen mit kommunalem Abwasser wurde die Exfiltrationsrate pro Zeiteinheit und in Abhängigkeit vom Bettungsmaterial, dem Feststoffgehalt, der Fließtiefe, der Fließgeschwindigkeit und der Schadensgröße ermittelt. Die Untersuchungen verdeutlichen die Abhängigkeit der Exfiltrationsrate von der Durchlässigkeit der Bettungsschicht. Zu Beginn der Messungen war die Exfiltrationsrate relativ hoch, wobei diese bei durchlässigeren Böden stärker ausgeprägt war als bei Böden mit einem niedrigeren Durchlässigkeitsbeiwert (Günthert et al. 2001). Die Exfiltration nahm mit der Zeit kontinuierlich ab, bis sich nach ca. einer Stunde ein Gleichgewicht eingestellt (Günthert et al. 2001). Folgende Abbildung zeigt die ermittelten Messergebnisse in Abhängigkeit von der Zeit und dem verwendeten Bettungsmaterial.

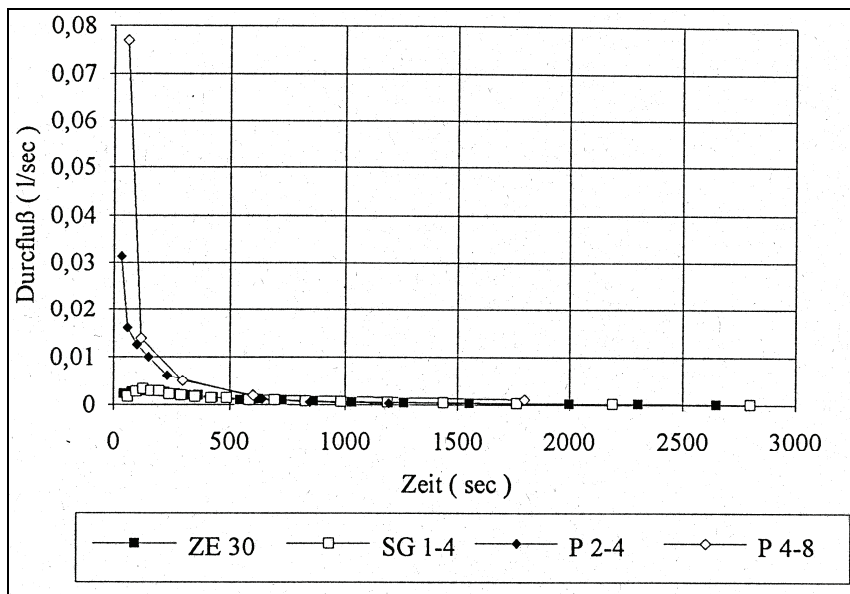


Abbildung 12: Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Exfiltration bei unterschiedlichen Böden (Stegner 1995)

Untersuchungen mit variierenden Feststoffgehalten zeigten eine deutliche Abhängigkeit der Menge des exfiltrierten Abwassers vom Feststoffgehalt. Je weniger Feststoffe im Abwasser enthalten waren, umso mehr Abwasser wurde in den Boden exfiltriert (Günthert et al. 2001). Der Zeitverlauf für die Ausbildung einer exfiltrationshemmenden Kolmationschicht ist abhängig vom Feststoffgehalt (siehe Abbildung 13).

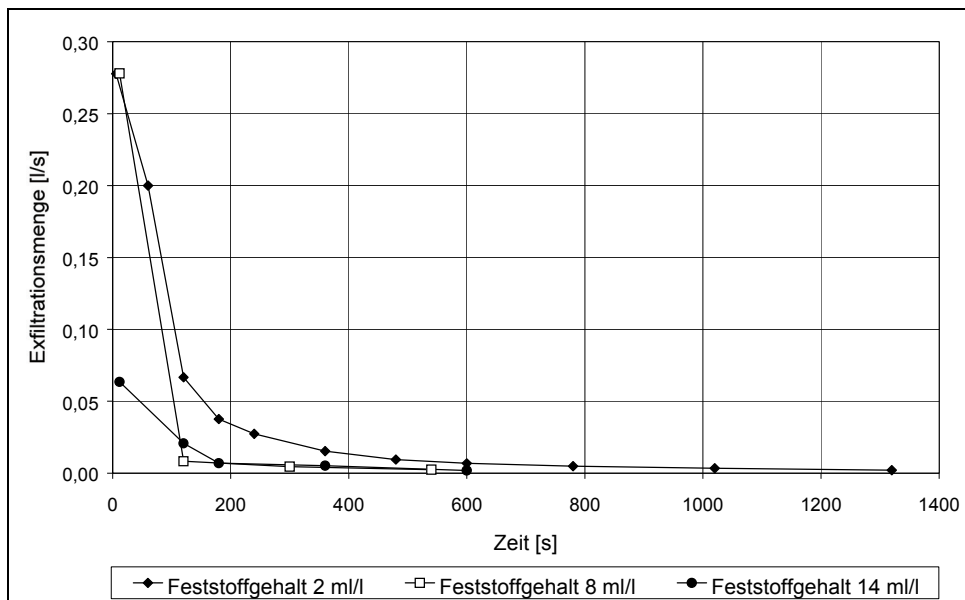


Abbildung 13: Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Exfiltration bei unterschiedlichen Feststoffgehalten (Stegner 1995)

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen zeigten u.a. keinen Einfluss der Fließtiefe des Abwassers im Rohr im Bereich von 0 bis 12 cm auf die Exfiltrationsmenge auf. Diese Aussage ist auf die Praxis nur übertragbar, wenn vergleichbare Bedingungen (Fließtiefe, Feststoffgehalt, Rohrbettung) vorherrschen (Günthert et al. 2001). Generell kann aber behauptet werden, dass die Fließtiefe abhängig von der Fließgeschwindigkeit ist. Die Untersuchungen zeigten, dass eine Erhöhung der Geschwindigkeit, korrespondierend der eingestellten Fließtiefe, die Ausbildung einer Kolmation nicht beeinträchtigte. Die Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Exfiltration bei unterschiedlichen Fließtiefen ist in Abbildung 14 zusehen. Das Gleichgewicht der Exfiltrationsrate ist jedoch bei einer geringeren Fließtiefe zeitlich früher eingestellt (Günthert et al. 2001).

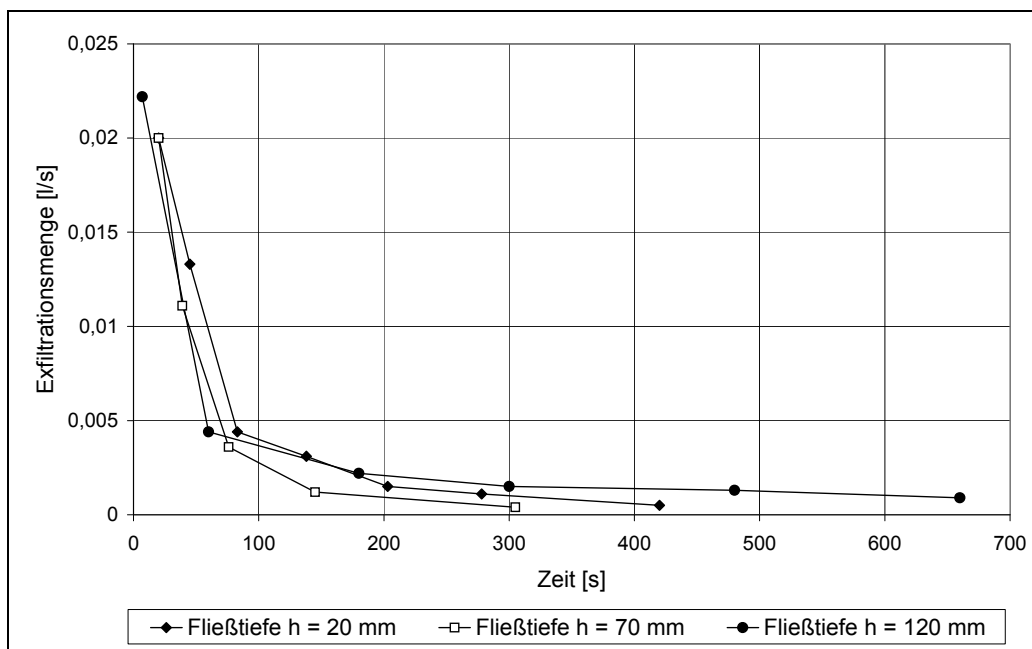


Abbildung 14: Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Exfiltration bei unterschiedlichen Fließtiefen nach (Stegner 1995)

Die Auswertung der Messergebnisse nach dem Leakage Faktor L ergaben, dass der Rückgang der Exfiltrationsrate bzw. des Leakage Faktors L im zeitlichen Verlauf, vom Feststoffgehalt im Abwasser und von der Durchlässigkeit der umgebenden Bodenschicht abhängt. (Günthert et al. 2001)

### 4.2.3 Untersuchungen in Rastatt

Die Untersuchungen zur Exfiltration in Rastatt wurden an einer Teststrecke mit einem aktiven Schmutzwasserkanal im laufenden Betrieb durchgeführt. Für die quantitative und hydrochemische Bewertung der räumlichen und zeitlichen Variationen in Boden- und Sickerwasser wurde ein Leck definierter Größe und Lage künstlich geschaffen (Klinger 2010).

Das anfallende Schmutzwasser des Wohnviertels Münchfeld wird über einen Abwassersammler in der Kehler Straße abgeleitet. In diesem Bereich wurde der Schmutzwasserkanal (DN freigelegt. An zwei Stellen (Abstand voneinander 1m) wurde ein Schadensbild (quer zur Fließrichtung) vergleichbar mit einem Lageversatz konstruiert, Leck 1 mit 120 cm<sup>2</sup> und Leck 2 mit 70 cm<sup>2</sup>. Der detaillierte Aufbau der Versuchstrecke ist der entsprechenden Literaturquelle zu entnehmen. (Klinger 2010): „Defekte Abwasserkanäle – ein Risiko für Boden und Grundwasser? – Untersuchungen zur Quantifizierung und qualitativen Bewertung der Abwasserexfiltration“, Vortrag zum 2. Deutschen Tag der Grundstücksentwässerung in Dortmund. Das Monitoring der Exfiltration erfolgte über einen Zeitraum von insgesamt 882 Tage vom 22.07.2004 bis zum 20.12.2006 (siehe Abbildung 15).

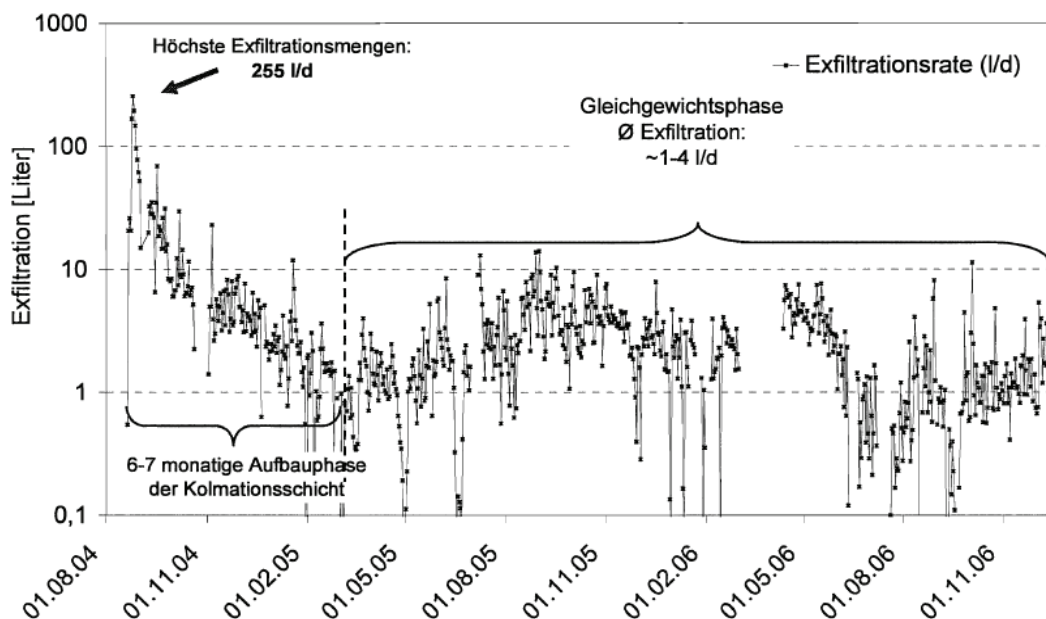


Abbildung 15: Aufzeichnung der Exfiltrationsmessungen in Rastatt (Klinger 2010)

Die Exfiltrationsraten über die gesamte Versuchslaufzeit sind in Abbildung 16 zusammengefasst.

	Anzahl Versuchstage (Start am 22.07.2004)		Exfiltration		
	Dauer (Tagen)	Tage pro Phase	Min. [l/d]	Max. [l/d]	Mittelwert [l/d]
Einlaufphase	0 - 194	194	0,54	255,79	15,02
GGW-Phase	194 - 882	688	0,10	14,01	2,45

Abbildung 16: ermittelte Exfiltrationsraten über die gesamte Versuchslaufzeit (Klinger 2010)

#### 4.2.4 Untersuchungen an der Universität der Bundeswehr München

Zur Berechnung von zulässigen Wasserverlusten bei der Dichtheitsprüfung mit Freispiegelabfluss für Leitungen in der ungesättigten Bodenzone unter Einbeziehung der Umweltverträglichkeit wurde ein Ansatz gewählt, der die Verdünnung von im exfiltrierten häuslichem Schmutz- und Mischwasser enthaltenen Stoffe mit versickertem Niederschlagswasser betrachtet (Günthert et al. 2001). Mit Hilfe diesen Verdünnungsansatzes wurde unter Berücksichtigung zulässiger Stoffkonzentrationen beim Eintritt in den Grundwasserleiter, eine Funktion abgeleitet, mit der zulässige messbare Exfiltrationsraten berechnet werden können (Günthert et al. 2001). Der Berechnungsansatz ist in folgender Abbildung schematisch dargestellt.

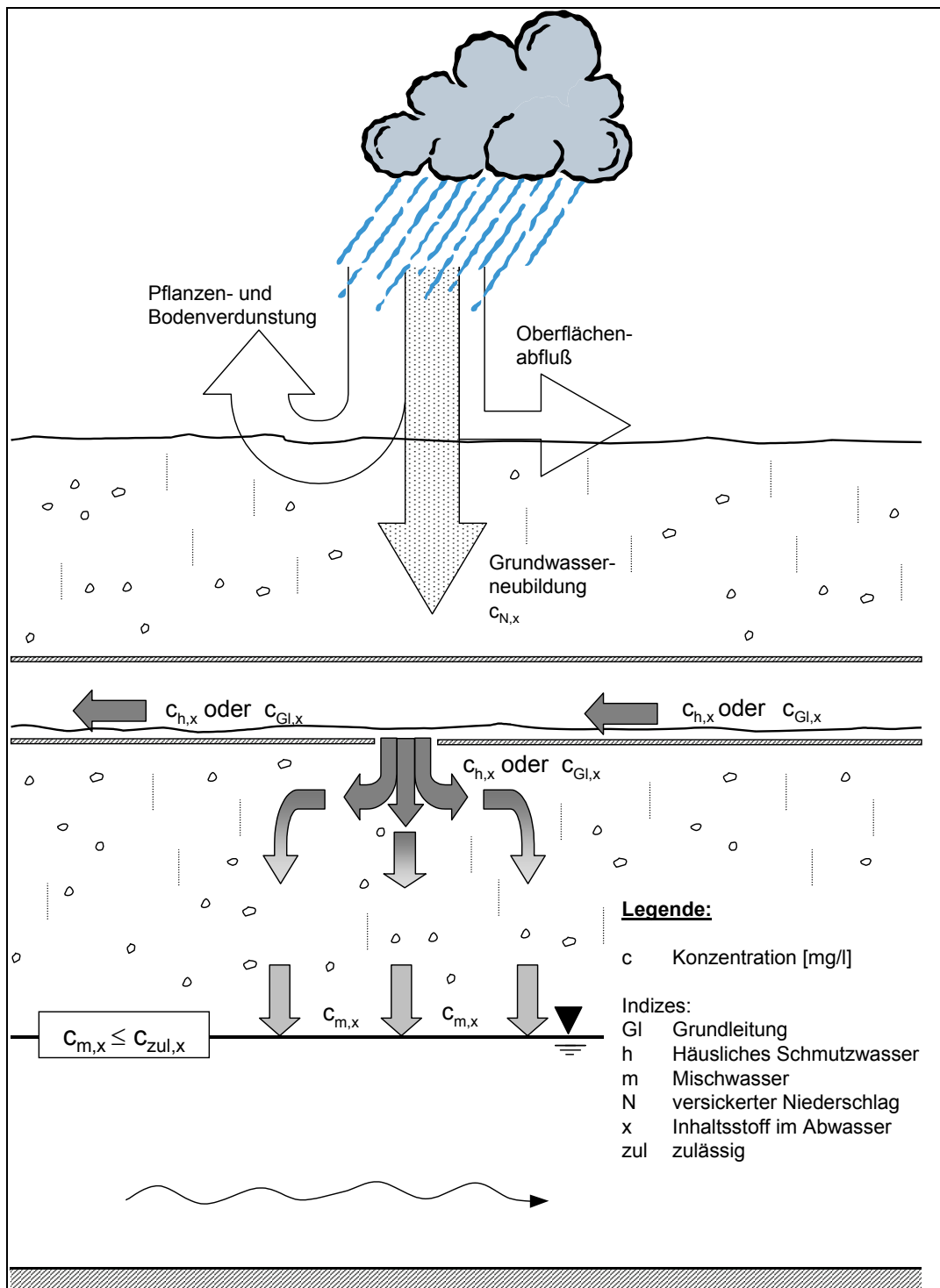


Abbildung 17: Vermischung von exfiltriertem Abwasser mit versickerndem Regenwasser (Günther et al. 2001)

Der entwickelte Berechnungsansatz der zulässigen messbaren Exfiltrationsrate pro Meter Grundleitung wird mit folgender Gleichung beschrieben:

$$Q_{M,zul,x} = \frac{h_M}{h_h} \cdot \frac{Q_{ex,h,x}}{l_{Gl}} \left[ \frac{l}{s \cdot m} \right]$$

Darin bedeuten:

$Q_{M,zul,x}$	[l/(s·m)]	zulässige gemessene Exfiltrationsrate pro Meter Grundleitung
$h_M$	[mm]	Fließtiefe in der Grundleitung während der Prüfung
$h_h$	[mm]	Fließtiefe in der Grundleitung durch Abfluss des häuslichen Abwassers nach Prandtl-Colebrook mit $k_b=1,0$ mm, $T=10^\circ\text{C}$ und $I_e=1/DN$
$l_{Gl}$	[m]	mittlere Länge der Grundleitung

mit:

$Q_{ex,h,x}$	[mg/l]	zulässige Exfiltrationsrate von häuslichem Schmutzwasser für einen Abwasserinhaltsstoff x
--------------	--------	---

Als Berechnungsgrundlage dienten Literaturdaten für bestimmte Stoffkonzentrationen im häuslichen Abwasser und im Dachabfluss sowie für Stoffumsetzungen und Eliminationsraten während der Bodenpassage (Günthert et al. 2001). Des Weiteren wurden über statistische Angaben die Einwohnerzahl, die Anzahl der Grundleitungen, die mittlere Grundleitungslänge und Flächengrößen erhoben (Günthert et al. 2001). Zusätzlich wurden für die Berechnungen die Grundwasserneubildungshöhen benötigt.



## 5 Themenschwerpunkt Infiltration

Auch bei der Bearbeitung des Themenschwerpunktes Infiltration wurden verschiedene relevante Literaturquellen betrachtet und nach belastbaren Aussagen in Hinblick auf die modelltechnische Umsetzung der Quantifizierung der Infiltration überprüft. Es konnte festgestellt werden, dass nur vereinzelt Untersuchungen zur Quantifizierung der Grundwasserinfiltration durchgeführt wurden. Laut Hennerkes (2006) bereitet eine differenzierte Quantifizierung des durch Undichtigkeiten in kommunale Kanäle und private Leitungen gelangenden Grundwassers sowie des durch Dränagen eingeleiteten Grundwassers in der Praxis enorme Schwierigkeiten. Die eingeleiteten Grundwassermengen sind notwendig für eine Beurteilung der Sanierungsprioritäten bzw. die Festlegung eines geeigneten Fremdwasserreduzierungskonzeptes. Die Ermittlung von Infiltrationsraten ist wesentlicher Bestandteil der meisten Untersuchungen. Wobei hier festgehalten werden muss, dass nicht alle Versuche bzw. Untersuchungen einen ganzheitlichen Zusammenhang aller relevanten Einflussparameter zur Größenordnung der Infiltrationsrate herstellen können. Die wichtigsten Arbeiten, Untersuchungen und Ansätze zur Bestimmung und Beschreibung der Infiltration sind in folgender Literaturtabelle angeführt.

Tabelle 22: Übersicht Literaturquellen zum Themenschwerpunkt Infiltration

Autor	Literatur
Christian Karpf, Torsten Franz, Peter Krebs (2007)	„Fractionation of Infiltration and Inflow (I/I) components in urban sewer systems with regression analysis“, Dresden University of Technology
Decker, J. (1998)	„Auswirkungen von Fremdwasser auf Abwasseranlagen und Gewässer“, Dissertation am Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, GWA-Band 168,
Dohmann, M. et al. (1999)	„Wassergefährdung durch undichte Kanäle – Erfassung und Bewertung“, Berlin: Springer Verlag

EPA (2003):	Regional infiltration / inflow control program, King County - Department of natural resources and parks, US Environmental Protection Agency, Washington, USA
Franz T. (2007)	“Spatial classification methods for efficient infiltration measurements and transfer of measuring results”, Dissertation, Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft, TU Dresden. Dresdner Bericht 28
Hennerkes, J. (2006 )	„Reduzierung von Fremdwasser bei der Abwasserentsorgung“, Aachener Schriften zur Stadtentwässerung, Band 10, Aachen
Jochen Klinger (2007)	„Beschreibung der Wasser- und Stoffflüsse in einem urbanen Raum unter besonderer Berücksichtigung von Kanalleckagen“, (Ex- und Infiltrationsmodell NEIMO (Network Infiltration & Exfiltration Model)), Dissertation an der Universität Karlsruhe
Karp, C., Krebs, P. (2004)	“Sewers as drainage systems – quantification of groundwater infiltration”, Dresden University of Technology
Prigiobbe, V. (2005)	“Assessment of infiltration and exfiltration in urban sewer systems: Experimental design for the application of new methods,” Dissertation, Università degli Studi di Roma Tor Vergata in Verbindung mit IRSA-CNR, Rom, Italien
APUSS (2005)	“Assessing Infiltration and Exfiltration on the Performance of Urban Sewer Systems”, research project supported by the European Commission, Lyon
Weiß, G., Brombach, H. (2002)	“Infiltration and inflow in combined sewer systems: long-term analysis”, veröffentlicht in Water Science Technology, Umwelt- und Fluid-Technik Dr. H. Brombach GmbH, Bad Merгентheim

## 5.1 Allgemeines

Infiltrierendes Grundwasser zählt zur Kategorie des Fremdwassers und ist somit ein unerwünschter Bestandteil des abzuleitenden Schmutzwassers. Infiltration kann zu folgenden Auswirkungen führen:

- Einer Erhöhung des Fremdwasseranteils, dadurch Erhöhung des Schadstoffaustrages in den Vorfluter sowie der Kosten für Abwassertransport, Abwasserreinigung und damit für die Abwasserabgabe
- Einer Erhöhung des Wartungsaufwandes
- Hydraulische Mehrbelastung und ggf. Überlastung der Kanäle, Pumpwerke und/oder Kläranlagen
- Absenkung des Grundwasserspiegels, verbunden mit Schäden an der Bebauung und am Bewuchs
- Vermindert die Reinigungsleistung von Kläranlagen
- Verfestigte Ablagerungen/Inkrustationen
- Änderung der Bettungsbedingungen mit Folgeschäden, wie Rohrbruch/Einsturz
- Lageabweichungen, Deformation/Verformung oder Risse
- Hohlrumbildung, verbunden mit Setzungen und/oder Einstürzen
- Wurzeleinwuchs

Zusammenfassend aus der Literaturrecherche gehören zu den wichtigsten Einflussgrößen der Infiltration:

- Grundwasserstand, hydrogeologische Randbedingungen
- Niederschlagsschwankungen und Grundwasserdynamik
- Lastaufnahmeschwankungen (Rohrsystem, zum Beispiel Verkehrslasten)
- Bodenart, Bodenmechanik, Bodendynamik, Bodenverdichtung
- Durchlässigkeit des Bodens, hydraulische Druckpotentiale
- Verfüllart, Aufschüttung, Bettung
- Abwassereigenschaften
- Rohrmaterial, Wanddicke, Rohrdurchmesser, Art der Rohrverbindung
- Werkstoffwechsel und Übergänge, Beschichtungsmaterialien, Qualität und Art der Verbindung zu anderen Formstücken (z.B.: Schachtringbindung, Muffe etc.)
- eingesetzte Sanierungstechnik
- Stofftransportprozesse und Ablagerungen (Kolmation, Suffusion)
- Schadensart, -Schadensgröße, Lage des Rohrschadens

In Kapitel 5 wurde schon angerissen, dass ganzheitliche Ansätze und die Berücksichtigung aller möglichen Einflussgrößen zur Quantifizierung der Fremdwasserinfiltration fehlen. Auch Hennerkes (2006) führt an, dass detaillierte Kenntnisse zu den Infiltrationsmengen und Ab-

hängigkeiten von Bodentyp, Grundwasserstand sowie Art und Größe des Rohrschadens bisher nicht existieren. Insbesondere für eine exakte Kalibrierung von Grundwassermodellen mangelt es an entsprechenden Ansätzen um die Infiltration an Einzelschäden und Drainagen zu beschreiben. Die bisher betrachteten Untersuchungen geben keinen Aufschluss über die Art der möglichen mathematischen Korrelationen zwischen Infiltrationsrate und den verschiedenen Einflussparametern. Wie in der Arbeit von Hennerkes (2006) ist auch während dieser Literaturrecherche zu erkennen, dass die bisherigen Ansätze zur Quantifizierung der Infiltration aus der Brunnerwirtschaft oder Hydrodynamik kommen und mit den Gesetzen von Darcy und Toricelli beschrieben werden. In vielen Ansätzen und Überlegungen wird davon ausgegangen, dass bei der Infiltration das strömende Wasser im Querschnitt sich überall mit konstanter Geschwindigkeit dem Gradienten folgend bewegt. Klinger (2007) konstatiert in seiner Arbeit, dass es noch keine wissenschaftlich belegbaren Angaben zur Abschätzung der Infiltration in Kanalsystemen in Bezug auf veränderte Strömungsgeschwindigkeiten gibt. Es ist jedoch möglich, dass sich aufgrund des freien Auslaufs in den Kanal unmittelbar an der Schadenzone die Fließgeschwindigkeiten erhöhen. Fließ- und Strömungsgeschwindigkeiten sind dabei abhängig von den Durchlässigkeiten des Bettungs- bzw. Füllmaterials.

Die bestehenden Ansätze aus der Literatur, welche die Infiltration in ein schadhaftes Rohr beschreiben, werden in der Arbeit von Hennerkes (2006) detailliert beschrieben. Eine Übersicht der Ansätze zur Nachbildung der Grundwasserinfiltration ist in folgender Abbildung dargestellt.

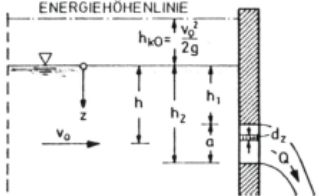
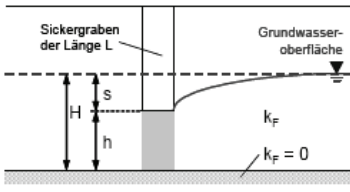
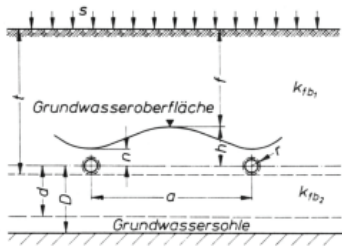
Ansatz	Annahmen	Ergebnis		
		Boden A $k_F = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$	Boden B $k_F = 4,4 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$	
vollkommener Ausfluss aus einem Gefäß mit kleiner Öffnung nach SCHRÖDER (1994) 	kreisförmige Öffnung Beiwert $\mu_A = 0,95$ Radius $a = 5 \text{ mm}$ Druckhöhe $h = 60 \text{ cm}$	15,36 l/min		
	schlitzförmige Öffnung Beiwert $\mu_A = 0,673$ Öffnungsbreite $a = 1 \text{ mm}$ Öffnungslänge $b = 100 \text{ cm}$ Druckhöhe $h = 60 \text{ cm}$			138,54 l/min
Wasseraustausch zwischen Grund- und Oberflächengewässern (Leakage-Ansatz über den benetzten Umfang eines Kanalrohres)	Kanalrohr DN 300 Druckhöhe $H = 60 \text{ cm}$ Leakage-Faktor $k_l = 3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/s}$ unabhängig vom Boden da Dicke der Kolmationsschicht unbekannt	0,10 l/min		
horizontale Grundwasserfassung (Sickergraben) 	vollkommene Verhältnisse ungespannter Grundwasserleiter Druckhöhe $H = 60 \text{ cm}$ Länge Graben $L = 1 \text{ m}$ Absenkung $s = 50 \text{ cm}$ $Q = L \cdot k_F \cdot \frac{H^2 - h^2}{3000 \cdot s \cdot \sqrt{k_F}}$	0,24 l/min	6,00 l/min	
Dränagewasserabflussspende nach DIN 1185-2 (1973) 	nach HOOGHOUTD $Q = \frac{8 \cdot k_{fb1} \cdot d \cdot h + 4 \cdot k_{fb2} \cdot h^2}{a} \cdot L$	0,54 l/min	9,67 l/min	
	Druckhöhe $h = 60 \text{ cm}$ und $n = 0$ Länge Dränage $L = 1 \text{ m}$ Absenkung $s = 50 \text{ cm}$ $k_{fb1} = k_{fb2} = k_F$ pauschaler Ansatz der Dränageabflussspende nach Tabelle 8 vor einer Wand je lfd. m Dränage.	mit $d = 0,71$ und $a = 5,97 \text{ m}$	mit $d = 2,58$ und $a = 37,76 \text{ m}$	3 - 6 l/min

Abbildung 18: Übersicht der Ansätze zur Nachbildung der Grundwasserinfiltration (Hennerkes 2006)

## 5.2 Untersuchungen zur Infiltration

Verschiedene Modellansätze zur Quantifizierung der Grundwasserinfiltration sind in der Dissertation von Hennerkes (2006) zu finden. Neben den bisherigen Ansätzen und Vorgehensweisen wurde in dieser Arbeit mit Hilfe von halbtechnischen Untersuchungen an einem Versuchstand auch ein neuer modelltechnischer Ansatz entwickelt. Darüber hinaus liefern lang-

jährige Untersuchungen aus Dresden (z.B.: APUSS-Studie) und Karlsruhe (NEIMO - Network Exfiltration und Infiltration Modell) ebenfalls Ansätze um die Grundwasserinfiltration quantitativ einschätzen bzw. bestimmen zu können. Die nachfolgenden Schilderungen basieren auf den Ergebnissen der o.g. Arbeiten und Studien und sind weitestgehend aus den Literaturquellen entnommen.

### 5.2.1 Untersuchungen in Aachen (Dohmann, Decker, 1998)

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden Infiltrationsraten an einer Abwasserhaltung durch undichte Muffen ermittelt. Die Messungen wurden an einem in den 60er Jahren verlegten Mischwasserkanal (Eiprofil 500/750 B) durchgeführt. Die Haltung in dem obenliegenden Schacht wurde abgesperrt und das anfallende Schmutzwasser wurde in die unterhalb liegende Haltung umgepumpt. Der Grundwasserstand wurde durch einen installierten Grundwasserpegel gemessen. Die Messkampagne umfasste 323 Einzelmessungen. In Tabelle 23 sind die ermittelten Messergebnisse bezogen auf eine undichte Muffe angeführt.

Tabelle 23: *mittlere Infiltrationsraten undichter Rohrverbindungen einer Haltung Ei 500/750 B (Dohmann 1999)*

GW-Stand über Kanalsole	Anzahl Messungen	Ø Infiltrationsrate pro Muffe
mm	-	l/h
1.065	120	967,8
1.075	42	1.218,6
1.085	60	1.254,6
1.115	101	1.167,4

Nach Hennerkes (2006) sind aus diesen Untersuchungen keine Rückschlüsse auf den Einfluss von hydrostatischer Druckhöhe, Schadens- und Bodenart möglich.

### 5.2.2 Untersuchungen in Aachen (Hennerkes, 2006)

Zur Bestimmung von Infiltrationsraten in einen Abwasserkanal wurden halbtechnische Untersuchungen an einem Versuchstand durchgeführt. Die Anlage bestand aus einem Stahlbehälter in den zwei durch eine Muffe verbundene, definiert geschädigte Betonrohre DN 300 längs eingebaut wurden. Der Versuchsaufbau von Hennerkes ist in Abbildung 19 dargestellt. Zum Untersuchungsprogramm gehörten unterschiedlichen Bodenarten und Bodenverdichtungen sowie verschiedene Schadenstypen an Rohrstücken. Die Messung des Wasservolumenstromes erfolgte in Abhängigkeit der Versuchsrandbedingungen durch ein MID oder Handmessungen.

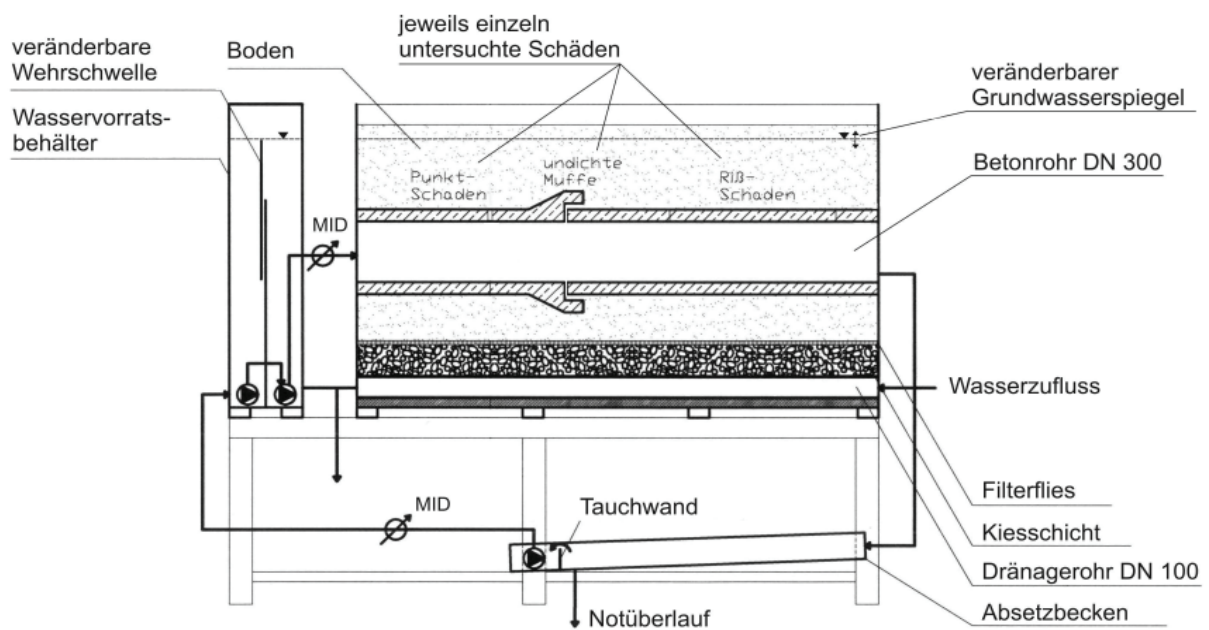


Abbildung 19: Versuchstand im Längsschnitt (Hennerkes 2006)

Nach Hennerkes (2006) wurden während der Versuchsdurchführung bei jeder Versuchskonfiguration die folgenden Parameter erfasst:

- Grundwasserinfiltration (l/min)
- hydrostatische Druckhöhe  $h$  (m) des Grundwassers im Bereich der Schadstelle
- Bodeneintrag und
- Grad der Verdichtung des Bodens.

An zwei verschiedenen Bodentypen (SU und SE) wurde in Hinblick auf verschiedene Schadenstypen folgendes Versuchsprogramm durchgeführt.

Tabelle 24: Versuchsprogramm zur Bestimmung der Grundwasserinfiltration (Hennerkes 2006)

Schaden		Untersuchungsreihen			
Art	Durchmesser bzw. Rissbreite	stationär	veränderte Grundwasserstände	HD-Reinigung	dynamische Belastung
<b>Punktschaden</b> mit Schadens- durchmesser	3 mm	○●	●	●	
	5 mm	○●		○●	
	6 mm	●			●
	7 mm	○●		○●	
	8 mm	○●	●○		○●
	10 mm	○●	●	○●	○●
	12 mm	●	●	●	
	14 mm	●	●	●	
	15 mm	○	○	○	○
	18 mm	○	○	○	
	20 mm	○	○	○	
	25 mm	○			
<b>Risschaden</b> mit Rissbreite (Länge 1 m)	1 mm	○●	●		
	2 mm	○●	●	○●	
	3 mm	○●	●	●	●
	4 mm	●		●	
	5 mm	○●	●○	○●	○●
	6 mm	○		○	
	8 mm	○		○	○
	10 mm	○			○
<b>Muffenschaden (Beton DN 300)</b>		○●	●		○●
<b>Erläuterungen:</b> ○ schwach-bindiger Boden I untersucht ● rolliger Boden II untersucht					

(SU = Sand, schwach kiesig, schwach schluffig, gemischtkörniger Boden, weitgestuft)  
(SE = Mittelsand, schwach kiesig, grobkörniger Boden, enggestuft)

Der Auswertung lagen für den Boden I (SU) insgesamt 557 Messergebnisse für die Grundwasserinfiltration und für den Boden II (SE) 1212 Werte zu Grunde. Mit Hilfe der aus der Literatur bekannten und in den Versuchen nachgewiesenen Abhängigkeiten der Grundwasserinfiltration von Schadensart, Schadensgröße, Bodenart, hydrostatischen Druckhöhe, Wasserdurchlässigkeit und der Verdichtung des Bodens, konnte ein empirischer Berechnungsansatz für die Infiltrationsrate bei konkreten Schadensarten bestimmt werden. Aus den Ergebnissen der Untersuchungen stellte Hennerkes (2006) fest, dass bei Punktschäden die Schadensfläche einen potenziellen Einfluss auf die Infiltration hat, hingegen bei Riss- bzw. Muffenschäden dieser linear sei.



Für den Berechnungsansatz wurden bestimmte Vorfaktoren ermittelt. Diese beschreiben laut Hennerkes (2006) die Abweichung eines Messergebnisses von der berechneten Grundwasserinfiltrationsrate. Für alle Versuche sollte bei gleichen Randbedingungen (Schadensart, Bodenart) ein konstanter Vorfaktor bestimmt werden. Ziel war es, eine geringe Streuung zu erreichen. Zur Bestimmung der Vorfaktoren wurden die Messwerte der Versuche mit den Infiltrationsraten der aus der Literatur bekannten Berechnungsfunktionen verglichen (Hennerkes 2006). Folgende Übersicht zeigt die von Hennerkes (2006) erarbeitete Zusammenstellung der in den Versuchen ermittelten Vorfaktoren.

Tabelle 25: Zusammenstellung der in den Versuchen ermittelten Vorfaktoren (Hennerkes 2006)

Vorfaktor $\eta^{*})$	BODEN I (SU)		BODEN II (SE)	
	Punktschäden	Riss- bzw. Muffenschäden	Punktschäden	Riss- bzw. Muffenschäden
	$\eta_P (m^{-0,5})$	$\eta_R (m^{-1,5})$	$\eta_P (m^{-0,5})$	$\eta_R (m^{-1,5})$
Median	3,33	2,22	6,61	1,14
Mittelwert $\bar{x}$	5,05	2,80	7,20	1,58
Standardabweichung $s$	4,81	1,84	2,78	1,11
Streuung $(\bar{x} - s) \leq \eta \leq (\bar{x} + s)$	0,24 - 9,86	0,95 - 4,64	4,41 - 9,98	0,48 - 2,69

Gemäß angeführten Formeln und oben aufgeführten Vorfaktoren lässt sich die Infiltrationsrate wie folgt bestimmen:

Punktschäden: 
$$q_F = \eta_P \cdot 1 \cdot 10^5 \cdot k_F \cdot \sqrt{A} \cdot h^{1,5}$$

Riss- bzw. Muffenschäden: 
$$q_F = \eta_R \cdot 1 \cdot 10^7 \cdot k_F \cdot A \cdot h^{1,5}$$

Dabei beschreibt  $q_F$  die Grundwasserinfiltrationsrate,  $\eta_P$  ein Vorfaktor für Punktschäden,  $\eta_R$  ein Vorfaktor für Riss- und Muffenschäden,  $k_F$  die Wasserdurchlässigkeit des Bodens,  $A$  die Fläche des Schadens und  $h$  die Grundwasserdruckhöhe am hydrostatischen Flächenschwerpunkt des Schadens. Es wird davon ausgegangen, dass der  $k_F$ -Wert nach dem Gesetz von Darcy einen linearen Einfluss hat.

Mit Hilfe des empirischen Berechnungsansatzes von Hennerkes (2006) lässt sich auch der Zusammenhang der Grundwasserinfiltration in Abhängigkeit von der Schadensfläche und der hydrostatischen Druckhöhe grafisch darstellen. Folgende Abbildungen veranschaulichen diesen Zusammenhang bei unterschiedlicher Bodenart.

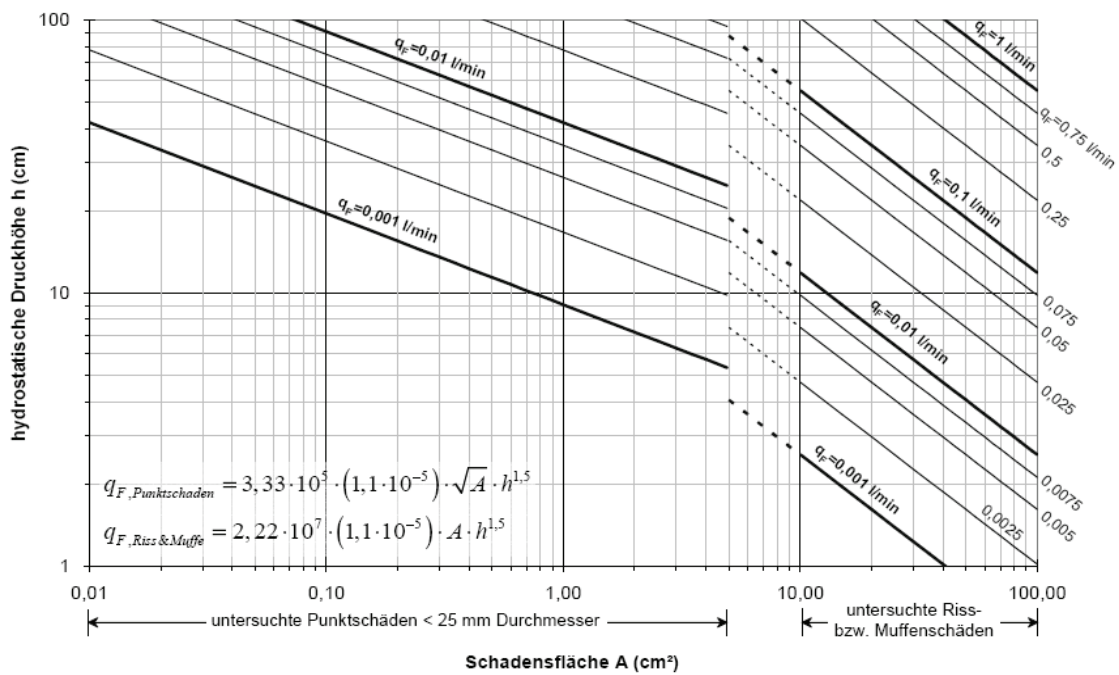


Abbildung 20: Grundwasserinfiltration  $q_F$  in Abhängigkeit der Schadensfläche und der hydrostatischen Druckhöhe für den schwach-bindigen Boden I (Hennerkes 2006)

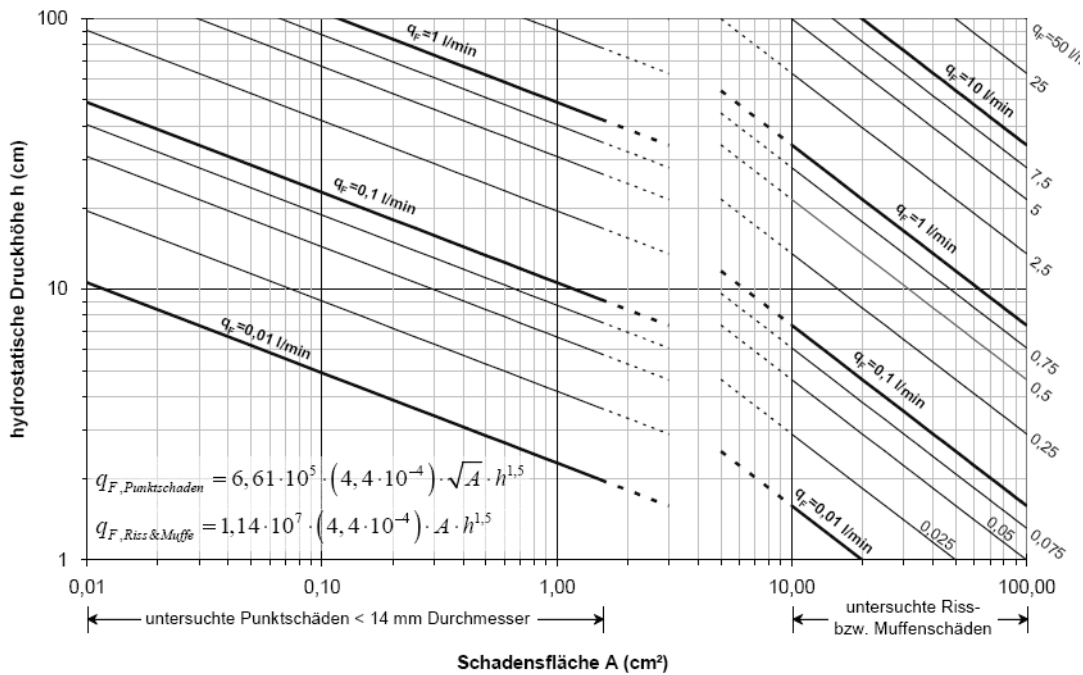


Abbildung 21: Grundwasserinfiltration  $q_F$  in Abhängigkeit der Schadensfläche und der hydrostatischen Druckhöhe für den rolligen Boden II (Hennerkes 2006)

Der von Hennerkes (2006) entwickelte Ansatz zur Berechnung der Grundwasserinfiltration unterscheidet sich teilweise von den theoretischen Betrachtungen und bisherigen Modellen zur Berechnung der Infiltrationsraten (Hennerkes 2006). Der Vergleich der berechneten Infiltrationsraten

rationsraten mit den unterschiedlichen Ansätzen zeigt enorme Unterschiede. Mit dem Ansatz von Hennerkes ergeben sich in Hinblick auf die in Abbildung 18 angeführten Modellrandbedingungen, folgende Einzelwerte für Boden A und Boden B:

#### **Grundwasserinfiltration für einen Punktschaden**

(10 mm Durchmesser, Druckhöhe 60 cm):

Boden A = 0,016 l/min                      Boden B = 1,25 l/min

#### **Grundwasserinfiltration für einen Risschaden**

(1 mm Breite, Länge 1 m und Druckhöhe 60 cm):

Boden A = 0,12 l/min bzw. Boden B = 2,47 l/min

Es wird deutlich, dass die berechneten Einzelwerte von Hennerkes (2006) in der Größenordnung näherungsweise vergleichbar sind mit den Ergebnissen der Berechnungsansätze der horizontalen Grundwasserfassung und der Dränagewasserabflussspende nach HOOG-HOUDT sowie des Leakage-Ansatzes. Diese Ähnlichkeit ist zunächst jedoch nicht verallgemeinerbar, da die Funktionsverläufe der verschiedenen Ansätze erheblich voneinander abweichen (Hennerkes 2006).

Laut Hennerkes (2006) ist mit Hilfe der entwickelten Abhängigkeiten neben der schadensgenauen Quantifizierung der Grundwasserinfiltration auch eine Prognose des zu erwartenden Fremdwasseranfalls anhand der Auswertung einer optischen Zustandserfassung möglich. Des Weiterem können die Abflüsse der einzelnen Fremdwasserquellen besser quantifiziert werden. Jedoch müssen detaillierte Kenntnisse über Bodenart, Rohrsystem und Grundwasserstand in der Leitungszone vorliegen. Bei identifizierten Schadensbildern kann ein Infiltrationspotenzial und damit bei Vorliegen einer geeigneten Bewertung auch eine entsprechende Sanierungspriorität zugeordnet werden (Hennerkes 2006).

### **5.2.3 Untersuchungen in Dresden (APUSS-Studie)**

Das EU-Forschungsprojekt APUSS (Assessing infiltration and exfiltration on the Performance of Urban Sewer Systems) hatte eine untersuchende Bewertung von In- und Exfiltration undichter Abwasserkanäle zum Ziel. Zehn Projektpartner aus sieben Ländern unter anderem auch die TU-Dresden haben dieses Projekt von 2001 bis 2004 durchgeführt. Zum einen wurden neue Messmethoden zur Bestimmung der Infiltration in Kanälen entwickelt und zum anderen wurden Modellwerkzeuge für die Berechnung von Infiltrationsraten herangezogen. Die neu entwickelten Messmethoden für die Bestimmung der Infiltration basieren vorwiegend auf der Analyse von Konzentrationsverläufen bestimmter Wasserinhaltsstoffe (APUSS 2005). Diese Messmethoden wurden laut Studie unter verschiedenen Abflussbedingungen, unter unterschiedlichen hydrologischen Bedingungen und auf verschiedenen räumlichen Skalen

erprobt und validiert (APUSS 2005). Darüber hinaus wurden diese Methoden mit konventionellen Methoden in Hinblick auf die Mengenbilanzierung verglichen und es wurden Unsicherheitsanalysen erstellt. Zur Ermittlung der Infiltrationsrate wurde u.a. die Sauerstoffisotopenmethode herangezogen. Die Methode basiert auf eine Massenbilanzierung, welche aufgrund unterschiedlicher Isotopenanteile im Grundwasser und im Trinkwasser erstellt werden kann. Eine zweite Methode zur Bestimmung der Infiltrationsrate beruht auf kontinuierliche Messungen von Durchfluss und CSB-Konzentration. Auch hier helfen wiederum Massenbilanzen zur Ermittlung der Infiltrationsraten.

Die im Rahmen des Projektes durchgeführten Infiltrationsmessungen für ein bestimmtes Teileinzugsgebiet der Stadt Dresden dienten dafür, um einen plausiblen Berechnungsansatz für die Modellierung der Infiltration anwenden und testen zu können. Da am Beispiel Dresden nicht im ganzen Einzugsgebiet Messungen durchgeführt werden konnten, wurden statistische Verfahren auf Basis der explorativen Datenanalyse entwickelt, welche Teileinzugsgebiete und Kanäle identifizieren, die ähnliche Eigenschaften und daher potenziell auch ähnliche Infiltrations- und Exfiltrationsraten haben. Das Modellkonzept arbeitet mit künstlich generierten Infiltrationsraten und bestimmten Kanalklassifikation unter Einbezug räumlicher Informationen. Das entwickelte Modellwerkzeug nutzt alle relevanten Daten eines Kanalnetzes (Geometrie, Flächenmerkmale, Zeitreihen etc.) und integriert die wichtigsten Schlüsselparameter (Grundwasserspiegel, benetzte Umfang, benetzte Fläche, Wasserspiegel im Kanal, Leakage Faktor) für den Prozess der Infiltration bzw. Exfiltration.

Zur Berechnung der Infiltration wurde der mittels Darcy-Gesetz entwickelte Leakage-Ansatz modifiziert. Zur Simulation der Infiltration in Abwasserkanälen wurde folgender Berechnungsansatz aufgestellt (APUSS 2005):

$$Q_{infiltration} = k_L A_S (h_G - h_S)$$

mit der Voraussetzung:  $h_G > h_S$ , dabei sind:

$Q_{Infiltration}$	infiltrierende Grundwassermenge ( $m^3/s$ )
$A_S$	benetzte Rohroberfläche ( $m^2$ )
$h_S$	Wasserspiegel im Kanal (m)
$h_G$	Grundwasserspiegel (m)
$k_L$	leakage factor (s-1).

Des Weiterem wurde eine Funktion für die Berechnung der Infiltration aufgestellt, welche regionale Unterschiede sowie Hausanschlussleitungen mit berücksichtigt:

$$Q_{in} = (h_{GWL} - h_w) P_{w1} L K_r K_r + q_{0in} + q_{inHC}^{N_{HC}}$$

mit der Voraussetzung:  $h_{GWL} > h_w$ , dabei sind:

$Q_{in}$	infiltrierende Grundwassermenge ( $m^3/s$ )
$h_w$	Wasserspiegel im Kanal (m)
$h_{GWL}$	Grundwasserspiegel um das Rohr (m)
$P_{w1}$	external wet perimeter (m)
$L$	Rohrlänge (m)
$K_l$	lokaler Koeffizient (d-1)
$K_r$	regionaler Koeffizient (-)
$q_{0in}$	Infiltrationsrate von anderen Infiltrationsquellen ( $m^3/d$ )
$q_{inHC}$	Infiltrationsrate einer einzelnen Hausanschlussleitung
$N_{HC}$	Anzahl der Hausanschlüsse am Rohr

Um den oben angeführten Berechnungsansatz in das Modellkonzept zu integrieren war es erforderlich, dass die aufgeführten Koeffizienten kalibriert werden. Basis hierfür ist die Einbindung von umfangreichen Datenstrukturen, welche über einen längeren Zeitraum erfasst wurden sind. Eine Übersicht der erforderlichen Informationen und Daten für die Kalibrierung der Koeffizienten ist in Tabelle 26 dargestellt.

Tabelle 26: erforderlichen Informationen und Daten für die Kalibrierung des Modellwerkzeuges (APUSS 2005)

Datentyp	Bezeichnung
Spezifika Kanalsystem im Einzugsgebiet	$L$ Rohrlänge
	$N_{HC}$ Anzahl Hausanschlüsse
	Durchmesser
	Profilform
	Gefälle, Neigung
Wasserspiegel	$h_w$ Wasserspiegel im Rohr
	$h_{GWL}$ Grundwasserspiegel um das Rohr
Koeffizient	regional Koeffizient
	Leakage-factor-Koeffizient
Spezifische Infiltrationsrate	$q_{0in}$ Infiltrationsrate von anderen Infiltrationsquellen
	$q_{inHC}$ Infiltrationsrate einer einzelnen Hausanschlussleitung

Mit Hilfe der bekannten Daten lassen sich die Koeffizienten folgendermaßen berechnen (APUSS 2005):

$$K_{l,T} = \frac{Q_{in,T}}{\sum_{i=1}^n [(h_{GWL,i,T} - h_{w,i,T}) \cdot A_{i,T}]}$$

$K_{l,T}$	integral leakage factor at time T (d-1)
$Q_{in,T}$	balanced infiltration in the catchment at time T, without $Q_{inHC}$ and $Q_{0in}$ ( $m^3/d$ )
$h_{w,i,T}$	water level in the sewer pipe i at time T (m)
$h_{GWL,i,T}$	groundwater level at the sewer pipe i at time T (m)
$A_{i,T}$	groundwater-influenced pipe surface of pipe i at time T ( $m^2$ ).

$$K_{l,i} = \frac{\sum_{T_i} K_{l,T}}{n_i}$$

$K_{l,i}$	calibrated leakage factor for pipe i
$K_{l,T}$	integral leakage factor at time T
$T_i$	time spot when $h_{GWL,i,T} > h_{w,i,T}$
$n_i$	number of time spots when $h_{GWL,i,T} > h_{w,i,T}$

Basierend auf der Software AquaBase wurden in das Modellkonzept folgende Informationen und Merkmale (APUSS 2005) integriert.

- Entwicklung der Schnittstelle für Eingangsgrößen
- Implementierung der Grundwassertiefenberechnung
- Ausführung der Datenverarbeitung für separate Tools
- Implementierung der Wasserspiegelberechnung bei Trockenwetterabfluss
- Implementierung von Berechnungsansätzen für Infiltration und Exfiltration
- Kalibrierung der Modellansätze für Infiltration und Exfiltration
- Berechnung von Performance-Indikatoren
- Statistische Auswertung der Ergebnisse (Monte Carlo-Simulation)
- Unsicherheitsanalyse der erzielten Ergebnisse

Die Software macht es möglich, dass mit Hilfe einer Toolbar die Schlüsselparameter und die berechneten Infiltrations- und Exfiltrationsraten für ein bestimmtes Einzugsgebiet ausgegeben werden können. Darüber hinaus kann das Einzugsgebiet grafisch abgebildet werden. Laut

Studie ist dieses Modellwerkzeug aufgrund der Anwendung an großräumigen Testgebieten (zum Beispiel die Stadt Prag) validiert. Folgende Grafik zeigt einen Snapshot der verwendeten Software.

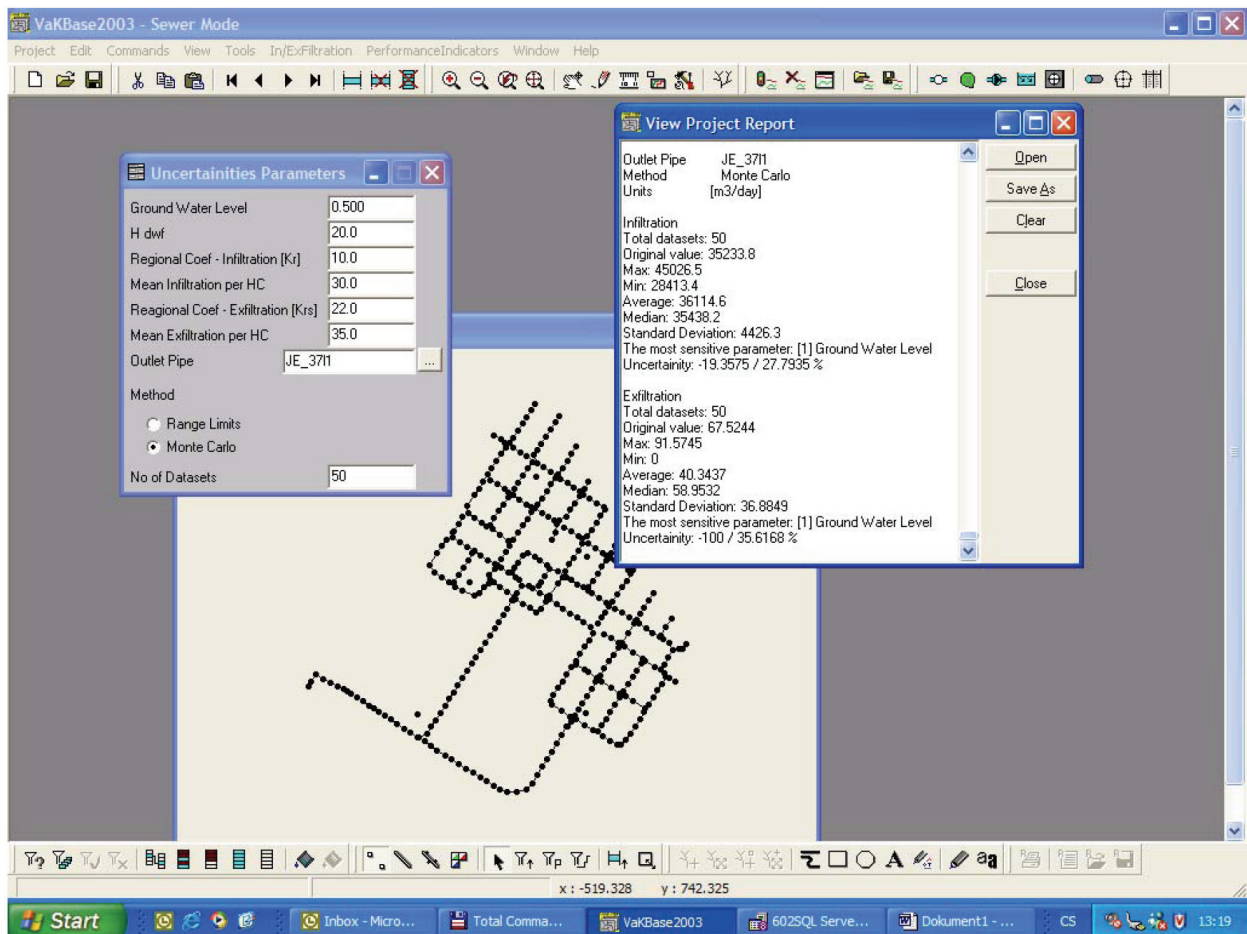


Abbildung 22: Programmoberfläche AquaBase (APUSS 2005)

### 5.2.4 Untersuchungen in Karlsruhe (Klinger, 2007)

Im Rahmen der Untersuchungen von Klinger (2007) (Beschreibung der Wasser- und Stoffflüsse in einem urbanen Raum unter besonderer Berücksichtigung von Kanalleckagen) wurde ein deterministischer Berechnungsansatz zur Abschätzung von Exfiltrations- und Infiltrationsraten entwickelt. Das sogenannte NEIMO Modellkonzept basiert auf dem Gesetz von Darcy. Nach Klinger (2007) stellt das Modell einen räumlichen Bezug zwischen Kanalisation und Grundwasserspiegel (vertikal) sowie der Lage im Einzugsgebiet (horizontal) her. Für die Berechnung der Infiltrationsraten werden bautechnische Eigenschaften des Kanalsystems, Abflussmengen und -frachten und die relative Lage zum Grundwasserspiegel berücksichtigt. Sowohl Informationen und Daten aus real existierenden Rohrschäden als auch Daten aus statistischen Ver-

teilungen von fiktiv generierten Schäden bilden die Grundlage der Mengenberechnung für die Infiltration. Für die Berechnung der Infiltration wird davon ausgegangen, dass sich eine Kanalhaltung unterhalb des Grundwasserspiegels befindet. Dabei sind die Lage des Schadens und die Schadensfläche entscheidende Parameter. Eine wichtige Berechnungsgröße ist die hydraulische Potentialhöhe, welche durch den Verschnitt der Kanalsohlhöhlen mit der Grundwasseroberfläche ermittelt wird (Klinger 2007). Die Wirkung des hydraulischen Potentials auf die Schadensflächen durch das Grundwasser hängt dabei im Wesentlichen von der Lage des Rohrschadens im Kanalquerschnitt ab. In dieser Studie werden beispielhaft zwei einfache Szenarien bzw. Fälle betrachtet (siehe Abbildung 23). Zum einen befindet sich der Schaden in der Krone des Kanalrohres, hier wirkt nur die Überstauhöhe des Grundwasserspiegels und zum anderen ist der Schaden an der Kanalsohle, wobei hier das effektiv wirkende Druckpotential höher ist. Die Berechnung der Infiltration für den Sohlbereich des Kanals ist schwieriger, da der hydrostatische Druck im Kanal, welcher vom Abwasser auf die Leckage wirkt, zu beachten ist.

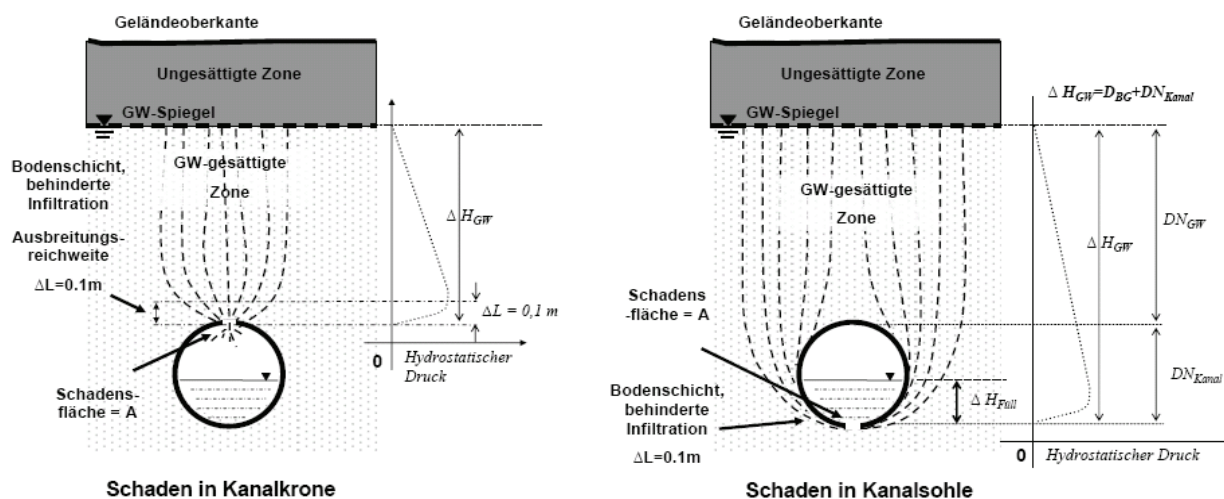


Abbildung 23: Schamtische Darstellung eines Kanalrohres unterhalb des Grundwasserspiegels (Klinger 2007)

Für die zwei betrachteten Fälle werden Funktionen zur Abschätzung der Infiltration aufgestellt:

*Berechnung Infiltration Schaden Kanalkrone:*

$$Q_{Infiltr.} = -k_{Infiltr.} \cdot A \cdot \left( \frac{\Delta H_{GW}}{\Delta L} \right)$$

*Berechnung Infiltration Schaden Kanalsohle:*



$$Q_{Infiltr.} = -k_{Infiltr.} \cdot A \cdot \left( \frac{\Delta H_{Gw} - H_{Füll}}{\Delta L} \right)$$

Die Differenz zwischen Grundwasseroberfläche und Kanalsole wird durch  $\Delta H_{Gw}$  wiedergegeben.  $H_{Füll}$  beschreibt hier den Füllstand des Kanals. Die mittleren Füllstände werden über Durchflussmessungen bestimmt. Für einen Schaden in der Kanalsole berechnet sich die Potentialhöhe aus der Summe der Distanzen zwischen Rohrkronen und dem Grundwasserspiegel sowie dem Außendurchmesser des Rohres (Klinger 2007).

Um das NEIMO-Modellprogramm anzuwenden werden verschiedene Eingangsdateien eingelesen. Darunter fallen unter anderem Informationen wie die Beschreibung der Haltungen (Alter, Länge Durchmesser, etc.), Schadensverteilungen, Lage unterhalb des Grundwasserspiegels und Stoffkonzentrationen der Grundwasserinhaltsstoffe etc. Die Berechnung der Ex- und Infiltrationsdaten wird als Ergebnisdatei abgespeichert und als Tabelle dargestellt.

Klinger führt jedoch an, dass das NEIMO-Modell auch mit Unsicherheiten behaftet ist. So werden zum Beispiel Inhomogenitäten des Bodens und Bodenart nicht berücksichtigt und der eigene Gradient einer Haltung vernachlässigt. Es wird vorwiegend davon ausgegangen, dass sich das Kanalrohr in einem Sand- oder Kiesbett befindet. Zudem sind künstlich generierte Schäden und statistisch ermittelte Schadensverteilungen für repräsentative Aussagen zu Infiltrationsmengen nicht zu 100 % verlässlich.

## Literaturverzeichnis

- APUSS 2005 Rutsch, M., Franz, T. et al. (2005). "Assessing Infiltration and Exfiltration on the Performance of Urban Sewer Systems", research project supported by the European Commission, European Commission 5th R&D Framework Programme, Contract number: EVK1-CT-2000-00072 APUSS, Lyon 2005
- ATV-DVWK 2003 ATV-DVWK-Arbeitsbericht ES-1.3: „Auswirkungen von Fremdwasser und Hinweise zum Erkennen kritischer Fremdwasserhältnisse“, März 2004
- ATV-DVWK-A 127 Statische Berechnung von Abwasserkanälen und -leitungen, 3. Auflage; korrigierter Nachdruck 4/2008
- ATV-M 143-6 Dichtheitsprüfungen bestehender, erdüberschütteter Abwasserleitungen und -kanäle und Schächte mit Wasser, Luftüber- und Unterdruck - Inspektion, Instandsetzung, Sanierung und Erneuerung von Abwasserkanälen und -leitungen, 06/1998
- Bärreis 2010 Bärreis, J.: „Sanierungsverfahren im Abwasserbereich“, veröffentlichter Fachbeitrag des RSV - Rohrleitungssanierungsverband e. V., Lingen (Ems) 2010
- Decker 1998 Decker, Joachim: „Auswirkungen von Fremdwasser auf Abwasseranlagen und Gewässer, Gewässerschutz - Wasser – Abwasser“, Band 168, Aachen 1998
- Decker et al. 1995 Decker, J.: Menzenbach, B.: „Belastung von Boden, Grund- und Oberflächenwasser durch undichte Kanäle“ awt, H. 4, S. 46-54., 1995
- DIN EN 12889 Grabenlose Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen, 03/2000
- DIN EN 14457 Allgemeine Anforderungen an Bauteile, die bei grabenlosem Einbau von Abwasserleitungen und -kanälen verwendet werden; Deutsche Fassung EN 14457, 2004
- DIN EN 1610 Technische Regeln für die Bauausführung von Abwasserleitungen und -kanälen, 10/1997
- DIN EN 476 Allgemeine Anforderungen an Bauteile für Abwasserkanäle und -leitungen für Schwerkraftentwässerungssysteme; Deutsche Fassung EN 476: 1997 Abwasserleitungen und -kanäle, 08/1997
- DIN EN 752-1 Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden, Teil 1 Allgemeines und Definitionen, 01/1996
- DIN EN 805 Wasserversorgung - Anforderungen an Wasserversorgungssysteme und deren Bauteile außerhalb von Gebäuden, Europäische Norm, Ausgabe: 2000-03
- Dohmann 1994 Dohmann, M.: „Untersuchungen zur quantitativen und qualitativen Belastung von Untergrund, Grund- und Oberflächenwasser durch undichte Kanäle.“ BMFT-Verbundprojekt „Wassergefährdung durch undichte Kanäle – Erfassung und Bewertung“; Teil 1, Aachen 1994.
- Dohmann 1999 Dohmann, M.: „Wassergefährdung durch undichte Kanäle – Erfassung und Bewertung“, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 1999

DVGW-AB W 400-2	Bau- und Prüfung von Wasserverteilungsanlagen. DVGW Arbeitsblatt, Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV), Teil 2: Bau und Prüfung, 9/2004
DWA-A 125	Rohrvortrieb und verwandte Verfahren (Dezember 2008)
DWA-A 139	Einbau- und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen (Dezember 2009)
DWA-M 159	Kriterien zur Materialauswahl für Abwasserleitungen und -kanäle, 01/2006
DWA-M 182	Fremdwasser in Entwässerungssystemen - Entwurf (Dezember 2010)
Günthert 2005	Günthert, F.W.: „Materialanforderungen an Abwasserleitungen und -kanäle“, Vorlesungsskript der Universität der Bundeswehr München, Institut für Wasserwesen, Neubiberg 2005
Günthert et al. 2001	Günthert, F.W., Bechteler W., Kulisch, H., Langer, C., Walther, G.: „Zerstörungsfreie Dichtheitsprüfung von Grundstücksentwässerungsanlagen“, 74. Mitteilungsheft des Instituts für Wasserwesen, Neubiberg 2001
Günzel 2006	Günzel, Wilfried: „Gesetzliche Regelwerke und Rahmenrichtlinien zur Dichtheit von Hauptkanälen u. Grundstücksentwässerungsleitungen • Am Beispiel Schlauchlining-Verfahren“, Vortrag zum 4. Schlauchlinertages am 30. März 2006 in Nürnberg
Hartmann 1996	Hartmann, A. et al.: „Untersuchungen von Schäden an öffentlichen Schmutz- und Mischwasserkanälen hinsichtlich der Auswirkung auf Grundwasser und Boden.“ Abschlussbericht zum BMFT-Forschungsvorhaben 02 WK 9344/00. Braunschweig 1996
Hennerkes 2006	Hennerkes, Jörg Andre: „Reduzierung von Fremdwasser bei der Abwasserentsorgung“, Dissertation an der RWTH Aachen 2006, Aachener Schriften zur Stadtentwässerung, Band 10, Aachen
Jardin 2004	Jardin, Norbert: „Fremdwasser-Eine grundsätzliche Problembeschreibung“, Vortrag zum 3. Ruhrverbands-Forum Europäische Wasserrahmenrichtlinie / Umsetzung in das deutsche Recht, Fremdwasser 23. Juni 2004, Essen
Keilholz 2010	Keilholz, P.: Teilbericht zum Forschungsprojekt: Kanalsanierung: Entwicklung innovativer Konzeptionen und Verfahren zur Sanierung von öffentlichen und privaten Kanälen mit dem Schwerpunkt Grundstücksentwässerung, Neubiberg 2010
Klinger 2007	Klinger, Jochen: „Beschreibung der Wasser- und Stoffflüsse in einem urbanen Raum unter besonderer Berücksichtigung von Kanalleckagen“, (Ex- und Infiltrationsmodell NEIMO (Network Infiltration & Exfiltration Model)), Dissertation an der Universität Karlsruhe, 2007
Klinger 2010	Klinger, J. et al.: „Defekte Abwasserkanäle – ein Risiko für Boden und Grundwasser? – Untersuchungen zur Quantifizierung und qualitativen Bewertung der Abwasserexfiltration“, Vortrag zum 2. Deutschen Tag der Grundstücksentwässerung in Dortmund 2010
Lfw 1999	Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft: „Prüfung alter und neuer Abwasserkanäle“, Merkblatt Nr. 4.3/6, Teil 2 Prüfverfahren, München 1999

LUBW 2007	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg: „Fremdwasser in kommunalen Kläranlagen - Erkennen, bewerten und vermeiden“, Band 21, Karlsruhe 2007
Lucas 2003	Lucas, Steffen: „Auftreten, Ursachen und Auswirkungen hoher Fremdwasserabflüsse – eine zeitliche und räumliche Analyse“, Dissertation an der Universität Karlsruhe, Schriftenreihe des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung - Band 115 - Karlsruhe 2003
Robert 2000	Robert, S. A.: “Exfiltration in Sewer System”, Environmental Quality Management, Inc., National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati, EPA/600/R-01/034 December 2000
Rutsch 2008	Rutsch, M. et al.: “Towards a better understanding of sewer exfiltration”, University of Technology Dresden, veröffentlicht in Water Research 42 2008
Saint-Gobain 2010	SAINT-GOBAIN PAM DEUTSCHLAND GmbH & Co. KG: Kapitel 12 des Abwasserkatalog: „Dichtheitsprüfung“, Saarbrücken, Stand Oktober 2010
Stegner 1995	Stegner, T.: „Modellversuche zur Beurteilung der Grundwassergefährdung durch undichte kommunale Abwasserkanäle“. Diplomarbeit an der Universität Innsbruck, unveröffentlicht 1995
Stein 1994	Stein, D.: „Feststellung und Bewertung von Schäden an Abwasserkanälen und –leitungen unter besonderer Berücksichtigung der Standortsicherheit und Funktionsfähigkeit der Kanäle“, BMFT-Verbundprojekt „Wassergefährdung durch undichte Kanäle – Erfassung und Bewertung“; Teil 3, Aachen.
Zech 2009	Zech, H.: „Übersicht der Techniken und Erfahrungen in der Kanalsanierung“, Horst Zech in 3R international, 10/2009 Lingen Ems