

Untersuchung und Bewertung von In- und Exfiltration undichter Abwasserkanäle:  
Das EU-Forschungsprojekt APUSS

Torsten Franz, Mandy Rutsch, Peter Krebs (Dresden), Torsten Frehmann (Essen),  
Jean-Luc Bertrand-Krajewski (Lyon), Maria Adriana Cardoso (Lissabon), Bryan  
Ellis (London), Mario Giulianelli (Rom), Willi Gujer (Dübendorf), Zdenek Pliska,  
Jaroslav Pollert und Karel Pryl (Prag)

**Kurzfassung**

Nur der gute Zustand und die Funktionsfähigkeit der Kanalisation garantieren die  
schadlose Ableitung von Abwasser zur Kläranlage. Infiltration von Grundwasser  
vermindert die Reinigungsleistung von Kläranlagen, während die Exfiltration von  
Abwasser zu Grundwasserkontaminationen führen kann. Während des Zeitraums  
2001-2004 haben Universitäten, Unternehmen und Kommunen aus sieben  
europäischen Ländern das Forschungsprojekt APUSS (Assessing infiltration and  
exfiltration on the Performance of Urban Sewer Systems) durchgeführt. Das  
Projekt war in drei Arbeitsbereiche eingeteilt, welche sich mit

- i) der Entwicklung neuer Messmethoden basierend auf Tracern und detaillierten  
Unsicherheitsanalysen,
- ii) der Entwicklung von Modellen und Softwarepaketen, welche Zustands- und  
Messdaten zusammenführen und Netzbetrieb und Entscheidungsprozesse  
unterstützen sowie

iii) der Verknüpfung von ökonomischen und betrieblichen Fragen mittels Kostenschätzungen, Leistungsindikatoren und multikriterieller Methoden für Investitions- und Sanierungsstrategien beschäftigen.

Dieser Artikel beschreibt zusammenfassend die Zielsetzungen, die Methoden und die wesentlichen Ergebnisse jedes Arbeitsbereiches. Dazu werden Hinweisen zu Veröffentlichungen und weiterführenden Resultaten gegeben.

## **SCHLÜSSELWÖRTER**

Abwasserverlust, Exfiltration, Fremdwasser, Infiltration, Kanalisation, Leistungsindikator, Messmethoden, Modellierung, Tracer.

## **1 Einleitung**

Die Kanalisation stellt einen wesentlichen Bestandteil der urbanen Infrastruktur dar. Nur ein guter Zustand garantieren die schadlose Ableitung von häuslichem, gewerblichem und industriellem Abwasser zur Kläranlage ohne das Auftreten von Infiltration oder Exfiltration. Die Infiltration von Grundwasser vermindert den Wirkungsgrad von Kläranlagen durch höhere hydraulische Belastung und Verdünnung der Schmutzstoffkonzentrationen (die Ablaufkonzentrationen sind allerdings niedriger), während die Exfiltration von Abwasser den Boden in der ungesättigten Zone beladen und zu Grundwasserkontaminationen führen kann. Beide Probleme sind für ein nachhaltiges Ressourcenmanagement auf lange Sicht kritisch und haben erhebliche ökonomische Konsequenzen. Um die Leistung und die Defizite der städtischen Kanalisationen bzgl. dieser Prozesse zu bewerten,

benötigen öffentliche und private Betreiber geeignete Methoden und Technologien.

Während des Zeitraums 2001-2004 haben Universitäten, Unternehmen und Kommunen aus sieben europäischen Ländern das Forschungsprojekt APUSS (Assessing infiltration and exfiltration on the Performance of Urban Sewer Systems) durchgeführt, welches sich mit dieser Problematik auseinandersetzte. Es wurde von der Europäischen Kommission unter dem 5. Rahmenprogramm für Forschung und Entwicklung finanziert und war in den europäischen Forschungscluster „CityNet“ eingebettet, welcher sechs Projekte umfasste, die sich mit der integrierten Betrachtung urbaner Wassersysteme beschäftigten [1]. Das Projekt APUSS war in drei Arbeitsbereiche unterteilt, welche sich mit i) neuen Messmethoden, ii) dazugehörigen Modellen und Werkzeugen und iii) den sozioökonomischen Aspekten von Infiltration und Exfiltration beschäftigten.

## **2 Projektpartner und Endnutzer**

Zehn Projektpartner aus sieben europäischen Ländern haben das Projekt beantragt und durchgeführt. Die mit ihnen assoziierten Endnutzer bzw. Kooperationspartner förderten das Projekt durch die Nutzbarmachung von Betriebsdaten, den Zugang zu Messstellen sowie vereinzelt durch zusätzliche finanzielle Unterstützung (Tabelle 1).

Tabelle 1. Wissenschaftliche Partner und assoziierte Endnutzer.

<b>Wissenschaftlicher Partner</b>	<b>Kooperationspartner</b>
INSA de Lyon (Frankreich, Koordinator)	Stadt Lyon, Abteilung Wasser
EAWAG (Schweiz)	Stadt Zürich, Stadtentwässerung
Technische Universität Dresden (Deutschland)	Stadtentwässerung Dresden und Berliner Wasserbetriebe
Technische Universität Prag (Tschechische Republik)	Pražské vodovody a kanalizace a.s. (Wasserversorgung und Stadtentwässerung Prag)
DHI Hydroinform a.s. (Tschechische Republik)	
Hydroprojekt a.s. (Tschechische Republik)	
Middlesex University (Großbritannien)	Thames Water Utilities Ltd
LNEC (Portugal)	
Emschergenossenschaft (Deutschland)	Stadt Bottrop, Tiefbauamt und Stadt Gladbeck, Tiefbauamt
IRSA-CNR (Italien)	Stadt Rom, Abteilung Stadtentwässerung

### **3 Arbeitsbereich 1: Neue Messmethoden**

Infiltrations- und Exfiltrationsraten im Kanalnetz werden gewöhnlich mittels relativ ungenauer bzw. schlecht auflösender Methoden basierend auf Abflussmessungen, Analysen der Konzentrationsverläufe oder Bilanzierungen bestimmt. Eines der Kernziele des APUSS-Projektes bestand in der Entwicklung neuer Messmethoden, welche mit begrenztem Analyseaufwand auskommen und kein Umweltrisiko haben. Mittels eines optimierten Messprogramms, einer detaillierten Analyse der gemessenen Daten und der verbundenen Unsicherheiten wurde eine erhöhte Genauigkeit und eine bessere Qualität der Ergebnisse als bei herkömmlichen Methoden erwartet. Unter der Federführung der EAWAG wurden im Arbeitsbereich 1 Messmethoden entwickelt, welche

- die Exfiltration aus Kanälen

- die Infiltration in Kanäle
- die Infiltration und Exfiltration in Hausanschlussleitungen

quantifizieren.

Diese neu entwickelten Methoden basieren hauptsächlich auf der Analyse von Konzentrationsverläufen ausgewählter Abwasserinhaltsstoffe oder zugegebener Tracer sowie stabiler Isotope und wurden unter unterschiedlichen Abflussbedingungen, unter verschiedenen hydrologischen Bedingungen (konstanter und dynamischer Grundwasserstand, saisonale Effekte u.a.) und auf verschiedenen räumlichen Skalen (einzelne Haltung bis gesamtes Einzugsgebiet) getestet und validiert. Sie wurden in unterschiedlichen Entwässerungsgebieten der beteiligten Kommunen angewendet und mit herkömmlichen Methoden wie Abflussmessungen und Bilanzierungen verglichen. Standardisierte Verfahren für Datenbehandlung und Unsicherheitsanalysen wurden erstellt.

#### *Exfiltration aus Abwasserkanälen*

Es wurden zwei Tracermethoden entwickelt, um die Exfiltrationsrate in einem Kanalabschnitt mit einer Länge von ca. 1 bis 2 Kilometern zu messen. Die erste Methode nutzt Tracerpulse [2].

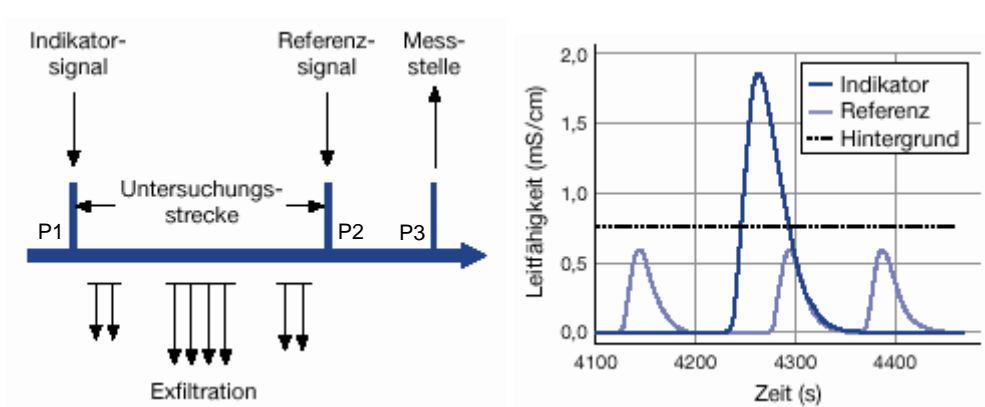


Abbildung 1. Prinzip der Exfiltrationsmessung (nach [2])

Das Grundprinzip (Abbildung 1) besteht darin, eine bekannte Masse  $M_1$  des Tracers (Indikator-signal) im oberen Punkt P1 des Kanalabschnittes zuzugeben und deren Durchgang im Auslass P3 zu messen. Eine Masse  $M_2$  (Referenz-signal) wird im Punkt P2 kurz oberhalb der Messstelle zugegeben und deren Durchgang ebenfalls gemessen. Davon ausgehend, dass zwischen P2 und P3 keine Exfiltration auftritt, kann die Exfiltrationsrate zwischen P1 und P2 mittels einer Massebilanzierung ermittelt werden. Die Rate ist proportional zum Anteil der Masse  $M_1$ , welche zwischen P1 und P2 verloren gegangen ist. Um die Unsicherheiten der Ergebnisse zu vermindern, werden in jeder Einzelmessung mehrere Indikator- und Referenzsignale genutzt. Der am häufigsten benutzte Tracer ist Kochsalz (NaCl), da es preiswert, sicher zu handhaben und einfach über online-Leitfähigkeitssonden zu messen ist. Allerdings gibt es eine natürliche, schwankende Hintergrundkonzentration im Abwasser, deren Veränderung während der Messung zu erhöhten Fehlern und Unsicherheiten führen kann. Als Alternative kommt Rhodamin in Frage. Die Hintergrundkonzentration ist normalerweise null und eine kontinuierliche Messung ist mittels online-

Fluoreszenzsonden möglich. Rhodamin wird nur durch Adsorption an Partikel und Sediment beeinflusst, wobei dieser Prozess bei einer Fließzeit von 10 bis 20 Minuten vernachlässigbar ist.

Die zweite Methode basiert auf einer kontinuierlichen Zugabe von Tracern [3]. Zwei Tracer (Lithiumchlorid als Indikatorsignal und Natriumbromid als Referenzsignal) werden in den Punkten P1 und P2 zugegeben. Dabei müssen konstante Abflussbedingungen vorliegen, damit sich im Punkt P3 für beide Tracer ein Konzentrationsplateau ausbilden kann. Diese Methode löst einige der Probleme der Tracerpulsmethode, erfordert allerdings einen erhöhten Ausrüstungs- und Vorbereitungsaufwand. Des Weiteren müssen Abwasserproben entnommen und im Labor analysiert werden, da zuverlässige online-Sonden zur Konzentrationsbestimmung der Tracer für den Einsatz in Abwasserkanälen noch nicht vorhanden sind.

Die Datenauswertung und die Unsicherheitsanalyse erfolgt bei beiden Methoden mittels standardisierter Protokolle, welche in die Statistik-Software R<sup>®</sup> implementiert wurden. Die Unsicherheitsanalyse basiert auf der Quantifizierung aller möglichen Fehler (Dosierung, Hintergrundkonzentration, Probenahme, Laboranalyse usw.). Die Messung von Exfiltrationsraten in einem sehr gut dokumentierten Abwasserkanal ist mit einer relativen Unsicherheit von ca. 2 % behaftet [4]. Unter normalen Bedingungen wurden Unsicherheiten von ca. 13 % erreicht. [5]. Beide Tracermethoden wurden im Rahmen des Forschungsprojektes in verschiedenen Einzugsgebieten getestet [5, 6, 7]. Zusätzlich wurden an der Middlesex University Laborversuche durchgeführt, um die Adsorption und die Interaktion der Tracer (v.a. Rhodamin) mit Feststoffen zu evaluieren. Mit einer

parallel zu einem Kanal geführten Versuchsanordnung wurden die Auswirkungen von Partikeln und Sedimenten auf die Exfiltration ermittelt. Dabei ist beobachtet worden, dass Kanalsedimente Schadensstellen verstopfen und damit zu einer bedeutenden Abnahme der Exfiltrationsrate beitragen [8], was die Untersuchungen von [9] bestätigt.

#### *Infiltration in Abwasserkanäle*

Es wurden zwei Messmethoden entwickelt, um Infiltrationsraten auf Teileinzugsgebietsebene zu ermitteln. Die erste Methode nutzt die natürlichen, stabilen Sauerstoffisotope  $^{16}\text{O}$  und  $^{18}\text{O}$  [10]. Unter der vereinfachten Annahme, dass Fremdwasser nur aus Grundwasser stammt und Schmutzwasser nur aus Trink- bzw. Leitungswasser, kann über eine Massenbilanzierung die Infiltrationsrate bestimmt werden, falls Trinkwasser und Grundwasser signifikant verschiedene Anteile an  $^{18}\text{O}$ -Isotopen haben. Die Methode ist relativ preiswert und einfach anwendbar. Sie ist allerdings auf Teileinzugsgebiete begrenzt, in denen Grund- und Trinkwasser voneinander verschiedene homogene isotopische Signaturen haben und in denen nur zwei Komponenten (eine Trinkwasserquelle, eine Grundwasserquelle) interagieren. Diese Bedingungen werden am besten erfüllt, wenn die Wassergewinnung aus höher gelegenen Talsperren erfolgt. Neben diesen Einschränkungen ist der hohe analytische Aufwand ein weiterer Nachteil dieser Methode, welche ebenfalls in verschiedenen Einzugsgebieten getestet wurde [6, 10].

Die zweite Methode kann in allen Gebieten angewandt werden, in denen hauptsächlich häusliches Abwasser anfällt. Sie basiert auf kontinuierlichen



Messungen von Durchfluss und CSB-Konzentration und der Analyse der aufgezeichneten Spektren. Unter der Annahme, dass Fremdwasser im Vergleich zum Schmutzwasser eine vernachlässigbare CSB-Konzentration hat, kann die Infiltrationsrate über Massenbilanzen bei gleichzeitiger Anpassung der Muster der Abfluss- und CSB-Konzentrationsganglinien ermittelt werden [11] (Abbildung 2). Wie bei der Exfiltrationsbestimmung wird auch hier eine umfassende Unsicherheitsanalyse durchgeführt.

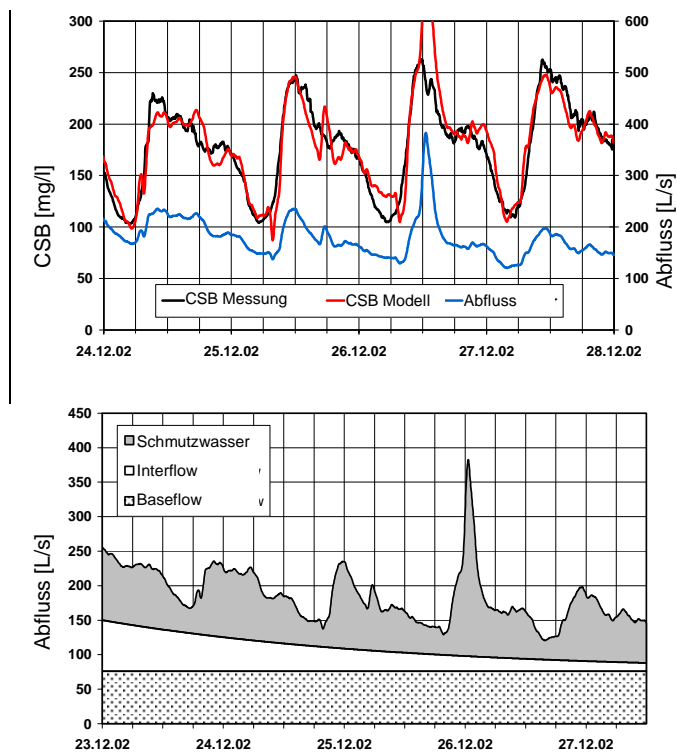


Abbildung 2. Vergleich der CSB-Messung mit Modellergebnissen (oben), Bestimmung der Infiltrationsrate (unten) (nach [12])

### *Infiltration und Exfiltration bei Hausanschlussleitungen*

Hausanschlussleitungen tragen wesentlich zur Infiltration und Exfiltration bei. Zum Ermitteln der entsprechenden Raten wurden von der Technischen Universität Prag volumetrische Methoden angewandt.

Für Infiltrationsmessungen wurden über einen Zeitraum von mehreren Tagen Abflussmessungen in nur wenige Grundstücke umfassenden Gebieten durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass hier die Infiltrationsrate mit dem Nachtminimumabfluss identisch ist.

Für Exfiltrationsmessungen wurden zwei Methoden getestet. Bei der Druckmethode wird die Hausanschlussleitung mittels einer Kanalblase abgesperrt und mit Wasser gefüllt. Aus der Absenkung der Wasserstandslinie wird dann die Exfiltrationsrate berechnet. Bei der Freispiegelmethode wird ein gegebenes Wasservolumen in die Leitung gegeben und am Ende aufgefangen. Die Exfiltration ergibt sich aus der Differenz beider Volumina. Die erste Methode überschätzt die Exfiltrationsrate aufgrund der Druckverhältnisse und berücksichtigt die intermittierende Charakteristik des Abflusses nicht, während die zweite einen einfachen Zugang zum stromabwärtigen Kanal erfordert. Zum Extrapolieren der gewonnenen Ergebnisse auf ein Einzugsgebiet mit vergleichbarer Struktur wurde eine Extrapolationsmethode entwickelt, welche auf der Auswertung von Kanal-TV-Protokollen und dem Vergleich der Schadensbilder basiert [13].

#### **4 Arbeitsbereich 2: Modelle und Werkzeuge**

Infiltrations- und Exfiltrationsmessungen in Kanälen und Hausanschlussleitungen liefern Daten und Ergebnisse, welche zusammengefasst und adäquat dargestellt werden müssen, um dem Betreiber eine klare Vorstellung der Situation in seinem Gebiet zu geben. Entsprechende Modelle und Softwarepakete wurden im Arbeitsbereich 2 von der TU Dresden und INSA Lyon entwickelt.

##### *Modelle*

Exfiltration wird auf Haltungsebene, Infiltration auf Teileinzugsgebietsebene gemessen. Daher wurden konzeptionelle Modelle anhand dieser räumlichen Skalen und auf Grundlage des „Leakage“-Ansatzes [14] entwickelt. Die Schlüsselparameter sind der Wasserspiegel im Kanal  $h_w$ , der Grundwasserspiegel  $h_{GWL}$  und der benetzte Umfang  $P_w$  bzw. die benetzte Fläche (Abbildung 3). Ein zusätzlicher Modellparameter beschreibt den Kanalzustand integral als Durchlässigkeitsbeiwert („Leakage Faktor“) und muss mittels Feldmessungen oder bei gutem Datenbestand zu Abflüssen in der Kanalisation und zur räumlich aufgelösten Grundwasserspiellage mittels Bilanzierung kalibriert werden. Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Messungen wurden genutzt, um den Ansatz für die Infiltration- und Exfiltrationsmodellierung anzuwenden und zu testen [5, 15]. So ergab die Monte Carlo Simulation von Leakage Faktoren auf Basis von Messungen der Exfiltration und Leckageflächen eine sehr gute Übereinstimmung von modellierten und gemessenen Exfiltrationraten einzelner Kanäle.

Da Messungen nicht im gesamten Einzugsgebiet durchgeführt werden können, 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 [16]. Damit ist es einerseits möglich Messorte so zu wählen, dass der auftretende spezifische Messfehler verringert wird. Dies entspricht grundsätzlich einer Kanalklassifikation unter Einbezug räumlicher Informationen. Bei Fallbeispielen mit künstlichen Infiltrationsraten betrug die Fehlerreduktion im Mittel 14 %, maximal 35 %. Andererseits können durch einen Vergleich der Kanaleigenschaften Messergebnisse extrapoliert werden. Diese Extrapolation ist allerdings mit hohen Unsicherheiten behaftet.

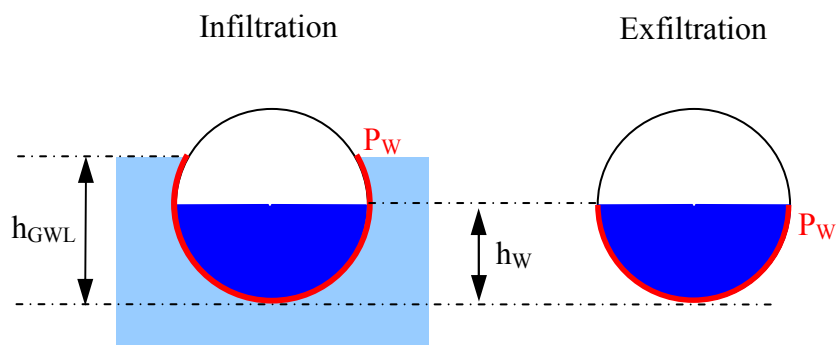


Abbildung 3. Schlüsselparameter für Infiltrations- und Exfiltrationsmodelle

### Software

Auf der Software AquaBase<sup>®</sup> (DHI Hydroinform a.s.) aufbauend wurde ein integriertes Werkzeug entwickelt, welches alle relevanten Daten eines Kanalnetzes wie geometrische Kenngrößen, Flächenmerkmale, Zeitreihen u. a. verwaltet, grafisch darstellt und gegebenenfalls interpoliert. Ebenfalls wurden

automatische Routinen für die Modellkalibrierung implementiert. Die Modelle und Werkzeuge wurden anhand großräumiger Testgebiete validiert.

### **5 Arbeitsbereich 3: Wirtschaftliche und betriebliche Aspekte**

Kommunen bzw. Kanalnetzbetreiber müssen Investitions- und Sanierungsstrategien zur Effizienzsteigerung und zum Erhalt ihres Kanalnetzes erarbeiten. Oft werden diese Strategien auf Basis begrenzter Informationen separater Betrachtung von Kanalisation und die Kläranlage entwickelt. Die Grundwasserkomponente wird häufig nicht berücksichtigt. Um die Betreiber bei ihrer Entscheidungsfindung zu unterstützen, wurden folgende Themen bearbeitet:

- Kostenstruktur der Kanalisation und Anwendungskosten der neuen Methoden (Emschergenossenschaft)
- infiltrations- und exfiltrationsspezifische Leistungsindikatoren (LNEC)
- Methode zum Vergleich von Investitionsstrategien (INSA).

#### *Kostenstruktur der Kanalisation und Anwendungskosten der neuen Methoden*

Ein an die Endnutzer und Betreiber in den verschiedenen Ländern Europas gerichteter Fragebogen zeigte, dass die Übertragung der technischen und finanziellen Gegebenheiten zwischen unterschiedlichen Städten aufgrund der großen Unterschiede in der Organisationsform und der Betriebspraxis nicht möglich ist. Es konnte jedoch ein Kostenansatz für Abwasserkanäle erstellt werden, welcher die sechs wesentlichen Kostengruppen (Material, Löhne und Gehälter, verschiedene Betriebskosten, Abfallbeseitigung, Abschreibung und Zinsen) umfasst und eine Basis für Kosten-Nutzwert-Analysen und

Benchmarkstudien darstellt. Die Anwendungsmöglichkeiten von Kosten-Nutzwert-Analysen wurden anhand von verschiedenen Beispielen untersucht (Sanierung gegenüber Neubau bei unterschiedlichen Tiefenlagen). Für den Vergleich wurden jährliche Betriebs- und Investitionskosten errechnet, welche aufzeigen, dass die Amortisationszeit der geplanten Maßnahme einer der wichtigsten Punkte der Entscheidungsfindung ist.

Für alle Messmethoden, welche im Arbeitsbereich 1 entwickelt worden sind, wurden ausführlich Kostenspannen (Personalkosten, Kosten für Messausrüstung und Verbrauchskosten) ermittelt. Diese müssen allerdings als Kosten für eine "Prototypmessung" betrachtet werden, welche bei routinemäßiger Anwendung geringer ausfallen. Betrachtet man nur rein ökonomische Aspekte sind herkömmliche Messmethoden vorteilhafter. Die im Projekt entwickelten Methoden erlauben jedoch Ergebnisse mit einer stark verbesserten Analyse der Unsicherheiten. Damit sind die erhaltenen Resultate belastbarer und deutlich aussagekräftiger.

#### *Infiltrations- und exfiltrationsspezifische Leistungsindikatoren*

Eine Anzahl spezifischer Leistungsindikatoren wurde definiert, um die Auswirkung von Infiltrations- und Exfiltrationsprozessen auf Kanalisationssysteme zu bestimmen. Sie wurden in drei Fallstudien angewandt, um Informationen über die Systemcharakteristik zu gewinnen, gemessene und modellierte Daten zusammenzufassen und diese in Leistungswerte zu überführen. Die Leistungsindikatoren wurden in Abhängigkeit der Kanalnetzeigenschaften und der gemessenen Infiltrations- und Exfiltrationsraten errechnet. Sie erlauben

einen standardisierten und objektiven Vergleich verschiedener Kanalsysteme und unterstützen die Prioritätensetzung für Sanierungs- und Investitionsmaßnahmen unter Einbezug von Infiltrations- und Exfiltrationsaspekten [17]. Eine Schnittstelle zwischen der Software zur Ermittlung der Leistungsindikatoren und des Softwarepakets AquaBase<sup>®</sup> (Arbeitsbereich 2) wurde implementiert.

#### *Methode zum Vergleich von Investitionsstrategien*

Wenn Infiltrations- oder Exfiltrationsprobleme erkannt werden, stehen dem Betreiber verschiedenen Lösungsstrategien zur Verfügung (Sanierung der Kanäle, Anpassung der Kläranlage, Bau von Speicherräumen oder eine Kombinationen von Maßnahmen). Eine verallgemeinerte Methode zum Vergleich dieser Investitionsstrategien wurde unter Einbezug der Modellierung von Kanalnetz und Kläranlage entwickelt. Sie berücksichtigt verschiedene Kriterien (Betrieb, Finanzen, Umweltaspekte u.a.) unter Betrachtung der Auswirkungen von Infiltration und Exfiltration. Die Grundlage der Vergleichsmethode war das multikriterielle Verfahren Electre III [18]. Bei der beispielhaften Anwendung der Methode stellte sich die Datenverfügbarkeit als der Schlüsselfaktor heraus. Abhängig von den ausgewählten Entscheidungskriterien kann die bevorzugte Investitionsstrategie von Fall zu Fall stark variieren.

## **6 Zusammenfassung**

Von 2001 bis 2004 wurde das EU-Projekt APUSS (Assessing infiltration and exfiltration on the Performance of Urban Sewer Systems) durchgeführt, welches sich mit Infiltration in und Exfiltration aus Kanalnetzen auseinandersetzte.

Es wurden neue Methoden zur Messung von Infiltrations- und Exfiltrationsraten entwickelt, welche auf Tracerversuchen basieren. Für alle Methoden stehen Standardverfahrensanweisungen, Unsicherheitsanalysen und Softwarelösungen zur Verfügung. Diese wurden unter unterschiedlichen Bedingungen und in unterschiedlichen Einzugsgebieten, in denen saisonale und witterungsbedingte Variationen der Infiltration und Exfiltration auftreten, getestet. Des Weiteren wurden volumetrische Methoden zum Messen von Infiltration und Exfiltration in Hausanschlussleitungen untersucht.

Konzeptionelle Modelle für die Simulation von Infiltration und Exfiltration auf unterschiedlichen zeitlichen Skalen wurden entwickelt und in verschiedenen Einzugsgebieten angewandt. Auf Basis von Verfahren der explorativen Datenanalyse wurden statistische Methoden entwickelt, welche die Identifikation von repräsentativen Teileinzugsgebieten und die Extrapolation von Messergebnissen auf größere Gebiete ermöglichen. Komplettierend wurde ein Softwarepaket zur Verfügung gestellt, welches relevante Daten von Abwassernetzen verwaltet, Messergebnisse und Zeitreihen von Grundwasserständen und Raten speichert, Infiltrations- und Exfiltrationsmodelle automatisch kalibriert und die Ergebnisse umfassend darstellt.

Die Kostenstruktur von Abwassernetzen wurde analysiert und eine Kosten-Nutzwert-Analyse für verschiedene Sanierungsstrategien erstellt. Spezifische Leistungsindikatoren mit Bezug auf Infiltration und Exfiltration wurden definiert und in einigen Fallstudien angewandt. Eine multikriterielle Methode zum Vergleich von Investitions- und Rehabilitationsstrategien wurde ausgearbeitet.



Alle Ergebnisse des Forschungsprojektes sind öffentlich zugänglich. Sie tragen zum besseren Verständnis über Infiltrations- und Exfiltrationsprozesse bei und unterstützen Entscheidungsfindungen mit genaueren und umfassenderen Erkenntnissen. Abschlussberichte, Standardverfahrensanweisungen für die Tracermessungen und Veröffentlichungen stehen auf der Projektwebseite <http://www.insa-lyon.fr/Laboratoires/URGC-HU/apuss/> bereit. Neben den Tests, die während des Projektes durchgeführt wurden, würde die Anwendung der Methoden und Werkzeuge durch verschiedene Betreiber und eine Rückmeldung zu einer weiteren Entwicklung und Verbesserung beitragen.

## **7 Dank**

Das Forschungsprojekt APUSS wurde von der Europäischen Kommission unter dem 5. Rahmenprogramm im thematisches Programm "Energie, Umwelt und nachhaltige Entwicklung" und der Leitaktion „Nachhaltige Bewirtschaftung der Wasservorräte und Wasserqualität“ gefördert (Vertrag EVK1-CT-2000-00072).

## **8 Literatur**

- [1] Schilling W., Bertrand-Krajewski J.-L., Eiswirth M., Krebs P., Saegrov S., Thévenot D.(2002): Integrated Urban Water Management Approaches: CityNet. International Conference "AQUAECO: Science in support of European water policies - Sustainability of aquatic ecosystems", Stresa, Italien, 26.-28. November.
- [2] Rieckermann J., Gujer W. (2002): Quantifying exfiltration from leaky sewers with artificial tracers. *Proceedings International conference "SOM*

- 2002 *Sewer Operation and Maintenance*", Bradford, UK, 26.-28. November.
- [3] Rieckermann J., Bares V., Kracht O., Braun D., Gujer W. (2003): Quantifying exfiltration with continuous dosing of artificial tracers. *Proceedings Hydrosphere conference*, Brno, Tschechien, 2.-3. October.
- [4] Rieckermann J., Borsuk M., Gujer W. (2005): Optimal experimental design for monitoring sewer leakage with tracers using decision analysis. *Proceedings 10<sup>th</sup> ICUD conference*, Kopenhagen, Dänemark, 21.-26. August.
- [5] Rutsch M., Rieckermann J., Krebs P. (2005): Quantification of sewer exfiltration – A review. *Proceedings 10<sup>th</sup> ICUD conference*, Kopenhagen, Dänemark, 21.-26. August.
- [6] De Bénédictis J. (2004): Mesurage de l'infiltration et de l'exfiltration dans les réseaux d'assainissement. Dissertation, INSA de Lyon, Villeurbanne, Frankreich.
- [7] Prigiobbe V., Giulianelli M. (2004): Design of tests for quantifying sewer leakages by QUEST-C method. *Proceedings 6<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage Modelling*, Dresden, Deutschland, 15.-17. September, 205-216.
- [8] Ellis J. B., Revitt D. M., Lister P., Willgress C., Buckley A. (2003): Experimental Studies of Sewer Exfiltration. *Water Science and Technology* **47**(4), 61-67.
- [9] Dohmann (1999): Wassergefährdung durch undichte Kanäle: Erfassung und Bewertung. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 3-540-64212-9.

- [10] Kracht O., Gresch M., De Bénédictis J., Prigiobbe V., Gujer W. (2003): Stable isotopes of water as a natural tracer for infiltration into urban sewer systems. *Geophysical Research Abstracts*, vol.5, 07852.
- [11] Kracht O., Gujer W. (2004): Quantification of infiltration into sewers based on time series of pollutant loads. *Water, Science & Technology* **52**(3), 209-218.
- [12] APUSS (2005): SOP Infiltration. [http://www.insa-lyon.fr/Laboratoires/URGC-HU/apuss/apuss\\_home.html](http://www.insa-lyon.fr/Laboratoires/URGC-HU/apuss/apuss_home.html)
- [13] Princ I., Kohout D. (2003): Infiltration and Exfiltration from House connections. Proceedings Water Management Task 2003, Špindlerův Mlýn, Tschechien, 23.-24. November, 60-63.
- [14] Karpf C., Krebs P. (2004a): Sewers as drainage systems – Quantification of groundwater infiltration. *Proceedings Novatech 2004*, Lyon, Frankreich, 6.-10. Juni, Bd. 2, 969-975.
- [15] Karpf C., Krebs P. (2004b): Application of the leakage model to assess exfiltration. *Water, Science & Technology* **52**(5), 225-232.
- [16] Franz T., Krebs P. (2005): Statistical methods towards more efficient infiltration measurements. *Proceedings 10<sup>th</sup> ICUD conference*, Kopenhagen, Dänemark, 21.-26. August.
- [17] Cardoso A., Prigiobbe V., Giulianelli M., Baer E., De Bénédictis J., Coelho S.T. (2005): Assessing the impact of infiltration and exfiltration in sewer systems using performance indicators: case studies of the APUSS project. *Proceedings 10<sup>th</sup> ICUD conference*, Kopenhagen, Dänemark, 21.-26. August.

[18] Roy, B. (1996): Multicriteria methodology for decision aiding. Dordrecht, Niederlande: Kluwer Academic Publishers.

**Autoren**

Dipl.-Ing. Torsten Franz, Dr.-Ing. Mandy Rutsch, Prof. Dr. Peter Krebs

Technische Universität Dresden

Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft

D-01062 Dresden

E-Mail: [Torsten.Franz2@mailbox.tu-dresden.de](mailto:Torsten.Franz2@mailbox.tu-dresden.de)

Dr.-Ing. Torsten Frehmann

Emschergenossenschaft / Lippeverband

Abteilung Strategisches Flussgebietsmanagement

Kronprinzenstr. 24

45128 Essen

E-mail: [frehmann.torsten@eglv.de](mailto:frehmann.torsten@eglv.de)

Dr. Jean-Luc Bertrand-Krajewski

URGC, INSA de Lyon

34 avenue des Arts

69621 Villeurbanne cedex

Frankreich

E-Mail: [jean-luc.bertrand-krajewski@insa-lyon.fr](mailto:jean-luc.bertrand-krajewski@insa-lyon.fr)

Maria Adriana Cardoso, LNEC, Lissabon, Portugal

Bryan Ellis, Middlesex University, London, Großbritannien

Mario Giulianelli, IRSA-CNR, Rom, Italien

Willi Gujer, EAWAG, Dübendorf, Schweiz

Zdenek Pliska, Hydroprojekt a.s., Prag, Tschechische Republik

Jaroslav Pollert, Technische Universität Prag, Prag, Tschechische Republik

Karel Pryl, DHI-Hydroinform, Prag, Tschechische Republik