

# Wie dicht ist unser Kanalnetz?

**Städtische Kanalnetze sind ständigen Belastungen durch Verkehr und Bodenbewegungen ausgesetzt. In Kombination mit der natürlichen Ermüdung des Materials entstehen kostspielige Schäden an der unterirdischen Infrastruktur, die die Exfiltration von Abwasser sowie die Infiltration von Grundwasser zur Folge haben. Die EAWAG entwickelt zurzeit neue Methoden, die es ermöglichen, diese unerwünschten Prozesse mit künstlichen und natürlichen Tracern zu quantifizieren. Die Informationen über das Ausmass von Ex- und Infiltration sollen eine effiziente Sanierungsplanung ermöglichen.**

Obwohl städtische Kanalnetze eine hohe Lebensdauer haben, entstehen mit der Zeit schadhafte Stellen, so dass die Systeme nicht mehr wasserdicht sind. Treten Leckstellen im Bereich des Grundwassers auf, infiltriert sauberes Grundwasser in die Kanalisation. Liegen solche Schäden über dem Grundwasserspiegel, versickert Abwasser in den umliegenden Boden.

Die Exfiltration von Abwasser aus undichten Kanalnetzen wird als ernst zu nehmende Gefährdung für Mensch und Umwelt eingestuft, weil eine direkte Trinkwassergefährdung entstehen kann [1]. Die Infiltration von Grundwasser ist ebenfalls problematisch, denn damit wird das Abwasser verdünnt und die Kläranlage hydraulisch unnötig belastet. Beide Prozesse werden in der Regel erst als Problem wahrgenommen, wenn sie beträchtliche Ausmasse annehmen. Das ist vor allem darauf zurückzuführen, dass Kanalisationen im Untergrund verlegt sind und

die Prozesse «unsichtbar» ablaufen. Ausserdem sind die traditionellen Messmethoden aufwändig und liefern relativ unsichere Ergebnisse (siehe Kasten).

Aus diesen Gründen erarbeitet die EAWAG derzeit neue Methoden zur Bestimmung des in- und exfiltrierenden Wassers. Dies geschieht im Rahmen des Anfang 2001 gestarteten europäischen Forschungsprojekts APUSS («Assessment of the Performance of Urban Sewer Systems»), das darauf abzielt, die Funktionstüchtigkeit städtischer Kanalsysteme anhand der Schlüsselprozesse Infiltration und Exfiltration zu beurteilen. Mit Hilfe der dabei entwickelten Methoden soll es später möglich sein, effizientere Sanierungskonzepte für städtische Kanalisationen zu erarbeiten.

Die neuen Methoden beruhen auf dem Einsatz von natürlichen und künstlichen Tracern (siehe Kasten S. 30): Über die Zu- oder Abnahme der Tracer wird die relative Menge des in die Kanalisation zufließenden oder aus der Kanalisation abfließenden Wassers bestimmt.

## Exfiltrationsmessungen mit künstlichen Tracern

Bei der Methode zur Messung der Exfiltration werden künstliche Tracer verwendet, die dem Abwasser beigefügt werden (siehe Kasten S. 30). Ist das Kanalnetz undicht, wird mit dem versickernden Abwasser auch ein Teil des Tracers verloren gehen. Dieser Verlust kann in direkte Beziehung zur Exfiltration gesetzt werden, d.h. wenn in einer Kanalstrecke 10% des markierten Abwas-

serters versickern, gehen auch 10% des Tracers verloren [2]. Wesentliche Prinzipien der Methode sind (Abb. 1):

- Der Tracer wird an zwei Punkten, zu Beginn (Indikatorsignal) und am Ende der Untersuchungsstrecke (Referenzsignal), zudosiert. Das Indikatorsignal wird durch die Exfiltration in der Untersuchungsstrecke verringert und zeigt an, ob Exfiltration auftritt oder nicht. Das Referenzsignal wird nicht durch die Exfiltration beeinflusst, es dient als Referenz, um die Verringerung des Indikatorsignals zu quantifizieren. Wichtig ist, dass Tracer und Abwasser vollständig durchmischt sind.

- Wenn die Tracer stossartig zugegeben werden, kann eine einzige Substanz verwendet werden, weil sich an der Messstelle

### Traditionelle Messmethoden

Wie viel Abwasser exfiltriert, wird in der Regel anhand von Dichtigkeitsprüfungen mit Wasser oder Luft abgeschätzt, die jedoch sehr kostspielig sind [3]. Ausserdem geben sie lediglich Aufschluss über die Exfiltration an individuellen Schadstellen, da die Extrapolation der Messwerte über ein ganzes Netz zu unsicher ist. Eine umfassende Bestimmung der exfiltrierenden Abwassermenge, die für eine effiziente Sanierungsplanung herangezogen werden könnte, ist deshalb mit den klassischen Methoden nicht praktikabel.

Um die Infiltration von Grundwasser zu bestimmen, werden traditionell einfache Durchflussmessungen im Kanalnetz durchgeführt [4]. Dabei geht man von der Annahme aus, dass zur Zeit des geringsten Durchflusses – meist in der Nacht von Sonntag auf Montag – kein Schmutzwasser, sondern nur noch so genanntes sauberes Fremdwasser im Kanal fliesst. Allerdings wird ihre Anwendung in der heutigen Zeit immer fragwürdiger: Einerseits werden Wasser verbrauchende Geräte, um Kosten zu sparen, auch von Privathaushalten verstärkt in den Nachtstunden betrieben. Andererseits dehnen sich die Kanalnetze in den wachsenden Ballungsräumen immer weiter aus. In einigen Abschnitten der Kanalisation fliesst so gegebenenfalls zu jeder Tages- und Nachtzeit Schmutzwasser, weil die Abwasserwellen aus den unterschiedlich weit entlegenen Stadtteilen dort zeitlich versetzt eintreffen.

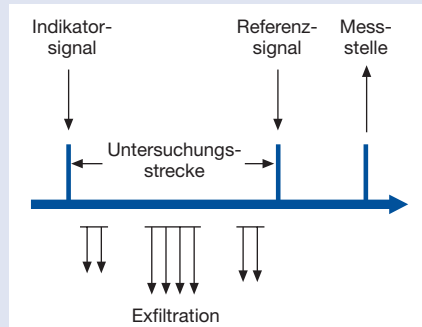


Abb.1: Schematischer Aufbau eines Experiments zur Quantifizierung der Exfiltration.

## Künstliche und natürliche Tracer

**Künstliche Tracer**, z.B. einfache oder fluo-reszierende Farbstoffe, Partikel, Chlorid in Form von Natriumchlorid oder Lithium in Form von Lithiumchlorid, sind Stoffe, die man dem Wasser an einer Stelle zugibt und deren Vorkommen an einer zweiten Stelle gemessen werden. Sie sollten:

- ein möglichst geringes natürliches Vorkommen haben,
- noch in geringsten Konzentrationen nachweisbar sein,
- sich nicht an andere Stoffe binden,
- nicht toxisch sein,
- in Wasser gut löslich und mischbar sein,
- kostengünstig in der Anwendung sein.

**Natürliche Tracer** sind spezifische Eigenschaften des lokalen Trink-, Grund- oder Abwassers, z.B. deren stabile Isotopenzusammensetzung, mit denen man die einzelnen Wassertypen voneinander unterscheiden kann.

pulsartige Tracerdurchgangskurven ergeben (Abb. 2). Die Messungen werden direkt im Abwasserstrom mit so genannten *In-line*-Sonden durchgeführt, die eine hohe zeitliche Auflösung ermöglichen. Durch die hohe Dynamik des Messsignals wird eine Unterscheidung von Indikatorpuls, Referenzpuls und dem natürlichen Hintergrund in einer Messung möglich. Bei einer kontinuierlichen Zugabe der Tracer müssten hingegen zwei verschiedene Substanzen zudosiert werden, was einen zweifachen Messfehler zur Folge hätte.

■ Die Zugabe des Tracers an der Indikator- und an der Referenzstelle erfolgt zeitlich versetzt und zwar derart, dass die beiden Pulse gemeinsam an der Messstelle ankommen und sich die gemessenen Peaks überlappen (Abb. 2). Dies hat den Vorteil, dass Fehlerquellen (z.B. Veränderungen in

der Abwasserzusammensetzung, Fehlfunktion des Messgerätes) für beide Tracersignale in gleichem Mass gelten und sich somit eliminieren.

■ Da bekannt ist, wieviel Tracer an der Indikatorstelle zugegeben wurde, kann anhand der Fläche unter dem Referenzsignal geschätzt werden, wie gross die Fläche unter dem Indikatorsignal sein sollte, falls kein Abwasser versickert ist. Vergleicht man nun das tatsächlich gemessene Indikatorsignal mit dem berechneten Indikatorsignal, kann eine Aussage darüber gemacht werden, ob die Kanalisation im untersuchten Bereich dicht ist oder nicht.

## NaCl als Exfiltrationstracer

Abbildung 2 zeigt ein typisches Experiment, bei dem NaCl als Salztracer verwendet wurde. Es wurden Leitfähigkeitssonden eingesetzt, die indirekt die NaCl-Konzentration im Wasser messen. Im vorgestellten Experiment ist die Untersuchungsstrecke 285 m lang, der mittlere Abfluss bei Trockenwetter beträgt 25 l/s, die mittlere natürliche Hintergrundkonzentration der Leitfähigkeit beträgt 0,8 mS/cm; generell sollte eher über lange Distanzen (bis hin zu mehreren Kilometern) gemessen werden, da so möglichst viele potenzielle Leckagen erfasst werden. Vor dem Start des Experiments sollte der Durchfluss und die Leitfähigkeit des Abwassers über zwei Tage hinweg beobachtet werden. Danach richtet sich, wie viel NaCl an den beiden Zugabestellen zudosiert wird. Bei dem vorgestellten Experiment wurden 1,9 kg NaCl an der Indikatorstelle zugegeben und  $3 \times 0,4$  kg NaCl ca. 10 Minuten versetzt an der Referenzstelle. Die Auswertung der Ergebnisse ergab, dass die Kanalisation im untersuchten Bereich nicht undicht war.

## Infiltrationsmessungen mit natürlichen Tracern

Zur Quantifizierung der Infiltration ist der Einsatz von künstlichen Tracern nicht möglich. Die homogene Markierung ganzer Grundwasserleiter ist praktisch nicht durchführbar und zudem aus Umweltschutzgründen unerwünscht. Vielmehr werden spezifische Eigenschaften des lokalen Trink-, Grund- und Abwassers als natürliche Mischung- oder Verdünnungstracer genutzt (siehe Kasten).

Direkte natürliche Tracer können dabei allerdings nur in Ausnahmefällen gefunden werden, da im Abwasser generell eine Vielzahl von Stoffen als Teil der Verschmutzung vorhanden ist. Diese Stoffkonzentrationen schwanken im Tagesverlauf stark und überdecken so das natürliche Tracersignal. Ein

Beispiel für ein günstiges Tracersystem ist hingegen die Isotopenzusammensetzung des Wassers. Sie wird unter anderem bestimmt durch die topographische Höhe, in der Grund- oder Oberflächenwässer durch Niederschläge neu gebildet werden. Diese Methode kann in speziellen Fällen angewendet werden, z.B. dann, wenn eine Gemeinde Trinkwasser aus einem höher oder tiefer gelegenen hydrologischen Einzugsgebiet nutzt. Dann ergeben sich deutliche Unterschiede in der Isotopenzusammensetzung des Trink-, Ab- und Grundwassers, die eine Bestimmung des Fremdwasseranteils ermöglichen.

Für den allgemeinen Anwendungsbereich scheint uns eine andere Methode aussichtsreicher: Sie bestimmt den Anteil des infiltrierten Wassers durch eine kombinierte Analyse des zeitlichen Verlaufes der Schmutzstoffkonzentrationen und der Abflussganglinie. Ein geeigneter einfacher Summenparameter zur Charakterisierung der Schmutzstoffkonzentration ist zum Beispiel der chemische Sauerstoffbedarf (CSB). Er gibt an, wie viel Sauerstoff zur vollständigen Oxidation der im Abwasser enthaltenen organischen und anorganischen Schmutzstoffe benötigt wird. Moderne *In-line*-Sonden erlauben eine direkte Bestimmung von CSB-Äquivalenten anhand der Lichtabsorption im ultravioletten Bereich. (Abb. 3). Sie zeichnen die Werte mit hoher zeitlicher Auflösung auf und liefern so die Grundlage für eine differenzierte Daten- und Fehleranalyse.



J. Rieckermann, EAWAG

Exfiltrationsexperiment: Zugabe der NaCl-Lösung als Referenzsignal.

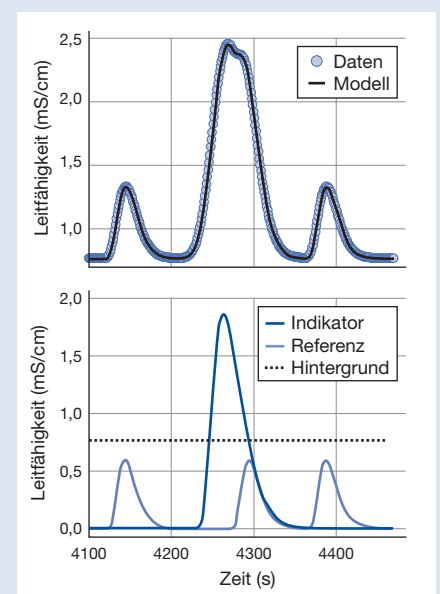


Abb. 2: Resultate eines Experiments zur Bestimmung der Exfiltration. Als künstlicher Tracer wurde NaCl verwendet. Oben: Gemessene und simulierte Tracersignale. Unten: Zerlegung des gemessenen Signals in Indikator- und Referenzsignal unter Abtrennung des natürlichen Hintergrunds.

## Schmutzstoffe als Infiltrations-tracer

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse einer Messkampagne, die im Winter 2002/2003 im Zulauf einer Verbandskläranlage mit ca. 23 500 angeschlossenen Einwohnern durchgeführt wurde. Die CSB-Äquivalentkonzentrationen und die Menge des anfallenden Abwassers wurden mit einer zeitlichen Auflösung von drei Minuten registriert. Die Datenauswertung erfolgte mit Hilfe eines Modells für die Mischungsrechnung unter Verwendung beider Messdaten. Hierzu müssen zusätzliche Modellannahmen anhand von externen Informationen getroffen werden: Der CSB-Wert des infiltrierenden Fremdwassers wird als vernachlässigbar gering angenommen. Die Infiltrationsmenge wird in einen konstanten Basisabfluss und einen im Zeitverlauf exponentiell abnehmenden Zwischenabfluss unterteilt. Im hier gezeigten einfachsten Fall wird zudem vorausgesetzt, dass die durchschnittliche CSB-Konzentration im eigentlichen Schmutzwasseranteil annähernd konstant ist. Die Variation der CSB-Konzentration im untersuchten Abwasser ergibt sich dann aus dem Tagesgang des Schmutzwasseranfalls (24-h-Rhythmus) und dem sich nur langsam ändernden Fremdwasserzufluss (exponentielle Abnahme nach einer niederschlagsreichen Phase). Ein kurzes Regenereignis am 26.12.2002 (sprunghafte Zunahme des Abwasseranfalls zur Mittagszeit) wird von dem Modell hingegen nicht erfasst.

### Sind die Methoden praxistauglich?

Damit die Methode zur Messung der Exfiltration tatsächlich in den unterschiedlichsten Kanalsystemen eingesetzt werden kann, erarbeiten wir derzeit eine methodische Wegleitung. Sie soll es ermöglichen, die güns-

tigste Kombination von Tracer, Messtechnik und Dosierungsprotokoll zu finden, um in der Praxis ein möglichst optimales Experiment durchführen zu können. Die Auswertung unserer Feldexperimente lässt darauf schliessen, dass die Detektionsgrenze für die Exfiltration zurzeit bei ca. 10% liegt. Da in der Regel mit sehr geringen Abwasserverlusten von weniger als 5% zu rechnen ist, muss die Methode eine höhere Genauigkeit aufweisen, um für die Praxis relevant zu sein.

Ob die von uns vorgeschlagene Methode zur Messung der Infiltration dem praktischen Anwender einen Informationsgewinn im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren bietet, steht und fällt mit der Zulässigkeit der getroffenen Modellannahmen. Um die angestrebte Genauigkeit von etwa 10 bis 20% zu erreichen, bedarf es zudem genauen und präzisen Messungen von Schmutzstoffkonzentrationen und Durchfluss. Zur weiteren Validierung werden wir unseren Ansatz mit den Ergebnissen der Isotopenmethode vergleichen.

Beide Methoden werden zurzeit im Rahmen des Projekts APUSS in unterschiedlichen Ländern und an verschiedenen Kanalisationssystemen erprobt.

### Ex- und Infiltration als «Benchmarking»-Instrumente

Könnten sich die Parameter Exfiltration und Infiltration national oder international als Indikatoren etablieren, würde dies ein «Benchmarking» von Entwässerungsnetzen ermöglichen. Eine vergleichende Bewertung des strukturellen Zustandes verschiedener Kanalnetze ist bislang äusserst schwierig. Zum einen dauert die Bestandsaufnahme eines gesamten Netzes mit der klassischen Kamerabefahrung in der Regel Jahre. Zum anderen ist die Klassifizierung der Schadensfälle je nach verwendeter Technik und

ausführender Person nicht einheitlich und deshalb nur bedingt vergleichbar. Ein objektiver Vergleich von verschiedenen Kanalnetzen oder Betriebsstrategien ist deshalb erst möglich, wenn Verfahren vorhanden sind, die in akzeptabler Zeit reproduzierbare Ergebnisse liefern. Ob unsere Methoden in dieser Beziehung Abhilfe schaffen können, wird aber vor allem von der erzielbaren Genauigkeit abhängen.



Jörg Rieckermann, Ingenieur, beschäftigt sich im Rahmen seiner Dissertation in der Abteilung «Ingenieurwissenschaften» mit der Entwicklung einer Methode zur Messung der Exfiltration mit künstlichen Tracern.

Koautoren: Oliver Kracht, Willi Gujer

[1] Bishop P.K., Misstear B.D., White M., Harding N.J. (1998): Impacts of sewers on groundwater quality. *Journal of the Chartered Institution of Water and Environment Management* 12, 216–223.  
[2] Rieckermann J., Gujer W. (2002): Quantifying exfiltration from leaky sewers with artificial tracers. *Proceedings of the International Conference on «Sewer Operation and Maintenance 2002»*. Bradford, UK.  
[3] Stein D. (1999): *Instandhaltung von Kanalisationen*. Ernst & Sohn, Berlin, 948 S.  
[4] Schweizer Bundesamt für Umweltschutz (1984): *Methoden zur Bestimmung der Fremdwassermenge in Kanalisationen und Kläranlagen*. Bundesamt für Umweltschutz, Bern, 51 S.

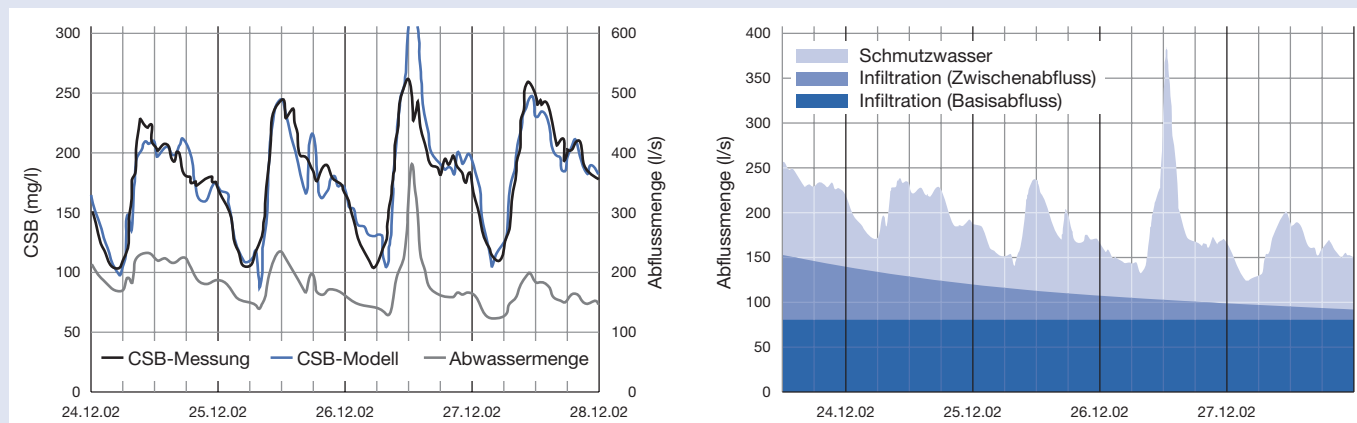


Abb. 3: Resultate einer Messkampagne zur Bestimmung der Infiltration. Als natürlicher Tracer wurde der chemische Sauerstoffbedarf (= CSB) gemessen. Links: Vergleich der CSB-Messungen mit Modellergebnissen. Rechts: Identifikation verschiedener Fremdwasseranteile. Der Fremdwasseranteil machte in diesem Bereich der Kanalisation im Mittel etwa 60% des gesamten Abwasserflusses aus.