

Undichte Kanäle und ihre Auswirkungen auf Boden und Grundwasser - Detektion, Quantifizierung und Bewertung

Leaking sewers and the consequences for soil and groundwater - detection, quantification and assessment

Mit 3 Abbildungen und 4 Tabellen

ULRICH HAGENDORF

Zusammenfassung: Erhebungen zeigen, daß Kanalnetze z.T. starke bauliche Mängel aufweisen und daß durch Undichtigkeiten Grundwasser- und Bodenkontaminationen zu befürchten sind. Die Auswertung von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Detektion und Quantifizierung von Abwasserexfiltrationen aus undichten Kanälen durch hydrogeologisch-hydrogeochemische, hydraulische und geophysikalische Methoden ermöglicht eine zusammenfassende Bewertung im Hinblick auf Anwendung und Aussage der jeweiligen Verfahren. Ergebnisse aus hydrochemischen und geochemischen Untersuchungen zur Exfiltration von überwiegend häuslichem Schmutzwasser werden dargestellt. Als Randbedingungen sind unterschiedlichste Schadensarten und -klassen in Sohl-, Kämpfer- und Scheitellagen des Rohrquerschnitts sowie die Untergrundverhältnisse, die schwer bis gut durchlässige Sedimente bei Grundwasserständen < 50 cm bis 500 cm unterhalb der Rohrsohle umfassen, berücksichtigt. Anhand von Leitparametern wurden Abwasserinhaltsstoffe in der unmittelbaren Umgebung, insbesondere von schweren Schäden nachgewiesen. Sie sind auf eine nur wenige dm mächtige Infiltrationsschicht beschränkt, im Grundwasser jedoch nicht belegt. Umweltrelevante Stoffbelastungen schränken die multifunktionelle Nutzungsmöglichkeit von Aushubmassen bei Kanalbaumaßnahmen ein.

Abstract: Surveys have shown that sewer systems are quite often damaged, causing a pollution hazard for soil and groundwater. Hydrogeological, hydrogeochemical, hydraulic and geophysical methods for the detection and quantification of leaked sewage have been compared. The main results of the project are illustrated using case studies on liquids leaked from sewers carrying mainly domestic waste water and exhibiting different types and categories of damage at the bottom, sides and top of the pipe. The condition of the underlying soil was characterized, i.e. sediments of variable permeability, ranging from good to poor, with groundwater levels of less than 50 cm to as much as 500 cm below of the pipe bottom. Using indicator parameters, waste water constituents were detected in the immediate vicinity of categories 0, 1 and 2 damage. Infiltration is limited to a zone only a few tens of centimetres thick, so that the occurrence of environmentally relevant concentrations is assumed to be mainly confined to the damage categories mentioned. Nevertheless, such contamination limits the possible uses of soil excavated during sewer reconstruction.

1 Einleitung

Schadhafte Kanäle widersprechen den Vorgaben an die Abwasserbeseitigung und den Betrieb von Abwasseranlagen (§§ 18 a Abs. 1 Wasserhaushaltsgesetz - WHG) sowie denen des Grundwasserschutzes (§ 34 Abs. 1 WHG). Obwohl eindeutige rechtliche Anforderungen an Bau und Betrieb gestellt sind, wurde durch Kanalinspektionen nachgewiesen, daß vor Jahrzehnten als auch in jüngerer Vergangenheit verlegte Abwasserkanäle bauliche Mängel aufweisen und damit den heutigen Anforderungen nicht mehr genügen. Die tatsächlichen Auswirkungen von Schäden an Abwasserleitungen auf Grundwasser und Boden sind bislang nur teilweise bekannt,

großräumige diffuse Untergrundkontaminationen wurden befürchtet.

Neben dem Aufzeigen der Gefahren, die aus der Abwasserversickerung resultieren, vor allem der unkontrollierten und nicht sachgemäßen Versickerung, darf die Fähigkeit des Bodens zu sehr komplexen und weitgehenden Reinigungsmechanismen nicht aus der Betrachtung heraus genommen werden. Unter der Abwasserversickerung ist das Einsickern (Infiltration) und Durchsickern von Abwasser in bzw. durch den Porenraum eines Lockergesteinskörpers zu verstehen. Nach überwiegend vertikaler Passage des wasserungesättigten

Sickerraumes wird die Grundwasseroberfläche erreicht.

Vor diesem Hintergrund wurden Verbundprojekte unter Beteiligung von Kommunen, Unternehmen und Forschungsinstitutionen gefördert (FUHRMANN & VOLLMER 1992). Neben prototypischen Demonstrationsvorhaben des neuesten Standes der Technik zur Sanierung undichter Kanäle wurden F- und E-Aktivitäten zur Detektion und Quantifizierung von Kontaminationen aus undichten Kanälen und Methoden zur Bewertung von Schäden bezüglich der Sanierungsdringlichkeit bewilligt.

2 Untersuchungs- und Kenntnisstand

2.1 Detektionsmethoden zum Nachweis und zur Bewertung von Kanalschäden

Die Entwicklungsarbeiten von Meß- und Detektionsmethoden zum Nachweis der Kanalundichtigkeiten basierten im wesentlichen auf hydro- und geochemischen, hydraulischen und geophysikalischen Untersuchungsmethoden (Tab. 1). Während für erstere insbesondere auf die Entnahme vergleichbarer Sedimentproben aus neben Abwasserkanälen geteufte Rammkernsondierungen oder Sedimententnahmen bei Kanalbaumaßnahmen zurückgegriffen wurde, schließen die hydraulischen Messungen Markierungsversuche zur Simulation der Schadstoffausbreitung in Testfeldern und Abwasserexfiltrationsmessungen ein. Die geophysikalischen Verfahren greifen auf klassische Methoden zurück (u.a. Geoelektrik, Akustik, Radiometrie, Thermometrie), die anwendungsorientiert für hochsensible Erkennungs-, Steuerungs- und Navigationssysteme weiterentwickelt wurden.

Durch **geochemische und hydrochemische Bestandsaufnahmen** wurde in der Regel kein abwassertypisches Stoffspektrum (HAGENDORF & KRAFFT 1996; EISWIRTH et al. 1994; HARTMANN et al. 1996; BERICHT 1991; BERICHT 1992) nachgewiesen, das zur Auswirkung von Kanalschäden auf Grundwasserkontaminationen herangezogen werden kann. Die Folgen unerlaubter Einleitungen persistenter und mobiler Stoffe (z.B. leichtflüchtige Halogenkohlenwasserstoffe (LHKW), adsorbierbare organische Halogenverbindungen (AOX), Benzol, Toluol, Xylol (BTX)) in defekte Abwasserkanäle führte allerdings zu schwersten Grundwasser- und Bodenkontaminationen (HAGENDORF 1992; TOUSSAINT 1989). Umweltrelevante Meßwerte durch Abwasserexfiltrationen im Sediment sind nach HAGENDORF & KRAFFT (1996) und HARTMANN et al. (1996) nur auf die unmittelbare Umgebung der Schäden (Infiltrationszone) begrenzt. Sie bestätigen die Ergebnisse von RETTINGER (1992) hinsichtlich der Ausbildung einer Schicht mit hohem organischem Anteil und verstärkter Sorptionskapazität bei Einleitung von Abwasser in die „unbelastete Bodenzone“.

Von den **hydraulischen Verfahren** stellen nach EISWIRTH et al. (1994) Markierungsversuche mit unterschiedlich reaktiven Tracern eine ideale Methode dar, die Verteilung möglicher organischer und anorganischer Sorptionsträger im Untergrund mit geringen Sorptionskapazitäten, die für eine Schadstoffausbreitung wesentlich sind, aufzuzeigen und zu detektieren.

Quantitative Erkenntnisse zur Belastung des Untergrundes mit Abwasser wurden aus Untersuchungen zur Exfiltration vor Ort an in Betrieb befindlichen Kanälen, großtechnischen Versuchsan-

Tab. 1: Detektionsmethoden zu Nachweis und Bewertung von Kanalschäden nach Literaturangaben.

Verfahren	Anwendung		Nachweis		Ergebnis	Bewertung
	innerhalb des Kanals	außerhalb des Kanals	Abwasser	Kanal		
Geo-/hydrochemisch SEDIMENT						
Rammkernsondierung		X	Inhaltsstoffe		-	schadensspezifisch
Baumaßnahme		X	Inhaltsstoffe		+	
GRUNDWASSER		X	Inhaltsstoffe		(+/-)	
Hydraulisch						
Tracer		X	Fließwege		+	schadensspezifisch
Exfiltration	X		Mengen		+	
Geophysikalisch						
AKUSTIK						
Schallreflexion		X		Dichtigkeit	+	schadensspezifisch
Ultraschall	X			Festigkeit	(+)	
THERMOMETRIE		X				
GEOELEKTRIK						
Georadar	X	X		Dichtigk./Festigk.	(+)	schadensspezifisch
Eigenpotential (u.a.)		X	Fließwege		+	
RADIOMETRIE						
Neutronen		X	Wassergehalt		-	

+ Detektionsmethode positiv

- Detektionsmethode negativ

() Detektionsmethode randbedingungsabhängig

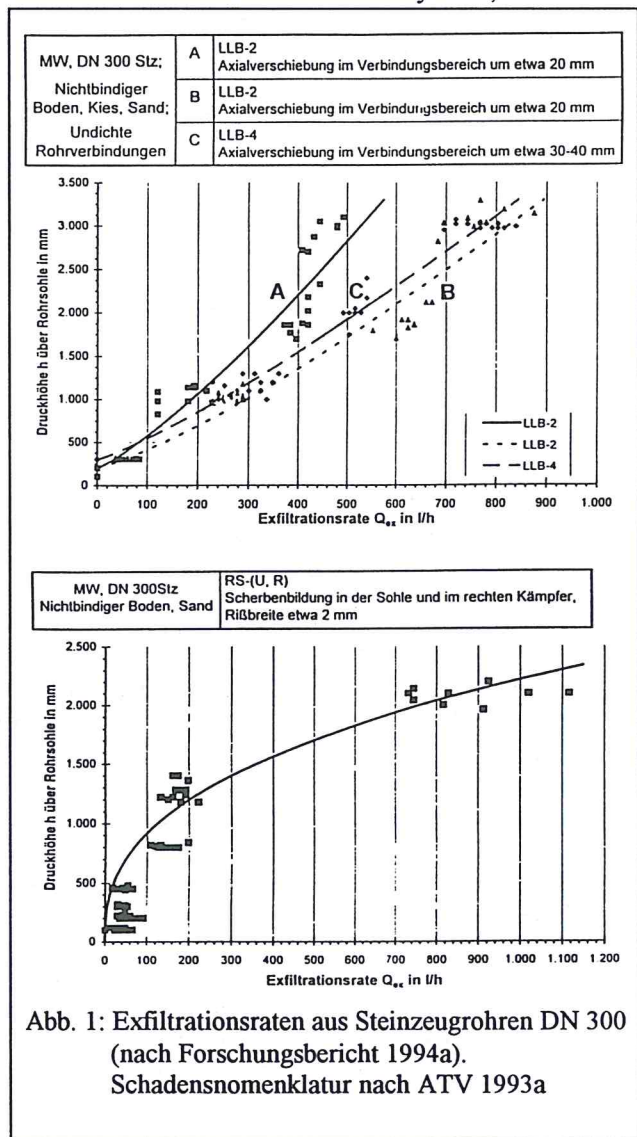
lagen und Modellsystemen im Labor gewonnen. Die Ergebnisse sind in Abhängigkeit von den hydraulischen Randbedingungen wie Rohrdurchmesser, Einfluß von Schwere, Lage und Art definierter Schäden auf die Exfiltrationsrate, unterschiedliche Füllhöhen bis Überstaubedingungen und Untergrundverhältnisse in HARTMANN et al. (1996) und in Forschungsberichten (1994a, 1994b) dokumentiert. Die Unterschiede der Exfiltrationsmengen sind teilweise sehr groß. Abwasserfreisetzungen aus typischen Schadensbildern wie Riß- und Scherbenbildung sowie undichter Muffen, liegen bei 1/4 bis 1/2 Füllung des Rohres in Größenordnungen von $ml/(h \cdot m)$ bis zu $l/(h \cdot m)$ oder bei einer Scheitelfüllung des Rohres von bis zu $130 l/(h \cdot m)$, wie exemplarisch Abb. 1 verdeutlicht. Druckhöhen über Rohrsohle, die den Rohrdurchmesser bis um das 10-fache im Fall von Rückstauereignissen übersteigen, führen zu Exfiltrationen von bis zu $1 m^3/(h \cdot m)$.

Das Spektrum der **geophysikalischen Verfahren**, die sowohl von der Oberfläche aus als auch im Kanalinnern eingesetzt werden, erstreckte sich auf akustische und geoelektrische Verfahren sowie auf thermometrische und radiometrische Methoden. Mittels Schallreflektion (Forschungsbericht 1995a, 1995b) wurden typische Signalmuster intakter und unterschiedlich beschädigter Rohre ermittelt und diese mit denen der optischen Kanalinspektion (TV-Kamera) verglichen. Außerdem kann mit einem unterirdisch angewandten Ultraschallverfahren aus der Laufzeit des Signals auf Materialfestigkeit und Wandkorrosion geschlossen werden. Die Arbeiten sind soweit fortgeschritten, daß mit in situ-Messungen die Leistungsfähigkeit der Methode an definierten Schäden in Steinzeugrohren DN 300 und Betonrohren DN 400 erprobt werden konnte. Weiterführende Messungen zum Einsatz der Schallreflexionsanalyse bei Überprüfungen der Bettung neuverlegter Abwasserkanäle stehen noch

aus. Ebenso fehlen Vergleichsbetrachtungen der Schallreflexions- und Ultraschallanalyse mit von der TV-Inspektion gelieferten Schadensbildern geringerer Informationsdichte (u.a. Rißbreite, Innenkorrosion, Verschleiß der Rohrrinnenwand, nicht ordnungsgemäß hergestellte Stutzen).

Die Detektion durch geoelektrische Messungen führte zur Entwicklung und Erprobung eines Radarsystems, das Schäden an Kanalsystemen

(ZINNECKER 1994; Daimler-Benz Aerospace AG 1995) bei Einsatz eines Georadars von der Erdoberfläche aus (Tiefenradare) und im Kanal („Kanalmolch“) auffinden und beurteilen soll. Durch die Testmessungen konnte die prinzipielle Eignung des Georadars nachgewiesen werden, um Kanalschäden zu detektieren und nach einer entsprechenden Verarbeitung der Radargramme die Schadenslage zu interpretieren. Die Messungen mit dem „Kanalmolch“ erlauben die Aussage, daß ein im Rohrrinnen eingesetztes Radar durchaus geeignet ist, einen Beitrag für die Schadenserkenkung zu liefern, der mit einem TV-Aufnahmeverfahren nicht erreicht werden kann. Ein solches Verfahren ist jedoch allein nicht sinnvoll einsetzbar. Es sollte zur Vorklärung der Verhältnisse (Änderung im Rohrdurchmesser, Ver-



schmutzungsgrad, usw.) eine TV-Kamerabefahrung vorausgehen. Bei schwierigen Boden- (u.a. Durchlässigkeit, Dichte, Rohrleitungen) und Rohrverhältnissen (z.B. dicke, feuchte und u. U. leitfähige, nicht entfernbare Sinterbeläge), werden sich Probleme mit der Eindringtiefe der Hochfrequenzenergie ergeben und damit die Detektion erschweren oder sogar unmöglich machen.

Zur Feststellung von Ort und Ausmaß exfiltrierender Leckstellen wurde ein elektrisches Abwasser-Meß-System (AMS-4) entwickelt (Forschungsbericht 1994c), mit dem durch eine Sonde im Kanalrohr nicht nur die Dichtheit, sondern im Fehlerfall auch die Undichtigkeit bestimmt

Tab. 2: Daten zu Kanalbauwerk, Standort und Untersuchungsumfang der Fallbeispiele.

1. Fallbeispiel	1	2	3	4	5	6	7
2. Kanal							
2.1 Art ¹⁾	MW	MW	MW	MW	MW	SW	MW
2.2 Material ²⁾	Stz/B-Falz	Stz	B-Falz	Stz	Stz	Stz	Stz
2.3 DN	250	300	500 - 800	450	400	350	250
2.4 Baujahr	1935	1896	1912	1894	vor 1930		vor 1905
2.5 Schäden ³⁾	LB-U/UC-- R--U	UC--/RS-- BC-U	RL--	LL--	RQ,L/JA-R UC--	RS-U/RL-U	UC--/JA-- LB-U
2.6 Klasse ⁴⁾	1 - 3	0, 1	2, 3	3, 4	0 - 3	0, 1	?
2.7 Ausbau ⁵⁾	hall	hall	hall	hall	klein	klein	hall
2.8 Länge [m]	70	140	1000	55	8	5	110
3. Einzugsgebiet ⁶⁾							
	Wo	Wo	Wo	Wo	Gew/Wo	Gew	Gew
4. Untergrund							
4.1 Sediment ⁷⁾	mS/S,1	f-mS/T,fs	mS/T,fs	T,s,g (A)	mS,g/U,s	U,fs/G,s	mS,g
4.2 Durchlässigkeit ⁸⁾	10 ⁻⁴ /10 ⁻⁸	10 ⁻⁵ /10 ⁻⁶	10 ⁻⁴ /10 ⁻⁸	≤ 10 ⁻⁶	10 ⁻⁴ /10 ⁻⁶	10 ⁻⁶ /10 ⁻³	10 ⁻⁴
4.3 Grundwasser ⁹⁾	0,2 - 0,8		0,1 - 1,0	3 - 4/0,0 ¹⁰⁾	1,0 - 2,0	4 - 5/2 ¹⁰⁾	2 - 3/0,0 ¹⁰⁾
5. Untersuchungen ¹¹⁾							
5.1 Untergrund	22 (72)	25 (99)	49 (130)	15 (57)	14 (49)	8 (21)	23 (46)
5.2 Abwasser	(99)	(11)	(46)	(13)	(4)	(13)	(15)
5.3 Grundwasser			3 (69)	4 (46)		2 (20)	3 (19)

¹⁾ SW: Schmutzwasser; MW Mischwasser

²⁾ Stz: Steinzeug; B: Beton

³⁾ Nomenklatur lt. ATV M 143 T. 2

⁴⁾ Schadensklasse: Bewertung lt. ATV A 149, Entwurf 8/1993

⁵⁾ Kanalausbau: hall: hallungsweise; klein: Kleinbaustelle

⁶⁾ Wo: Wohn; Gew: Industrie-/Gewerbegebiet

⁷⁾ Kürzel lt. DIN 4022 Blatt 1

⁸⁾ Durchlässigkeitsbeiwert: kf [m/s]

⁹⁾ Grundwasserobefläche unter der Rohrsohle [m]

¹⁰⁾ Grundwasserstand bei Hochwasser möglich

¹¹⁾ Anzahl der Probenahmestellen (Proben)

werden kann. Damit ist es möglich, im Betrieb befindliche, ältere Kanäle oder auch nicht sperr- und umleitbare Kanäle auf Dichtigkeit zu prüfen.

Der Einsatz eines radiometrischen Verfahrens (Neutronensonde) zum Nachweis von Abwasserexfiltrationen durch unterschiedliche Bodenfeuchtegehalte führte an einem Abwasserkanalmodell bei Meßstellenausbau mit Aluminiumrohren zu signifikanten Ergebnissen, die bei in situ-Messungen unter gleichen meßtechnischen Voraussetzungen nicht bestätigt werden konnten (Forschungsbericht 1994b).

Zur Detektion von Abflüßwegen aus einem gefluteten Abwasserkanal durch überwiegend geoelektrische, elektromagnetische und thermometrische Verfahren wird in (EISWIRTH 1994) berichtet. Mit den verschiedenen Meßmethoden werden in der Abwasserkanalumgebung Bereiche vorwiegender Wasserführung belegt und in Korrelation mit der TV-Befahrung die Schäden ausgewiesen, die an wirksamen Exfiltrationen beteiligt sind.

Als weitere Detektionsmethode wurden exemplarisch **biologische Verfahren** geprüft. Mikrobielle Untersuchungen an Sedimentproben aus dem Umfeld von Kanalschäden führten bisher zu keinen zweifelsfreien Zusammenhängen zwischen Abwasseraustrag und dem vermehrten Auftreten von Bakterien (u.a. Gesamtkeimzahl, coliforme Bakterien) und Pilzen (URMANN 1993) im Sediment. Andererseits deuten bereichsweise erhöhte CO₂- und erniedrigte O₂-Konzentrationen in der Bodenluft auf verstärkten mikrobiellen Abbau von Abwasserkomponenten in der ungesättigten Zone hin. Der Versuch, durch biologische Testverfahren synergistische Effekte von Abwasserinhaltsstoffen

durch erhöhte ökotoxikologische Wirkungen in der flüssigen Phase außerhalb des Kanalrohrs (Sedimenteluat, Grundwasser) nachzuweisen, eignete sich als Detektionsmethode ebenfalls nicht (HAGENDORF & KRAFFT 1996).

2.2 Quantifizierung und Bewertung der Umweltrelevanz durch hydrochemische und geochemische Bestandsaufnahmen

Zur Fragestellung der Freisetzung und Auswirkung von Abwasserinhaltsstoffen im Hinblick auf umwelthygienische Risiken für die Schutzgüter Boden und Grundwasser wurden Untersuchungen insbesondere an Kanälen im Langzeitbetrieb und solchen, die Schmutzwässer unterschiedlichster Herkunft führen, durchgeführt (HAGENDORF & KRAFFT 1996). Eine detaillierte Schadensbewertung und Gefährdungsabschätzung muß neben den Untersuchungskriterien Abwasserbeschaffenheit/Abwasserherkunft die Kriterien Zustand des Kanalbauwerks und Untergrundverhältnisse (geologischer Aufbau der Kanalumgebung, Grundwasserverhältnisse) berücksichtigen, denn Anreicherung, Abbau und Verlagerung der Abwasserinhaltsstoffe unterhalb der Rohrsohle resultieren aus einer Vielzahl von Einfluß- und Wirkungsgrößen der zuvor genannten Kriterien.

Als Fallbeispiele wurden offene Kanalbaustellen im Lockergestein ausgewählt, die insbesondere Möglichkeiten für detaillierte Aufnahmen und Probenahmen an freigelegten Kanalabschnitten boten (Tab. 2). Die Untersuchungskriterien wurden durch umfassende Erhebungen und Recherchen zu Größe und Art der Abwassereinzugsgebiete, Lage und

Branchen von Indirekteinleitern sowie deren Abwasserzusammensetzung, Alter und Material des Kanalbauwerks, Schadensart, -schwere und Zustandsklasse präzisiert. Die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse wie Art, Korngröße und Durchlässigkeit der Sedimente, Grundwasserabstand, -fließrichtung und -zusammensetzung unterschieden sich für die einzelnen Fallbeispiele ebenfalls, so daß die Ergebnisse im Analogieschluß auf ähnliche, nicht im Detail prüf- und untersuchbare Verhältnisse übertragen werden können.

Die Entnahme von Abwasser und Grundwasser erfolgte als Stichproben. Die Sedimentproben wurden aus definierten Tiefen oberhalb und unterhalb der Rohrsohle und aus Sondierbohrungen außerhalb der Kanaltrasse entnommen. Die Proben wurden auf verschiedene physikalisch-chemische und chemische Summen-, Gruppen- und Einzelparameter untersucht, die im häuslichen und industriell/gewerblichen Abwasser in relevanten Konzentrationen enthalten sind oder zur Abwasserüberwachung im praktischen Vollzug genutzt werden. Hierzu gehören u.a. organisch gebundener Kohlenstoff, Nährstoffe, adsorbierbare organische Halogenverbindungen, Anionen, Alkali- bzw. Erdalkalimetalle sowie Schwermetalle. Unberücksichtigt blieben leichtflüchtige Halogenkohlenwasserstoffe, da die Auswirkungen dieser Stoffgruppe durch undichte Kanäle auf Boden und Grundwasser hinreichend bekannt sind (HAGENDORF 1982; TOUSSAINT 1989).

Nach ihrem spezifischen Verhalten während der Untergrundpassage erfaßten die Parameter biologisch abbaubare und biologisch transformierbare Stoffe, relativ immobile sowie relativ mobile Stoffe. Durch die Feststoffanalysen und Eluataufschlüsse der Sedimentproben konnten die Gesamtgehalte und die leichter mobilisierbaren Anteile der Stoffe ermittelt werden. Weiterhin wurden sedimentspezifische Parameter wie Farbe, Geruch, Feuchtegehalt und organische Substanz bestimmt.

Die Analysenbefunde wurden für jedes Fallbeispiel statistisch aufbereitet, an welchen Kanalschäden Abwasser exfiltrierte („abwasserbeeinflußt“) und welche Untersuchungsparameter mit diesen Befunden korrespondierten. Die Parameter, die in allen Fallbeispielen Schäden mit Abwasserexfiltrationen belegten, wurden als Leitparameter eingeführt, weil auf Standards nicht zurückgegriffen werden kann. Die aus den Leitparametern errechneten Faktoren (f) zur medianen Abweichung der Meßbefunde von den Hintergrundwerten (HG, „abwasserunbeeinflußt“) wurden als eine Bewertungsgrundlage genutzt.

Das Filter-, Sorptions- und Mobilitätsverhalten des Untergrundes prägt den Verbleib der mit der Abwasserexfiltration freigesetzten Stoffe. Daraus können sich Stoffanreicherungen ergeben, die im Vergleich zu den bekannten Richt-, Prüf- und Grenzwerten mit ihrem komplizierten Standort-,

Nutzungs-, Schadstoff- und Schutzgutbezug verschiedenste Nutzungen ausschließen oder einschränken.

Fallbeispiele

Die Auswirkungen schadhafter Abwasserkanäle wurden an 7 Fallbeispielen (Tab. 2) untersucht, von denen 4 in Wohngebieten und 3 in Industrie- und Gewerbegebieten lagen. An und im Umfeld der Kanalbaustellen mit insgesamt 1500 m Länge wurden ca. 500 Sedimentproben, ca. 100 Abwasserproben und an 4 Fallbeispielen ca. 150 Grundwasserproben entnommen.

Unabhängig von der Art des Abwassereinzugsgebietes belegten die Abwasseranalysen häusliche oder Abwasser vergleichbarer Beschaffenheit. Mit Brüchen, Hindernissen, Lageabweichungen, Rissen und Undichtigkeiten enthielten die untersuchten Kanalabschnitte die wesentlichen Schadensarten in Sohl-, Kämpfer-, und Scheitellagen des Rohrquerschnitts (ATV 1991). Es handelte sich sowohl um schwere bautechnische Mängel der Schadensklassen 0, 1 und 2 als auch um leichtere Schäden der Klassen 3 und 4. Die Untergrundverhältnisse der Fallbeispiele variierten zwischen tonigen und sandig-kiesigen bzw. schwer bis gut durchlässigen Sedimenten (Kf-Wert 10^{-8}ms^{-1} bis 10^{-4}ms^{-1}) bei Grundwasserabständen zwischen $< 50 \text{ cm}$ und $> 500 \text{ cm}$ unter Rohrsohle. Die Untersuchungskriterien Abwasserbeschaffenheit, Kanalbauwerk, Sediment und Grundwasser lagen danach in verschiedenster Ausbildung vor, so daß für die Auswertung verschiedene Bewertungskombinationen möglich waren.

Leitparameter

Durch die Auswertung der Meßbefunde von Sedimentproben unterhalb von Kanalschäden wurden in 5 Fallbeispielen Abwasserinhaltsstoffe im Untergrund (Sediment) nachgewiesen. Mit Abwasserexfiltrationen korrespondierten im Sedimenteluat elektrische Leitfähigkeit (L_F), gelöster organischer Kohlenstoff (DOC), Ammonium (NH_4), Kalium (K) und Magnesium (Mg) und im Sedimentfeststoff Blei (Pb), Kupfer (Cu), Zink (Zn). Diese 8 Parameter waren geeignet „abwasserbeeinflußt“ von „abwasserunbeeinflußt“ Untersuchungsabschnitten (Hintergrundwerte, HG) abzugrenzen (Abb. 2). Daneben traten im Eluat auch Natrium (Na) und Calcium (Ca) und im Feststoff organischer Kohlenstoffgehalt (C_{org}), adsorbierbare organische Halogenverbindungen (AOX), Kalium (K) und Barium (Ba) relativ häufig auf. Diese Parameter konnten den Leitparametern nicht zugeordnet werden, da die vorgegebene Auswertungskonvention den Nachweis der Parameter in allen Fallbeispielen forderte und die Meßbefunde mindestens um den

Faktor $f = 2$ über den Hintergrundwerten liegen sollten.

Schäden

Die Auswirkungen der untersuchten Schäden wurden anhand der Leitparameter in 0 - 10 cm Tiefe unter Rohrsohle beurteilt. Hierzu diente die mediane Abweichung der Leitparameter von den Hintergrundwerten (HAGENDORF & KRAFFT 1996). Die Faktoren (f) wurden getrennt für Eluat- und Feststoffbefunde berechnet und als $f >$ Referenzwert angegeben (Tab. 3).

„Abwasserbeeinflüßter“ Untergrund wurde für Schäden der Klassen 0 und 1 in der Rohrsohle sowie undichte Muffen (UC--) und defekte Rohranschlüsse (UA--) nachgewiesen. Die Anzahl von Schäden der Klasse 2 in der Rohrsohle, als „nachweisbar“ (Faktor $2 \leq f < 4$) und als „nicht nachweisbar“ dokumentiert, war zu gering, um nach Schadensarten differenziert gesicherte Aussagen für diese Klasse treffen zu können. Ebenso widersprüchlich stellen sich die Ergebnisse für Rißbildungen (RL/Q/S) der Klasse 3 in der Rohrsohle dar. Der Einfluß von Schäden der Klasse 3 ist insgesamt aber geringer zu beurteilen als der der Klassen 0, 1 und 2.

Die Auswertung von Lageabweichungen (LV/H/L) der Schadensklassen 3 und 4 zeigte keine Anreicherung von Abwasserinhaltsstoffen unterhalb der Rohrsohle. Gleiches wurde übereinstimmend auch für Schäden in Rohrscheitel und -kämpfer unabhängig von Schadensart und -klasse festgestellt.

Infiltrationstiefe

Die Sedimentuntersuchungen belegten bereits ca. 10 cm unter Rohrsohle einen Konzentrationsrückgang um 90 % auf 10 % der Meßbefunde an der Rohrsohle (Abb. 3). Mit dem Eintrag organischer Feststoffe in das Sediment durch das Abwasser entwickelte sich eine bis zu 10 cm starke, überwiegend dunkelgraue, dunkelbraune bis schwarz gefärbte Schicht mit hohem organischem Anteil (Infiltrationszone, Biofilm). In Proben aus 20 - 100 cm unter Rohrsohle wurden erhöhte Meßwerte in Eluat- oder Feststoffproben nur sporadisch nachgewiesen.

Grundwasser

Im Grundwasser konnte eine auf Abwasserexfiltrationen zurückführende Beeinflussung nicht nachgewiesen werden.

Umweltrelevanz

Erhöhte Meßwerte im Sediment waren nur auf die unmittelbare Umgebung der Schäden (Infiltrationszone) begrenzt. Die Befunde im Sediment (Feststoff) belegten besonders für die Schwermetalle Blei (Pb), Kupfer (Cu) und Zink (Zn) in bis zu 50 % der abwasserbeeinflüßten Proben Stoffanreicherungen, wie der prozentuale Vergleich der die Anforderungen überschreitenden Meßbefunde an der Gesamtanzahl verdeutlicht (Tab. 4). Im Vergleich mit Prüf-, Richt- und Orientierungswerten, z.B. die Orientierungsdaten

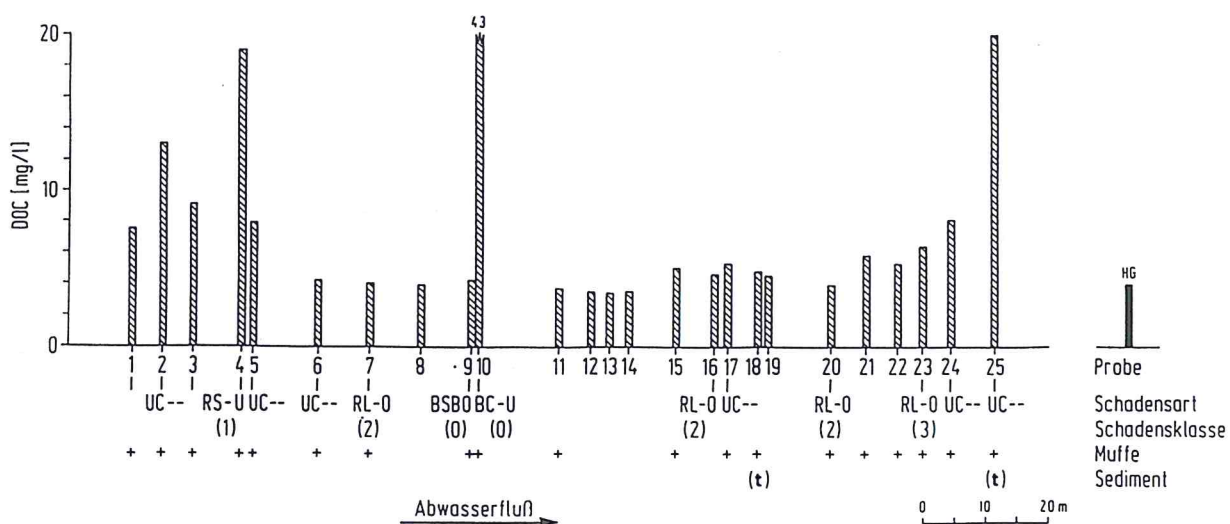


Abb. 2: Horizontale Stoffverteilung gelöster organischer Kohlenstoff (DOC).

(Meßwerte 0 - 10 cm unter Rohrsohle - Fallbeispiel 2)

Schadensnomenklatur nach ATV1993a

Schadensklassen nach ATV 1993b

(t) - tonig; HG - Hintergrundwert

Nomenklatur1)	SCHADEN		LEITPARAMETER	
	Klasse2)	Anzahl	Eluat	Feststoff
BC-U	0	1	+3)	++
BSBO	0	1	-	-
HP-0	3	1	-	-
LV--	3	4	-	-
LH--	3	1	-	-
LL--	3, 4	7	-	-
LB-U (Muffe)	1	1	++	++
LB-U (Zentr.)	1	1	+	+
LB-UE	2	2	+	+
RL--	1	5	+	+ ?4)
RL--	2	3	-	-
RL--	3	1	+	+
RL-0	0, 2, 3, 4	17	-	-
RL-L,R	0,4	3	-	-
RQ--	0	1	+	++
RQ--	1	1	-	+
RQ--	3	2	-/++?	-/++?
RQ-R	3	1	-	-
RS--	0	4	++	+
RS--	1	1	++	++
RS--	3	1	-	-
UC--		16	+ / ++	++
UA--		8	+	++

Tab. 3:
Nachweis von Kanalschäden durch Leitungsparameter im Sediment (0 - 10 cm unter Rohrsohle).

Erläuterung:

- 1)Schadensnomenklatur: nach ATV M 143 T. 2
- 2)Schadensklassen: nach ATV M 149, Entwurf 8/93
- 3)Faktor (f) der Abweichung von den Hintergrundwerten
 - $f < 2$ Schaden nicht nachweisbar
 - + $2 < f < 4$ Schaden nachweisbar
 - ++ $f > 4$ Schaden deutlich nachweisbar
- 4)+? Ergebnis fraglich

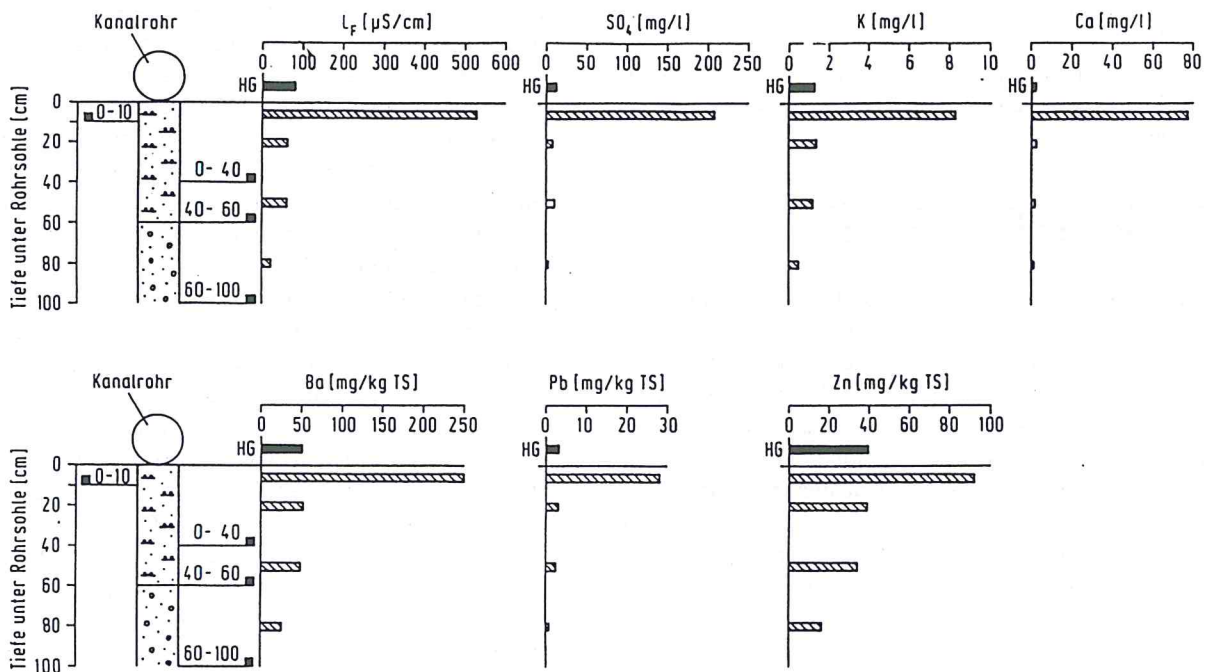


Abb. 3: Vertikale Stoffverteilung ausgewählte Parameter in Eluat und Feststoff.
(Probenahme stelle 2 unterhalb Schaden RL-- (1)
Fallbeispiel 6
HG - Hintergrundwert

FALLBEISPIEL	1	2	6	7
Probenanzahl (n) („abwasserbeeinflußt“)	12	10	8	11
Anteil an Gesamtproben	n (%)	n (%)	n (%)	n (%)
Orientierungsdaten für tolerierbare Gesamtgehalte in Kulturböden häufig vorkommende Gehalte				
Cu 1 - 20 mg/kg	2 (17)	3 (30)	6 (75)	7 (64)
Pb 0,1 - 20 mg/kg	3 (25)	6 (60)	4 (50)	8 (73)
Zn 3 - 50 mg/kg	4 (33)	8 (80)	7 (88)	8 (73)
Nutzungs- u. schutzgutbezogene Orientierungswerte für Stoffe im Boden multifunktionale Nutzungsmöglichkeit (Bodenwert I, Grundwert)				
Cr 50 mg/kg	-	-	3 (38)	1 (9)
Cu 50 mg/kg	-	1 (10)	1 (13)	4 (36)
Pb 100 mg/kg	2 (17)	4 (40)	-	3 (27)
Zn 150 mg/kg	-	3 (30)	1 (13)	6 (55)
Leitfaden für Bodenbeurteilung und Bodensanierung B-Wert				
Cu 100 mg/kg	-	-	1 (13)	3 (27)
Pb 150 mg/kg	2 (17)	3 (30)	-	1 (9)
TA Siedlungsabfall				
TOC < 20 mg/l	-	2 (20)	-	2 (18)
Ni < 0,2 mg/l	-	-	1 (13)	-
Zn < 2 mg/l	-	-	1 (13)	-
Entsorgung von Erdaushub				
NH ₄ -N 0,4 mg/l	9 (75)	9 (90)	1 (13)	n.b.
Cu 0,1 mg/l	-	1 (10)	1 (13)	3 (27)
Mn 0,1 mg/l	6 (50)	5 (50)	5 (62)	1 (9)
Zn 0,5 mg/l	-	1 (10)	2 (25)	-

Tab. 4:

Prozentualer Vergleich von Prüf-, Richt- und Orientierungsanforderungen mit der Anzahl höher belasteter Sedimentproben 0 - 10 cm unter Rohrsohle (nach KLOKE 1993; EIKMANN & KLOKE 1992; Leitfaden 1994; Verwaltungsvorschrift 1990 und 1993).

für tolerierbare Gesamtgehalte in Kulturböden oder die multifunktionelle Nutzungsmöglichkeit von Böden - sind diese - sofern sie, z.B. durch Baumaßnahmen aufgenommen werden - in ihrer weiteren Verwendung eingeschränkt.

Mit dem im Eluataufschluß der Sedimentproben simulierten möglichen Schadstoffaustrag wurde überprüft, inwieweit die Sedimente unterhalb der Rohrsohle als Abfall einzustufen sind. Richtwertüberschreitungen und damit Einstufungen als Abfall wurden in Wohngebieten für gelösten organischen Kohlenstoff (DOC) und Ammonium (NH₄) in bis zu 90 % der Proben, in Industrie- und Gewerbegebieten für Schwermetalle (Cu, Zn) in bis zu 25 % der Proben belegt.

3 Schlußfolgerungen, Empfehlungen und Handlungsbedarf

Auf Grund der festgestellten stofflichen Befunde in der Kanalumgebung sowie der instationären aber z.T. auch sehr dynamischen Prozesse bei der Abwasserexfiltration ist zwar zu beachten, daß die Ergebnisse nicht unmittelbar auf andere Verhältnisse sondern nur bei vergleichbaren Randbedingungen (z.B. Abwasserzusammensetzung, Schadensart und -alter, Untergrundverhältnisse) übertragbar sind. Trotzdem leiten sich allgemeingültige Tendenzen ab, die auch in Bewertungsmodellen zur Abschätzung des Gefährdungspotentials bei defekten Kanälen berücksichtigt wurden (LÜHR & BÜTOW 1995).

- Die Zustandserfassung eines Kanalrohrs mit geophysikalischen Verfahren (Goelektrik, Akustik) bieten brauchbare Informationen und tragen wesentlich zur besseren Interpretation von Schadensbildern aus TV-Inspektionen bei. Mittels Schallreflektionsmessungen und dem Einsatz

eines Georadars können Kanalschäden detektiert werden.

- Mit zunehmender Undurchlässigkeit des Bodens verursachen gleiche Schadensbilder deutlich geringere Exfiltrationsraten. Undurchlässiger Untergrund dämpft die z.T. sehr dynamischen Exfiltrationsvorgänge; temporär werden auch Exfiltrationsunterbrechungen (Verstopfungen) beobachtet. Höhere Teilfüllungsgrade (infolge Mischwasser) können in unregelmäßigen Abständen erhöhte Exfiltrationsmengen auslösen, die jedoch im weiteren Verlauf regelmäßig wieder abnehmen und z.T. auf Null zurückgehen.
- Aus quantitativen Messungen ergab sich als Reihenfolge der Umweltgefährdung von Kanalschäden die Scherbenbildung und Schäden durch unsachgemäß angeschlossene Hausanschlußleitungen, gefolgt von Lageabweichungen der Rohrverbindungen, Längs- und Querrissen und schließlich der Wurzeleinwuchs.
- Stoffliche Untersuchungen belegen Abwasserexfiltrationen durch die Leitparameter L_F, DOC, NH₄, K und Mg (Sedimenteluat) und Pb, Cu, Zn (Sedimentfeststoff). Weitere, allerdings nicht für jedes Fallbeispiel nachgewiesene abwassertypische Parameter sind adsorbierbare organische Halogenverbindungen (AOX), Ba, C org. und Na. Die mobilen und biologisch abbaubaren Leitparameter im Eluat zeigen überwiegend akute Stoffeinträge, die gut immobilisierbaren Leitparameter im Feststoff auch zeitlich zurückliegende Abwassereinträge in den Untergrund (Sediment) an, wenn Schäden der Klassen 0, 1 und 2 in der Rohrsohle sowie undichte Muffen und defekte Rohranschlüsse vorlagen.
- Abwasserinhaltsstoffe wurden außerhalb von Kanalrohren bei Schäden in Rohrscheitel und -

- kämpfer unabhängig von Art und Schwere nicht festgestellt, so daß temporäre Rohrvollfüllungen, Über- und Rückstausituationen offenbar für die Problematik „Undichte Kanäle“ unbedeutend sind.
- Im Sediment blieben die Abwasserinhaltsstoffe auf die unmittelbare Umgebung unterhalb des Schadens begrenzt. Die relativ geringmächtige Infiltrationsschicht mit hohem organischem Anteil trägt wesentlich zur Stoffelimination und -immobilisierung bei.
 - Einträge von Abwasserinhaltsstoffen in das Grundwasser sind aufgrund der Ergebnisse zum Schadensnachweis und zur Infiltrationstiefe nicht zu erwarten, wenn tonige bis feinsandige Sedimente in einer Mächtigkeit > 100 cm den schadhafte Kanal direkt unterlagern. Dies gilt unabhängig von der Schwere der untersuchten Schäden. Stoffeinträge in das Grundwasser durch Abwasserexfiltrationen sind wahrscheinlich, wenn Grobsand oder Kies den Untergrund bilden, Schäden der Klassen 0 - 2 an der Rohrsohle vorliegen und der Abstand der Grundwasser-oberfläche zur Rohrsohle < 100 cm/< 50 cm beträgt. Der Nachweis dürfte insbesondere auf Grund der in der Regel geringen Abwasserexfiltrationsraten außerordentlich erschwert sein.
 - Erhöhte Meßbefunde im Sediment, die im Vergleich mit einschlägigen Richt-, Grenz- oder Zuordnungswerten als umweltrelevant zu beurteilen sind, wurden überwiegend in der unmittelbaren Umgebung der Schäden nachgewiesen.
- Die Angabe absoluter, schadensbezogener und damit abwasserbeeinflusster Zuordnungs- und Belastungswerte für die Leitparameter, differenziert nach Schutzgütern, ist auf Grund der vorhandenen Datenbasis bisher nicht möglich, zumal die geogenen Hintergrundwerte als Bezugsgrößen standortspezifisch und damit relativ sind.
 - Für die Praxis der Kanalinstandsetzung wird empfohlen, neben den Schäden, die Sofortmaßnahmen erfordern, primär jene Mängel zu beheben, die den Schadensklassen 0, 1 und 2 entsprechen und in der Rohrsohle liegen. Vorrangig sind Kanäle instanzzusetzen, wo der Untergrund aus gut durchlässigen, sorptionschwachen Sedimenten bei Grundwasserständen ab 100 cm unter Rohrsohle besteht und das Abwasser gefährliche Stoffe enthalten kann.
 - Bei Baumaßnahmen zur Kanalsanierung ist darauf zu achten, daß die Anreicherung von Abwasserinhaltsstoffen unterhalb schadhafter Kanäle die multifunktionelle Nutzungsmöglichkeit von Aushubmassen z.T. einschränkt; für die Zwischenlagerung und Verbringung des Baustellenaushubs sind die Anforderungen des Abfallrechts zu beachten.
 - Die Kanaldatenbanken der Kommunen sind unter schadensbezogenen (Kanalbauwerk) und umweltrelevanten Aspekten (Abwasserbeschaffenheit, Sediment, Grundwasser) zu überarbeiten, um den bautechnischen Zustand der Kanäle im Hinblick auf seine Sanierungsnotwendigkeit und -dringlichkeit neu bewerten zu können.

Literatur

- EIKMANN, TH. & KLOKE, A. (1992): Ableitungskriterien für nutzungs- und schutzgutbezogene Orientierungswerte für (Schad-)Stoffe in Böden.- Müll und Abfall, **11**: 789-805.
- EISWIRTH, M., HÖTZEL, H., KRAMP, J., LAZAR, C. & MERKLER, G.-P. (1994): Neuartige Methoden der Leckagedetektion bei Abwasserkanälen.- gwf, Wasser Abwasser, **135**: 312-318.
- FUHRMANN, D. & VOLLMER, S. (1992): BMFT-Förderschwerpunkt „Umweltschonende Technologien zur Sanierung undichter Kanäle“.- Korrespondenz Abwasser, **39**: 338-343.
- HAGENDORF, U. (1992): Erkennung und Beurteilung von Untergrundkontaminationen durch undichte Kanäle.- In: Verein zur Förderung des Instituts für Wasserversorgung Abwasserbeseitigung und Raumplanung an der Technischen Hochschule Darmstadt [ed.], WAR **39** (1989): 209-227; Darmstadt (Eigenverlag).
- HAGENDORF, U. & KRAFFT, H. (1996): Erfassung und Bewertung undichter Abwasserkanäle - Untersuchungen zur Erfassung und Bewertung undichter Kanäle im Hinblick auf die Gefährdung des Untergrundes.- UBA-Texte 9/1996; Umweltbundesamt Berlin.
- HARTMANN, A., MACKE, E. & SCHULZ, O. (1996): Auswirkungen von Kanalschäden auf das Grundwasser.- ATV-Schr. 02: Kanalbau-Sanierung im Zeichen Europas.- ATV-Workshop am 9./10.5.1996, Internationale Fachausstellung Abfalltechnik, München.
- KLOKE, A. (1993): Orientierungsdaten für tolerierbare Gesamtgehalte für einige Elemente in Kulturböden.- In: Umweltmagazin: Richt- und Grenzwerte: Luft - Wasser - Boden - Abfall - Chemikalien.- Bearb. v. HEIN & SCHWEDT, Losebl.-Ausg., 3. Aufl., Lfg. 1, Stand: 10/1993; Würzburg.
- LÜHR, H. P. & BÜTOW, E. (1995): Entwicklung eines Bewertungsmodells zur Abschätzung des Gefährdungspotentials bei defekten Kanälen.- Jb. Umwelttechnik ökol. Modernisierung, Umwelt 95/96, 4. Ausgabe: 163-167; Gütersloh (mpV-Media-Partner-Verlagsagentur).
- RETTINGER, S. (1992): Wasser- und Stoffdynamik bei der Abwasserperkolatation.- Berichte aus

- Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Technische Universität München, 97; München (Gesell. Förd. Lehrstuhls Wassergütwirt. Gesundheitsingenieurwes. TU München).
- TOUSSAINT, B. (1989): Die Kanalisation als Ursache von Grundwasserkontaminationen durch leichtflüchtige Halogenkohlenwasserstoffe. Beispiele aus Hessen.- gwf, Wasser Abwass., 130: 299-311.
- URMANN, S. (1993): Mikrobiologische Untersuchung von Sedimentproben unterhalb undichter Kanäle.- Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene des Bundesgesundheitsamtes, Außenstelle Langen; Langen [Unveröff.].
- ZINNECKER, J. (1994): Geophysikalische Untersuchung eines Abwasserkanals.- Abwassertechnik, 45: 10-14.
- ATV (Abwassertechnische Vereinigung [ed.]) (1993a): Merkblatt M 143: Inspektion, Instandsetzung, Sanierung und Erneuerung von Abwasserkanälen und -leitungen Teil 2: Optische Inspektion.- Bonn (Rheinischer Landwirt.-Verl.).
- ATV (Abwassertechnische Vereinigung [ed.]) (1993b): Arbeitsblatt A 149: Zustandsklassifizierung und Zustandsbewertung von Abwasserkanälen und -leitungen. Entwurf Stand: 8/1993.-Bonn (Rheinischer Landwirt.-Verl.).
- Bericht (1991): Schadstoffausbreitung im Zusammenhang mit Kanalschäden.- Kanal- und Wasserbauamt der Stadt Düsseldorf [Unveröff.].
- Bericht (1992): Beurteilung zur Notwendigkeit der Kanalmuffensanierung. Grundwasseruntersuchungen Siedlung Goldstein.- Stadtentwässerungsamt Frankfurt/Main [Unveröff.].
- Forschungsbericht (1994a): Untersuchungen zur quantitativen und qualitativen Belastung von Boden-, Grund- und Oberflächenwasser durch undichte Kanäle.- Institut für Siedlungswasserwirtschaft RWTH Aachen: Teil 1 im Verbundprojekt „Wassergefährdung durch undichte Kanäle - Erfassung und Bewertung“; Forschungsvorhaben BMBT - 02 WA 9035 im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie.
- Forschungsbericht (1994b): Entwicklung von Verfahren zur Quantifizierung des Wasseraustritts und der Wasser- und Stoffausbreitung in der Umgebung undichter Kanäle.- Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Universität Stuttgart: Teil 4 im Verbundprojekt „Wassergefährdung durch undichte Kanäle - Erfassung und Bewertung“; Forschungsvorhaben BMBT - 02 WA 9038 im Auftrag des Bundesministeriums für Wissenschaft, Forschung und Technologie.
- Forschungsbericht (1994c): Entwicklung eines Verfahrens zur Feststellung von Ort und Ausmaß von ex- und infiltrierenden Leckstellen unter Verwendung von direkt an das Erdreich angekoppelten elektrischen Strömen.- Seba Dynatronic GmbH Baunach; Forschungsvorhaben BMBT - 02 WK 9161/8 im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie.
- Forschungsbericht (1995a): Schallreflexionsanalyse zur Kanalinspektion.- Gesellschaft für Schwingungsuntersuchungen und dynamische Prüfmethode mbH Mannheim: Teilprojekt im Verbundprojekt „Entwicklung akustischer Meßverfahren zur Detektion des Kanalzustandes“; Forschungsvorhaben BMBT - 02 WK 9386/0 im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie.
- Forschungsbericht (1995b): Datenverwaltung und -auswertung.- GWK Ingenieure GmbH Mannheim: Teilprojekt im Verbundprojekt „Entwicklung akustischer Meßverfahren zur Detektion des Kanalzustandes“; Forschungsvorhaben BMBT - 02 WK 9386/0 im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie.
- Forschungsbericht (1995c): Georadar/Entwicklung und Erprobung eines Radarsystems zur Auffindung und Beurteilung von Schäden in/an Kanalsystemen.- Daimler-Benz Aerospace AG, Sensorsysteme, Boden- und Schiffssysteme, Ulm; Forschungsvorhaben BMBT - 02 WK 9157/3 im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie.
- Leitfaden (1994): Niederländischer Leitfaden zur Bodenbeurteilung und Bodensanierung: Holland Liste.- In: Praxisratgeber Altlastensanierung.- Losebl.-Ausg., Stand 7/1994, Teil 6/4.1.1.; Augsburg (Fischer & Köchling: WEKA-Fachverlag).
- Verwaltungsvorschrift (1990): Hessisches Ministerium für Umwelt und Reaktorsicherheit, Wiesbaden: Verwaltungsvorschrift für die Entsorgung von unbelastetem Erdaushub und unbelastetem Bauschutt.- 1.VwV Erdaushub/Bauschutt, St.Anz., 44: 2170-2174.
- Verwaltungsvorschrift (1993): Allgemeine Verwaltungsvorschrift der Bundesregierung: Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Verwaltungsgesetz, TA Siedlungsabfall - Technische Anleitung zur Vermeidung, Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen.- i.d.F. v. 1. 6. 1993, Drucksache 594/92; Bonn (Heger-Verlag).

Anschrift des Autors:

Dr. Ulrich Hagendorf
 Umweltbundesamt
 Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene, Außenstelle Langen
 Paul-Ehrlich-Str. 29
 63225 Langen