

U. Michels, G. Gunkel, M. Scheideler & K. Ripl

**Invertebraten im Trinkwasser**  
Probenahme, Analytik  
und Bewertung



2013

Universitätsverlag der Technischen Universität Berlin

Ute Michels  
Günter Gunkel  
Michael Scheideler  
Klaus Ripl

**Invertebraten im Trinkwasser**  
**Probenahme, Analytik und Bewertung**



# **Invertebraten im Trinkwasser**

## **Probenahme, Analytik und Bewertung**

Ute Michels, Günter Gunkel, Michael Scheideler & Klaus Ripl

Mit Beiträgen aus dem Forschungsvorhaben  
'Entwicklung eines Probenahme- und Messsystems für Invertebraten  
in Trinkwasserversorgungssystemen' mit Förderung des BMWi.

Universitätsverlag der Technischen Universität Berlin · 2013

Herausgeber:

Dipl. Biol. Ute Michels, AquaLytis, Karl-Marx-Straße 119, 15745 Wildau.  
e-mail: utemichels@aqualytis.com

Priv.Doz. Dr. Günter Gunkel, Technische Universität Berlin, FG Wasserreinhaltung, Sekr. KF 4, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin.  
e-mail: guenter.gunkel@tu-berlin.de

Dipl. Ing. Michael Scheideler, Scheideler Verfahrenstechnik GmbH, Lorenkamp 3, 45721 Haltern am See.  
e-mail: ms@scheideler.com

Dr. Ing. Klaus Ripl, Technische Universität Dresden, Institut für Siedlungs- und Industriewasserwirtschaft, Professur Wasserversorgung, 01062 Dresden.  
e-mail: klaus.ripl@web.de

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de/> abrufbar.

### **Universitätsverlag der TU Berlin, 2013**

<http://www.univerlag.tu-berlin.de>

Fasanenstr. 88 (im VOLKSWAGEN-Haus), 10623 Berlin  
Tel.: +49 (0)30 314 76131 / Fax: -76133  
E-Mail: publikationen@ub.tu-berlin.de

Das Manuskript ist urheberrechtlich geschützt.  
Satz/Layout: Dr. Günter Gunkel

Zugleich online veröffentlicht auf dem Digitalen Repository der Technischen Universität Berlin:

URL <http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2013/3958/>

URN urn:nbn:de:kobv:83-opus-39582

[<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:kobv:83-opus-39582>]

**ISBN 978-3-7983-2575-3 (online)**

## **Vorwort**

Die Partner unserer Forschungskoooperation freuen sich nach 3-jähriger intensiver Forschungsarbeit Ihnen mit dieser Veröffentlichung ein standardisierbares, praxiserprobtes Verfahren zur Analyse und Bewertung von wirbellosen Tieren in Trinkwasserverteilungssystemen inklusive der dafür erforderlichen Technik vorstellen zu können. Drei Jahre interdisziplinäre Forschungsarbeit bedeuten auch intensives Auseinandergelangen von Wissenschaft und Unternehmertum sowie von naturwissenschaftlichem und technischem Sachverstand. An dieser Stelle geht unser herzliches Dankeschön an alle Partner des Forschungsprojektes, die sich vorbehaltlos aufeinander eingelassen und mit ihrem Know-how dieses Ergebnis möglich gemacht haben. Unser Dank geht darüber hinaus an die Praxispartner des Forschungsprojektes, die uns vielfältige personelle und technische Hilfestellung gaben.

Aus gesetzlicher Sicht ist das Vorkommen und der Gehalt des Trinkwassers an Invertebraten nicht direkt geregelt. Im Technischen Regelwerk W 271 (DVGW, 1997) wird jedoch auf zwei qualitätsrelevante Aspekte infolge des gehäuften Auftretens von Invertebraten verwiesen,

- die unerwünschte Bakterienvermehrung und
- die Zehrung von Desinfektionsmitteln.

Auch das Umweltbundesamt weist in einer Stellungnahme darauf hin, dass ein „gehäuftes Auftreten [...] als Hinweis auf ein verstärktes Wiederverkeimungspotenzial zu bewerten ist“ (UBA, 2004).

Ein direkter Nachweis wirbelloser Tiere in Trinkwassernetzen ist mit den gängigen chemischen und mikrobiologischen Verfahren der Trinkwasseruntersuchung nicht möglich. Die bis dato vorliegenden Daten waren somit auf Grund unterschiedlicher Probenahmetechniken und Analysenverfahren nicht vergleichbar oder beruhten lediglich auf nicht quantifizierbaren Zufallsfunden.

Ein reproduzierbarer Nachweis von Invertebraten in Trinkwassernetzen bedarf jedoch einer entsprechenden Technik und gelingt nur bei Einhaltung bestimmter Parameter / Randbedingungen. Darüber hinaus erfordert die Analyse von Invertebraten in Trinkwassersystemen spezielles Know-how für die Beprobung des Trinkwasserversorgungsnetzes, mikroskopische Analyse und detaillierte Kenntnisse zu den vorkommenden Organismen, um eine Einordnung und Bewertung der erhaltenen Daten vornehmen zu können. Die Lösung einer so komplexen Aufgabenstellung erforderte zwingend auch eine komplexe Herangehensweise; dieser wurde mit der Initiierung eines interdisziplinären Forschungsprojektes Rechnung getragen.

Auf Grund der vorliegenden Ergebnisse und der positiven Erfahrungen in der Zusammenarbeit mit Partnern aus Wissenschaft und Praxis werden wir die Zusammenarbeit fortführen: Wirbellose Tiere im Trinkwasser werden uns im Forschungs- und Kompetenzteam auch weiterhin beschäftigen. Beim Lesen der Beiträge wird Ihnen klar werden, dass nicht alle Fragestellungen innerhalb von 3 Jahren beantwortet werden konnten, und neue Wissenslücken wurden sichtbar.

Wir freuen uns auf Ihr Interesse, die spannenden Diskussionen darüber und wünschen uns allen eine schnelle Einführung der Ergebnisse in die wasserwirtschaftliche Praxis.

Berlin im Juni 2013

Ute Michels, Günter Gunkel, Michael Scheideler, Klaus Ripl

## **Inhaltsverzeichnis**

Zusammenfassung – Summary	1
Entwicklung eines mobilen Probenahme- und Messsystems für Invertebraten in Trinkwasserverteilungssystemen <i>Michael Scheideler, Ute Michels &amp; Günter Gunkel</i>	3
Partikuläre organische Stoffe als Nahrungsquelle für Invertebraten – Modellierung der Ablagerung in einem Trinkwasserverteilungssystem <i>Klaus Ripl &amp; Wolfgang Uhl</i>	30
Repräsentative Beprobung von Trinkwasserverteilungssystemen <i>Ute Michels, Jessica Polak, Michael Scheideler &amp; Günter Gunkel</i>	48
Kotpellets der Wasserassel als Indikator für die Besiedlung von Trinkwasser-Versorgungssystemen <i>Daniel Titze &amp; Günter Gunkel</i>	63
Multimetrischer Bewertungsindex für Invertebraten in Trinkwasserverteilungssystemen <i>Ute Michels &amp; Günter Gunkel</i>	83
Kurzpräsentation der Projektteilnehmer	97



## Zusammenfassung

Die Trinkwasserqualität muss anhand der chemischen, physikalischen, toxikologischen und hygienischen Parameter überwacht und bewertet werden. Zunehmende Bedeutung erlangt als weiterer Bewertungsansatz die biologische Trinkwasserqualität, denn organische partikuläre Ablagerungen im Rohrnetz können zur Besiedelung von Trinkwassernetzen durch wirbellose Tiere, den Invertebraten, führen. Seit Ende der 90er Jahre werden z. B. verstärkt Wasserasseln (*Asellus aquaticus*) in Anlagen der Trinkwasserverteilung festgestellt, und neben Wasserasseln treten weitere, zumeist mikroskopisch kleine wirbellose Tiere im Rohrnetz auf, u.a. Kleinkrebse, wurmartige Tiere und Schalenamöben). Zur qualitativen und quantitativen Erfassung der tierischen Organismen in Trinkwasserversorgungsanlagen existieren bislang weder standardisierte Methoden noch einfache, praktikable Verfahren. Im Rahmen eines interdisziplinären Forschungsprojektes der TU Berlin, der TU Dresden den Firmen Aqualytis und Scheideler Verfahrenstechnik GmbH wurde ein Probenahme- und Messsystem entwickelt, das es erlaubt, Wasserasseln, deren Kot und andere Invertebraten schonend und quantitativ bei einer Beprobung am Hydranten abzutrennen. Die Erfassung, Analyse und Bewertung der Invertebraten in Systemen der Trinkwasserverteilung wurde weiterentwickelt und das Auftreten von Invertebraten wurde durch einen Multimetrischen Bewertungsindex qualitativ und quantitativ bewertet. Es konnte gezeigt werden, dass der Kot der Wasserasseln gut als Indikator für das Vorkommen der Asseln gewertet werden kann. Die Untersuchungen in verschiedenen Trinkwassersystemen haben gezeigt, dass ein hohes Maß von in Rohrleitungen abgelagerten Partikeln oftmals eine hohe Besiedelungsdichte an Invertebraten bedingt. Deshalb ist es notwendig, vor einer Beprobung eines Verteilungsnetzes anhand der hydraulischen Bedingungen, der Netzstruktur und der Partikelquellen die erwartete Ablagerungsbildung mit einem dynamischen Rohrnetz-Wassergütemodell zu berechnen.

## Summary

The drinking water quality has to be evaluated using chemical, physical toxicological and hygienic parameter, but increasing significance becomes the biological drinking water quality, because accumulation of particulate organic material within the drinking water tubes promote the development of small invertebrate as habitants of drinking water distribution systems. Since the end of the 90<sup>th</sup> an increasing development of water louse (*Asellus aquaticus*) occurred in drinking water distribution systems besides other microscopic small invertebrates, among else crustacean, worms and thecamoeba. Up to now, no standard methods as well as no simple and practicable sampling exist for the qualitative and quantitative determination of these animals in drinking water distribution systems. Within an interdisciplinary research project of the Berlin University of Technology, the Technical University of Dresden and the companies Aqualytis and Scheideler Verfahrenstechnik a sampling and analyzing system has been developed, which enable the gentle and quantitative separation of water louses, their feces and of other invertebrates using flushing of a water hydrant. Sampling, determination and evaluation of invertebrates in drinking water distribution systems has been develop and the occurrence of invertebrates was qualitative and quantitative analyzed using a multimetric evaluation index. It was demonstrated that feces of water louses are a good indicator for occurrence of water louses in a drinking water system. The investigations of different drinking water distribution system indicate that a high mass of deposited particles promotes a high population density of invertebrates. That's why it is necessary to analyze the hydraulic conditions, the water distribution net structure and the sources of particulate material input and to calculate the expected accumulation of these particles using a dynamic water quality model for water distribution nets.

## Entwicklung eines mobilen Probenahme- und Messsystems für Invertebraten in Trinkwasserverteilungssystemen

Michael Scheideler<sup>1</sup>, Ute Michels<sup>2</sup> & Günter Gunkel<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Scheideler Verfahrenstechnik GmbH, <sup>2</sup>AquaLytis, <sup>3</sup>Technische Universität Berlin

**Abstract:** The assessment of biological drinking water quality in water distribution systems requires an adapted monitoring of the organisms, but up to now no standard methods are developed. The development of a low pressure – high flow rate filter system is part of an interdisciplinary research program of the Berlin University of Technology, the Technical University of Dresden, the companies AquaLytis and Scheideler Process Engineering GmbH. A filter system, called NDHD-S2 has been developed using a pressureless filtration with high flow through rates with two different mesh sizes. A special flow dividing is used to sample the particles for 9/10 using a 100 µm filter and 1/10 with a 25 µm filter. The fitness of the filter material was studied, and the filter was constructed to enable a mild water inflow as well as a concentration of the filtrate in a cone with an outlet. The water sample volume was restricted to less than 300 mL by filtering 1 m<sup>3</sup>, the flow through rate can be as high as 60 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>.

**Keywords:** Drinking water sampling system, water hydrant, biological drinking water quality, water louse, *Asellus aquaticus*, invertebrates

**Kurzfassung:** Zur Beurteilung der biologischen Trinkwasserqualität in Verteilungssystemen ist es erforderlich diese regelmäßig zu untersuchen. Bisher sind kaum Untersuchungsmethoden für diese Anwendung standardisiert und keine genormten Probenahmeapparaturen verfügbar. Die Entwicklung einer Probenahmeapparatur mit entsprechender Untersuchungsmethode und Ergebnisbewertung stand im Fokus eines interdisziplinären Forschungsprojektes der TU Berlin, TU Dresden, der Firmen AquaLytis und Scheideler Verfahrenstechnik GmbH. Im Ergebnis wurde eine Gesamtapparatur, der NDHD-S2 Filter (Nieder-Druck-Hoch-Durchsatz, Baureihe S2) entwickelt, der die drucklose Filtrierung großer Durchflussmengen bei zwei verschiedenen Maschenweiten vereint. Für die exakte Teilung der Durchflussmengen und der Partikel, dem eigentlichen Gegenstand der Untersuchung, wurde ein neuer Stromteiler entwickelt. Ein Teilstrom von 9/10 des Gesamtstroms wird über einen 100 µm-Filter geleitet, der verbleibende 1/10-Teilstrom wird über 25 µm filtriert. Die Eignung der Filtermaterialien wurde aufwändig getestet. Für eine rückstandsfreie Probenahme wurden die Filter so konstruiert, dass zum einen eine schonende Anströmung im Zulauf der Filter erfolgt, zum anderen bei der Reinigung das Filtrat in dem kegelförmigen Filter zum Entnahmestutzen aufkonzentriert wird. Um die Probengefäße für den Weitertransport ins Labor klein zu halten, wurde zur Reduzierung der Wassermenge eine Reduzierstation entwickelt. Die Größe der Probenahmegefäße konnte so in der Regel auf 300 mL beschränkt werden, wobei eine Spülwassermenge von mindestens 1m<sup>3</sup> bei Durchflussmengen von bis zu 60m<sup>3</sup>/h drucklos filtriert werden kann.

**Schlüsselwörter:** Probenahmeapparatur, Hydrantenuntersuchung, biologische Trinkwasserqualität, Invertebraten, Wasserasseln, *Asellus aquaticus*

## 1. Einführung

Für den Betrieb von Trinkwasserverteilungssystemen gewinnt der Aspekt der biologischen Trinkwasserqualität immer mehr an Bedeutung. Gemäß der Trinkwasserverordnung (TrinkwV, 2001) muss die Einhaltung der nach §7 festgelegten Grenzwerte und Anforderungen an der Entnahmestelle für den menschlichen Gebrauch erfolgen. Auf dem Weg vom Wasserwerksaustritt bis zu den Entnahmestellen für den menschlichen Gebrauch ist das Trinkwasser diversen Einflüssen unterlegen. Dabei spielt der Eintrag von leicht assimilierbaren organischen Kohlenstoffverbindungen (AOC) aus der Wasseraufbereitung eine wichtige Rolle, da diese zur Bildung von Biofilm und Ablagerungen beitragen. Diese stellen wiederum die Nahrungsgrundlage für tierische Bewohner des Trinkwasserverteilungssystems dar, den sogenannten Invertebraten (wirbellose Kleinstlebewesen).

Da der Eintrag von Invertebraten und Nahrung nicht absolut vermeidbar ist, wird es umso wichtiger die Entwicklung der Invertebraten und ihre Auswirkungen auf die biologische Trinkwasserqualität im Verteilungssystem zu kennen und zu quantifizieren.

In der Trinkwasserverordnung wird das Vorkommen der Invertebraten nicht direkt geregelt. Es gab zum Zeitpunkt des Forschungsprojektes noch keinen festgelegten Grenzwert für Invertebraten im Trinkwasser. Das Merkblatt W271 „soll dem Betriebspersonal und der Betriebsleitung Hinweise über das Vorkommen von tierischen Organismen in Wasserversorgungsanlagen geben“ (DVGW-Regelwerk, Merkblatt W271, Ausgabe 1997). Weiterhin heißt es: „Die Überprüfung und gegebenenfalls Verringerung des Vorkommens tierischer Organismen in Wasserversorgungsanlagen ist Bestandteil der verantwortungsbewussten Selbstüberwachung eines Wasserversorgungsunternehmens“. In Kapitel 2 'Probenahme' wird empfohlen: „Es ist zweckmäßig, die aus den Verteilungsanlagen ausgespülten sedimentierbaren Stoffe von Zeit zu Zeit einer mikroskopischen Untersuchung zu unterziehen, um eine Besiedlung des Rohnetzes mit Mikroorganismen und anderen Kleinlebewesen frühzeitig zu erkennen“.

Die Feststellung der Entwicklung von Invertebraten im Verteilungssystem kann nur durch Untersuchungen des Trinkwassers unmittelbar im Verteilungssystem erfolgen. Untersuchungen im Bereich von Hausanschlüssen geben nicht zwangsweise Aufschluss über die tatsächliche Qualität im Verteilungssystem, da nicht steuerbare Einflüsse wie z. B. Stagnation und Strömungsgeschwindigkeiten vorliegen oder auch die Zugänglichkeiten für eine Beprobung nicht immer gegeben sind.

Für eine zuverlässige Aussage zur biologischen Trinkwasserqualität unter Berücksichtigung von Ablagerungen und der Besiedelung durch Invertebraten sowie deren Ausscheidungsprodukten (Kotpellets) eignen sich Untersuchungen an Hydranten, da diese direkt am Verteilungssystem installiert und zudem gut zugänglich sind.

Bei einer 2009 durchgeführten flächendeckenden Rohrnetzspülung mit dem CO<sub>2</sub>-Spülverfahren in einer Stadt mit ca. 11.000 Einwohnern im Nordosten Deutschlands wurde festgestellt, dass bei einer kontinuierlichen Probenahme mit Filtern von 100 µm Maschenweite bereits erhebliche Mengen organischer Partikel bestehend aus Ablagerungen und auch Makroinvertebraten ausgetragen werden konnten. Die stichprobenartige Untersuchung mit 30 µm Planktonnetzen bestätigte dies auch für Mikroinvertebraten. Daraus resultierte die Fragestellung nach den Auswirkungen auf die biologische Trinkwasserqualität und einer dafür optimierten Untersuchungsmöglichkeit, die weit mehr erfassen kann als die bis dahin verfügbaren Probenahmesysteme und Bewertungsmethoden.

Für eine repräsentative Probenahme über Hydranten fehlte es bislang an einer standardisierten Probenahmervorschrift sowie an entsprechender Ausrüstung, die eine verwertbare Entnahme dieser sehr empfindlichen Rohrnetzbewohner ermöglicht. Bei den bisher bekannten Apparaturen handelt es sich im Wesentlichen um die Verwendung von Planktonnetzen, die bei jedoch hohen Durchflussmengen in der Maschenweite Begrenzungen aufweisen (van Lieverloo et al., 2012). Dies gilt auch für das Zwei-Wege-Standrohr gemäß Abb. 1A (van Lieverloo 1997), das mit Maschenweiten von 500 µm und 100 µm nicht fein genug filtert, um auch die Mikroinvertebraten vollständig zu erfassen.

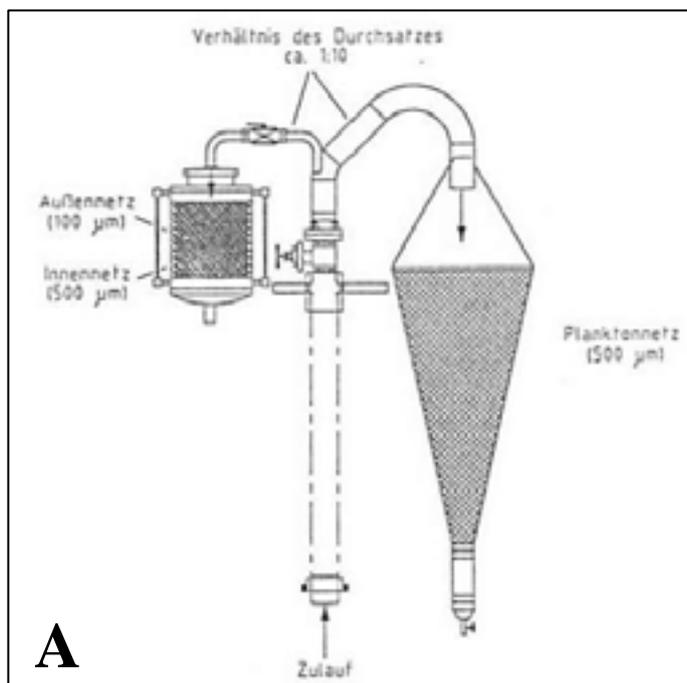


Abb. 1A. Zwei-Wege-Standrohr zur Wasserfiltration (DVGW, 1997); Abb. 1B. Filterapparatur Fabrikat Scheideler Typ 14-030, 1999.

Auch andere Apparaturen, die bis 25 µm Maschenweite zu verwenden sind (Abb. 1B), arbeiten bei größeren Durchflussmengen nicht drucklos und garantieren nicht die vollständige und unzerstörte Abtrennung aller Makroinvertebraten.

Ziel des Kooperations-Forschungsprojektes, gefördert vom BMWi durch das Aif Förderprogramm ZIM, war daher die Entwicklung eines mobilen Probenahme- und Messsystems für diese speziellen Untersuchungsanforderungen zum Nachweis der Invertebraten bei Probenahmen am Hydranten. Kooperationspartner in dem interdisziplinärem Forschungsprojekt von 2010-2012 waren die TU Berlin, TU Dresden, die Firmen Aqualytis und Scheideler Verfahrenstechnik GmbH.

## **2. Konstruktionsgrundlagen und Entwicklung des Probenahmefilters**

### **2.1. Anforderungen an die Probenahmeapparatur**

Aus den Kenntnissen zum natürlichen und 'technischen' Lebensraum sowie den morphologischen sowie physiologischen Eigenschaften der vorkommenden Tierarten ergeben sich folgende Anforderungen an die Technik sowie das Verfahren zur Probeentnahme:

- Der Volumenstrom zur Probeentnahme soll mindestens 50 m<sup>3</sup>/h betragen und bei einer Entnahmezeit von wenigen Minuten ist eine geringe Filtratmenge zu erzielen, bei einer Filtrationszeit von ca. 15 Minuten sollte eine Filtratmenge von maximal 0,5 – 1 Liter nicht überschritten werden.
- Die Fließgeschwindigkeit und die Filterdrücke müssen so niedrig gewählt werden, dass eine schonende Abtrennung der Invertebraten und eine mechanische Zerstörung ausgeschlossen sind. Der Filter muss zerstörungsfrei Organismen und Organismen-Bruchstücke (POM = partikuläres organisches Material) zurückhalten, der Druck  $p_{\text{Filteroberfläche}}$  sollte  $\leq 0,2$  bar sein.
- Die Probenentnahme ist so zu gestalten, dass die Probe unverfälscht und quantitativ zu entnehmen ist, sowie ein Transport ins Labor erfolgen kann. Das Filtrat muss rückstandsfrei entfernt werden können, um eine Verschleppung der Probeninhalte von einer Untersuchungsstelle zur nächsten auszuschließen.
- Anschlussmöglichkeiten an der Probenahmeapparatur für diverse Messgeräte und Messsonden sind vorzusehen.

Die Probenahmeapparatur sollte in einem PKW oder Anhänger montiert sein und autark mit Energie versorgt werden. Daher ist auf das Gewicht, die Abmessungen und einen geringen Energieverbrauch zu achten.

Zur Erfüllung dieser Anforderungen waren einige Details zum Aufbau der Apparatur festzulegen:

- Filtergrößen mit Bestimmung der Maschenweite und der Oberfläche,
- Auswahl des Filtermaterials und des Filterschichtaufbaus,

- Teilung des Probenahmenvolumenstroms auf mehrere parallele Filter mit unterschiedlichen Maschenweiten und Oberflächen.

## **2.2. Maschenweiten der Filter und Filtrationsvolumina**

In Voruntersuchungen der Projektpartner an verschiedenen Trinkwasser-Verteilungssystemen wurden bislang 13 verschiedene Tiergruppen wirbelloser Tiere nachgewiesen (Gunkel et al., 2010). Die zwischen 20  $\mu\text{m}$  und 15 mm großen Einzelindividuen müssen während der Probeentnahme in geeigneten Filtern zurückgehalten werden. Im Rahmen mehrerer Versuchsreihen wurden die zu diesem Zweck optimalen Maschenweiten mittels eines von Scheideler gebauten Kaskadenfilters ermittelt.

Aus den vorgegebenen Anforderungen wurden zur Ermittlung der erforderlichen Maschenweiten, Filtermaterialien, Teilstrommengen und der Trennungseigenschaften mehrere Vorversuche durchgeführt.

## **2.3. Vorversuch Kaskadenfilter**

Bei dem Vorversuch Kaskadenfilter wurden in einer norddeutschen Stadt Spülungen in einem mit Wasserasseln besiedelten Trinkwasserverteilungssystem durchgeführt. Die Aufteilung des Zulaufstromes war erforderlich, um das Verhältnis der einzelnen Teilströme für einen quantitativen und repräsentativen Austrag der Organismen zu ermitteln. Für eine statistisch sichere Auswertung der Vorversuche war es erforderlich, größere Mengen an Makroorganismen (hier Wasserasseln) aus der Rohrleitung auszutragen. Aus diesem Grund erfolgte der Organismenaustrag mittels  $\text{CO}_2$ -Spülung. In Abb. 2 ist der schematische Aufbau des Versuches dargestellt.

Hierbei wird in einem  $\text{CO}_2$ -Reaktor (6) eine  $\text{CO}_2$ -Lösung hergestellt. Diese  $\text{CO}_2$ -Lösung wird in einem definierten Mischungsverhältnis dem Behandlungswasser ( $\text{CO}_2$ -Wasser) zugegeben. Dazu wird über eine Absperrarmatur (1) der Zulauf des zu behandelnden Rohrleitungsabschnittes abgesperrt. Durch Schließen der Armatur (2) wird ein definierter Abschnitt abgesperrt und für die Trinkwasserversorgung außer Betrieb genommen.

Über einen Hydrant (3) wird mit einer Schlauchleitung Wasser in Trinkwasserqualität entnommen und dem Reaktor über den Anschluss (7) zugeführt. Das  $\text{CO}_2$ -Wasser als Wirkmechanismus und Trägersystem verlässt den Reaktor mit der Mischeinrichtung über den Anschluss (8) und wird über den Hydrant (4) dem zu behandelnden Rohrleitungsabschnitt zugeführt. Am Hydrant (5) tritt das  $\text{CO}_2$ -Wasser mit den narkotisierten Wasserasseln und anderen Invertebraten aus dem Trinkwassernetz aus. Danach durchströmt es einen "Zwangs-Turbulenz-Stromteiler" (11). Der Zwangs-Turbulenz-Stromteiler versetzt den Wasserstrom in Turbulenz, so dass die Organismenfracht gleichmäßig verteilt auf die beiden Filter fließen kann. Ein

Teilstrom wird im NDHD-S1 Filter (Nieder-Druck-Hoch-Durchsatz, Baureihe S1) filtriert (9), der andere Teilstrom im Kaskadenfilter (10). Durch jeweils eine Volumenstrommessung (12, 13) wird der Durchfluss kontrolliert.

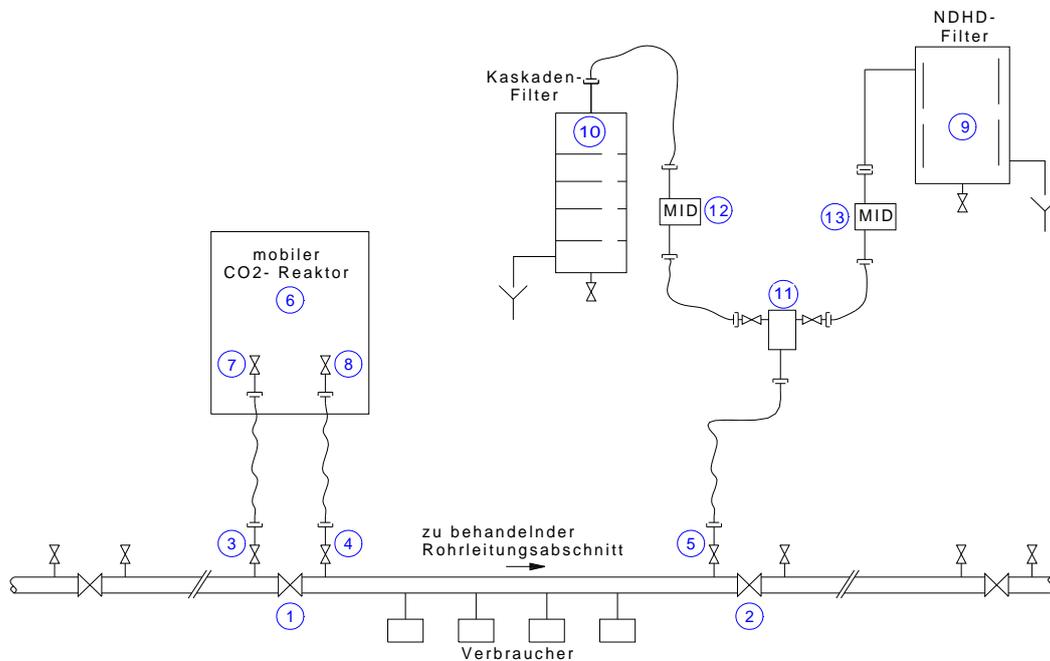


Abb. 2. Schematischer Aufbau zur Ermittlung der Maschenweiten und Teilströme mittels Kaskadenfilter.

Der Kaskadenfilter (Abb. 3) wurde mit insgesamt 4 verschiedenen Siebeinsätzen unterschiedlicher Maschenweiten bestückt.

In insgesamt 27 Spülzyklen wurde der Rückhalt wirbelloser Tiere auf den Siebeinsätzen untersucht, die Versuche selbst erfolgten an drei Teststrecken eines Trinkwasserverteilungssystems (Tabelle 1, Abb. 4). Die verwendeten Filtermaschenweiten zeigten deutlich das Vorherrschen von Partikelgrößen im Bereich von 100  $\mu\text{m}$  bis 10  $\mu\text{m}$ , während das 200  $\mu\text{m}$  Filter nur eine sehr geringe Fängigkeit aufweist.

Tabelle 1. Varianten der Versuchsdurchführung.

verwendete Maschenweiten [ $\mu\text{m}$ ]	Anzahl der Filtrationszyklen	Durchfluss [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]
200, 100, 50, 5	8	1,3 bis 3
200, 75, 25, 10	2	1,9
200, 100, 25, 10	17	2,2 bis 3,7

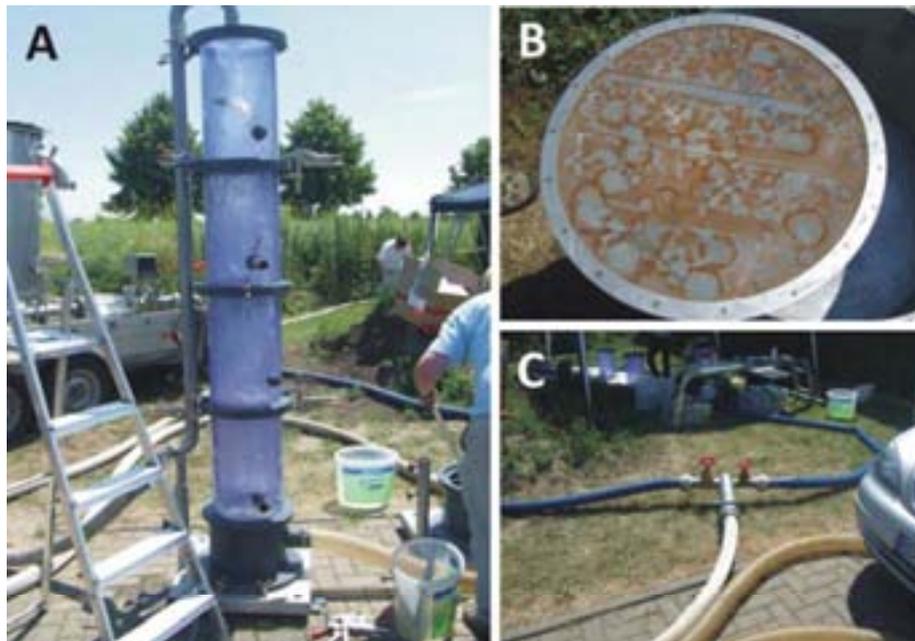


Abb. 3. Kaskadenfilter zur Testung der optimalen Maschenweiten,  
A – Versuchsaufbau, B – Siebeinsätze, C – Stromteiler (1. Versuchsvariante).



Abb. 4. Filtrerrückstände der 200 mm, 100 µm, 25 µm und 10 µm Filter bei Spülung einer Trinkwasserversorgungsleitung.

Im Rahmen des Filtrationsverfahrens muss darüber hinaus sichergestellt werden, dass die Organismen schonend, d. h. bei möglichst geringem Druck abgetrennt werden. Besondere Bedeutung haben hierbei die Filter mit kleinen Maschenweiten, da während der Filtration ein höherer Filterdruck aufgebaut wird. Auf Grund der

deutlich höheren Individuendichten kleiner Wirbelloser (Mikroinvertebraten) gegenüber den Makroinvertebraten ist es möglich, den Volumenstrom vor dem Filtrationsschritt entsprechend aufzuteilen.

Für die Filtrierapparatur ergeben sich somit folgende Randbedingungen:

- parallele Filtration unter Verwendung der Maschenweiten von 100  $\mu\text{m}$  und 25  $\mu\text{m}$
- Aufteilung des Volumenstroms vor der Filtrationsstufe (siehe Abschnitt 2.6. Stromteiler),
- praxisorientierte Größe der Filteroberfläche für Filtrationsvolumen  $>1\text{m}^3$  bei üblichen Ablagerungsverhalten.

Diese Randbedingungen stellen einen praktikablen Kompromiss zwischen einer möglichst vollständigen Erfassung der vorkommenden Arten und Individuen sowie einer „händelbaren“ Filteroberfläche dar.

## 2.4. Filtermaterialien

Bei der Auswahl des Filtermaterials waren mehrere Dinge zu beachten. Zum einen soll das Material sowohl Organismen als auch partikuläres organisches Material (Asselkot) und andere Partikel unzerstört abtrennen. Da Wasserasseln, aufgrund ihres thigmotaktischen Verhaltens, nur bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten ausge-  
tragen werden, muss die schonende Abtrennung auch noch bei hohen Volumen-  
strömen funktionieren. Des Weiteren ist auch bei hohen Schmutzfrachten ein  
vollständiges Zusetzen des Filters zu vermeiden (= geringer Druckverlust) und ein  
rückstandsloses, einfach zu realisierendes Abreinigen des Filters zu gewährleisten  
(= gute Rückspülbarkeit). Mittels dieser Anforderungen wurde anhand von  
Herstellerdatenblätter eine Vorauswahl für folgende Filtermaterialien untersucht:

Fabrikat A: 3-lagiges Drahtgeflecht (Maschenweite 100  $\mu\text{m}$ )

Fabrikat B: Quadratmaschengewebe (Maschenweite 100  $\mu\text{m}$ )

Fabrikat C: Tressengewebe (Maschenweite 25  $\mu\text{m}$ )

Fabrikat D: Drahtgewebefäden (Maschenweite 25  $\mu\text{m}$ )

Zur Charakterisierung der Oberflächen hinsichtlich der oben beschriebenen Anforderungen wurden bei der TU Berlin an der Zentraleinrichtung Elektronen-  
mikroskopie (ZELMI) Messungen an einem Röntgenelektronenmikroskop (Hitachi  
S-4000) durchgeführt. Dabei wurden zunächst Übersichtsaufnahmen und  
anschließend Detailaufnahmen bei stärkerer Vergrößerung gemacht.

### *a) 3-lagiges Drahtgeflecht (Maschenweite 100 $\mu\text{m}$ )*

Das 3-lagige Verbundgewebe besitzt laut Hersteller eine Porosität von 60 %. Zudem wird in dem zugehörigen Datenblatt ein Druckverlust am Filter von 0,08 mbar angegeben. Durch den 3-lagigen Aufbau werden in der Regel keine separaten Stützelemente mehr benötigt. Sowohl der optische Eindruck als auch

elektronenmikroskopische Übersichts- und Detailaufnahmen bestätigen die hohe Qualität des Filtermaterials. Lediglich dort, wo das feine Gewebe mit der darunter befindlichen Stützschrift in Kontakt kommt, sind Quetschungen des Materials erkennbar. Dort werden dann teilweise auch geringere Maschenweiten als  $100\ \mu\text{m}$  gemessen (Abb. 5).

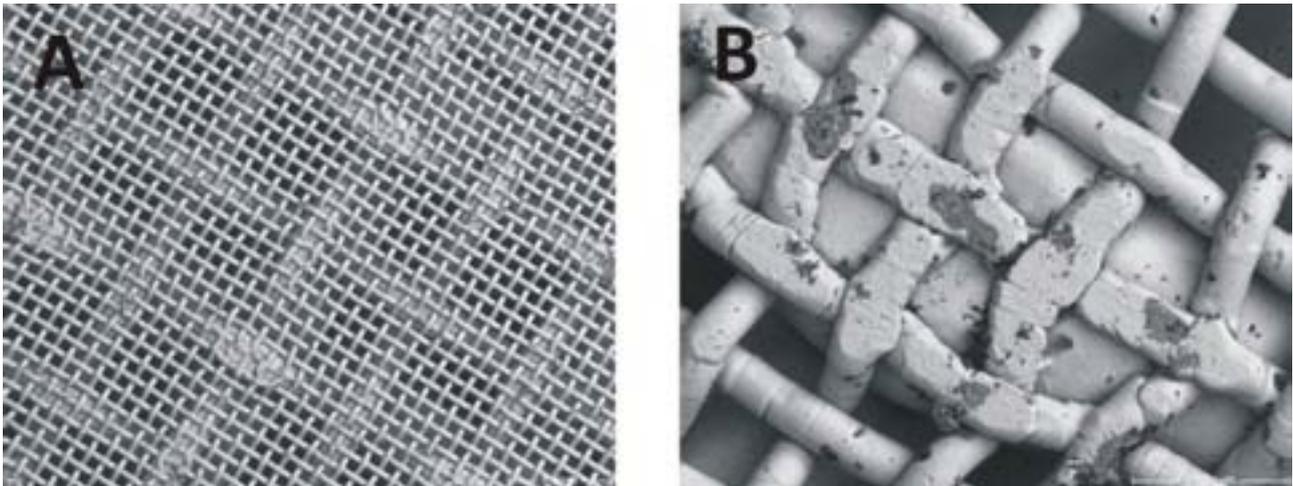


Abb. 5. Elektronenmikroskopische Aufnahmen im Rückstreuelektronenkontrast bei einer Anregungsspannung von 20 KeV des 3-lagigen Drahtgeflechts (Maschenweite  $100\ \mu\text{m}$ ).

*b) Quadratmaschengewebe (Maschenweite  $100\ \mu\text{m}$ )*

Das Quadratmaschengewebe mit einer Maschenweite von  $100\ \mu\text{m}$  verfügt laut Hersteller über eine gute Rückspül- bzw. Reinigungsfähigkeit. Spezifische Druckverluste des Materials werden nicht angegeben. Elektronenmikroskopische Übersichts- und Detailaufnahmen lassen eine sehr homogene Anordnung der Poren erkennen (Abb. 6). Stichprobenhaft gemessene Abstände zeigten durchweg Maschenweiten von  $100\ \mu\text{m} \pm 0,5\ \mu\text{m}$ . Die fehlende Stützschrift erfordert eine geeignete Konstruktion der Filtrierapparatur zur Stabilisierung.

*c) Tressengewebe (Maschenweite  $25\ \mu\text{m}$ )*

Laut Hersteller handelt es sich bei dem Tressengewebe um ein Filtermedium, das aus zwei beziehungsweise drei versetzt geschichteten Tressengeweben besteht. Das Medium zeichnet sich durch hohe Stabilität und geringe Porosität aus. Das Tressengewebe ist besonders für Anwendungen geeignet, bei denen hohe Durchflusswiderstände erwünscht sind. Der Druckverlust beträgt 100 mbar und die Porosität des Materials wird mit 10 % angegeben. Elektronenmikroskopische Aufnahmen des Filters bestätigen die geringe Porosität bzw. eine geringe

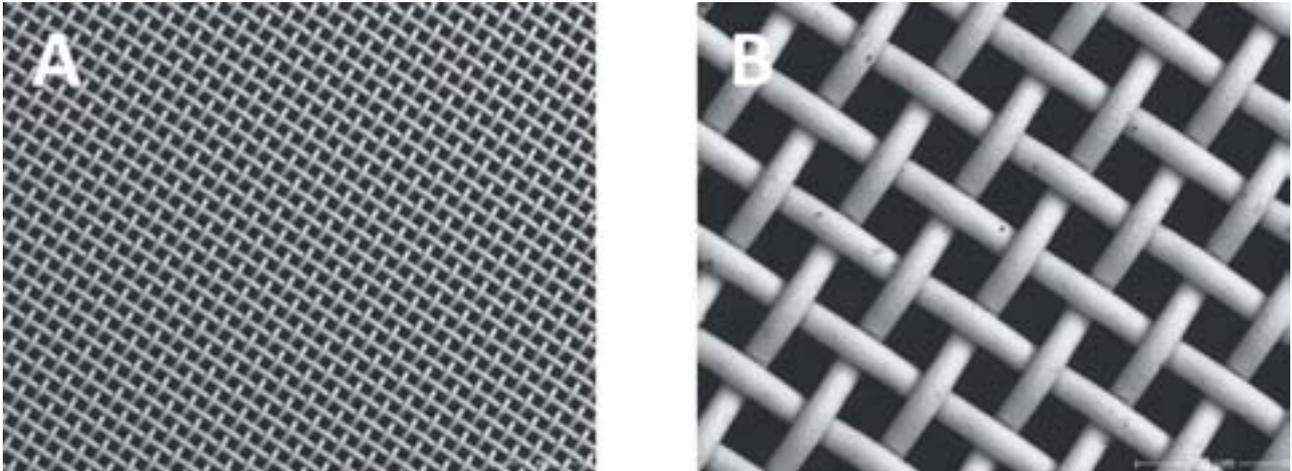


Abb. 6. Elektronenmikroskopische Aufnahmen im Rückstreuelektronenkontrast bei einer Anregungsspannung von 20 KeV des Quadratmaschengewebes (Maschenweite 100  $\mu\text{m}$ ).

Maschenweite des Materials. So wurden nur an wenigen Stellen Maschenweiten von 20 – 50  $\mu\text{m}$  gefunden. Größtenteils lagen die Spaltbreiten bei wenigen Mikrometern (Abb. 7). Aufgrund dessen konnten tiefer liegende Schichten nicht hinreichend genau untersucht werden. Insgesamt ist deshalb, abhängig von der Beschaffenheit der Probe, mit einem verhältnismäßig raschen Anstieg des Druckverlustes durch den entstehenden Filterkuchen zu rechnen; Partikel im Größenbereich von 20 – 50  $\mu\text{m}$  können den Filter schnell verstopfen.

*d) Drahtgewebe (Maschenweite 25  $\mu\text{m}$ )*

Das Drahtgewebefilter weist, verglichen mit allen anderen Metallfiltergeweben, bei einer gegebenen Filterfeinheit eine wesentlich größere Durchflussleistung und Schmutzaufnahmekapazität auf. Zudem gibt der Hersteller ausgezeichnete Rückspüleigenschaften an.

Die Begutachtung des Materials durch elektronenmikroskopische Aufnahmen bestätigt eine sehr homogene Struktur des Gewebes (Abb. 8). Die Maschenweite des Filters wird über die Dicke der Gewebefäden definiert (25  $\mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ ). Aufgrund der Anordnung der Gewebefäden ist im Kontrast zu dem Tressengewebe-Filter mit signifikant niedrigeren Durchflusswiderständen zu rechnen.

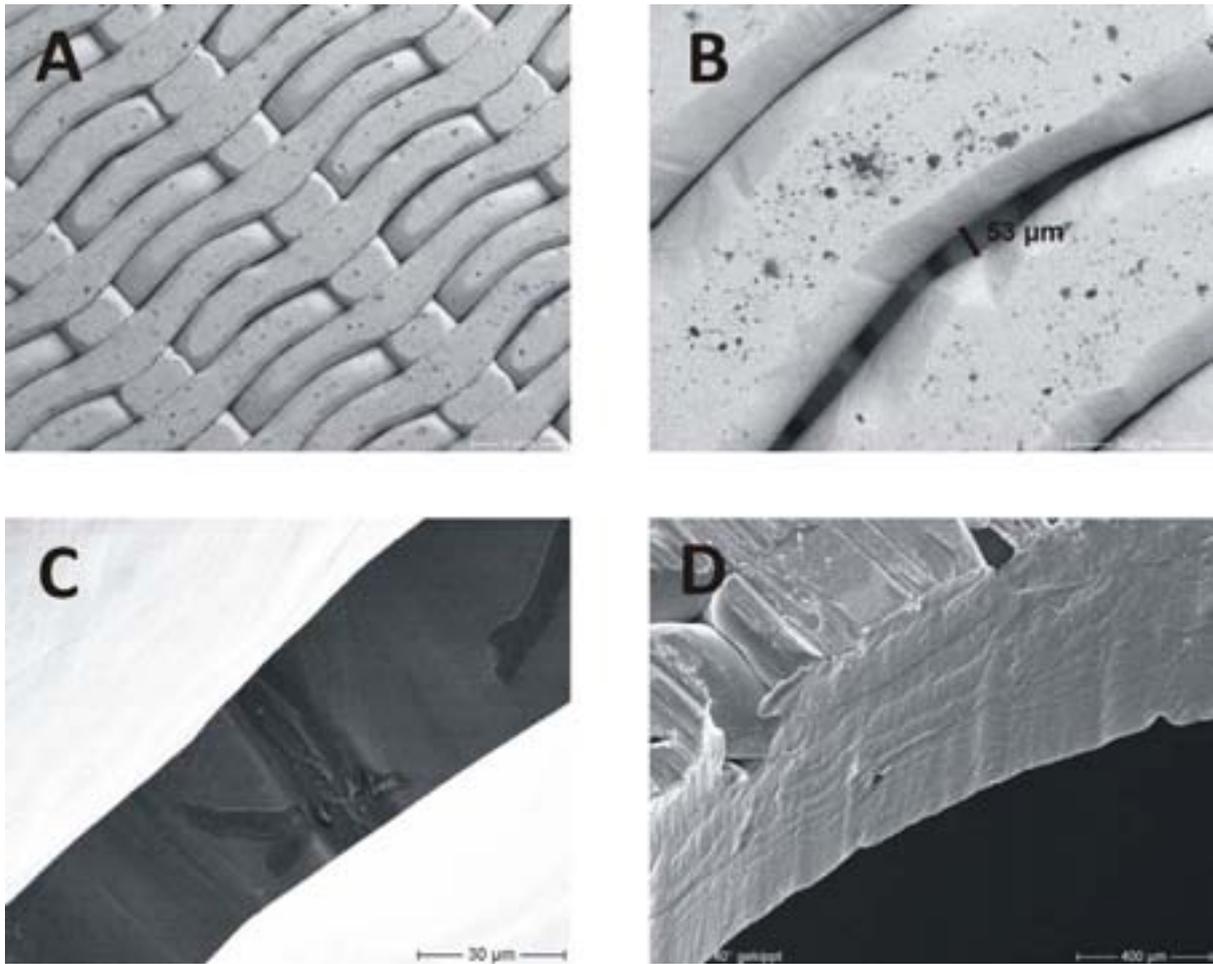


Abb. 7. Elektronenmikroskopische Aufnahmen im Rückstreuelektronenkontrast bei einer Anregungsspannung von 20 KeV des Tressengewebes (Maschenweite 25 µm).

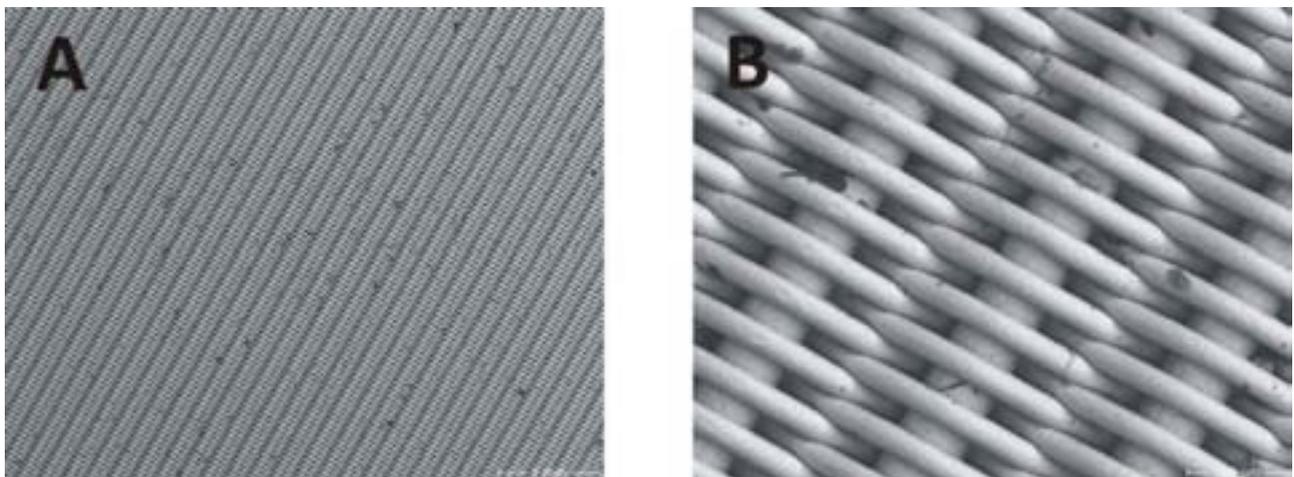


Abb. 8. Elektronenmikroskopische Aufnahmen im Rückstreuelektronenkontrast bei einer Anregungsspannung von 20 KeV des Drahtgewebes (Maschenweite 25 µm).

## 2.5. Praxistest

Nach umfangreicher Auswertung der Voruntersuchungen wurde die Praxistauglichkeit der Filtermaterialien unter Einbeziehung ihrer Filtrationseigenschaften mit Ablagerungen aus Rohrnetzspülungen untersucht und bewertet. Für die Auswahl des Filtermaterials wurden verschiedene Musterexemplare von mehreren Herstellern in einer Standrohr-Filterapparatur getestet (Abb. 9); bei einer durchgeführten Rohrnetzspülung in einer brandenburgischen Kleinstadt erfolgte die Beschickung der Filter (im Bypass und drucklos).

Angesichts der elektronenmikroskopischen Untersuchungen und der Standrohrversuche zur Ermittlung der Filtereigenschaften unter Betriebsbedingungen sind das Fabrikat B, Quadratmaschengewebe 100  $\mu\text{m}$  und das Fabrikat D, Drahtgewebefäden 25  $\mu\text{m}$  als geeignete Filtermaterialien ausgewählt worden.

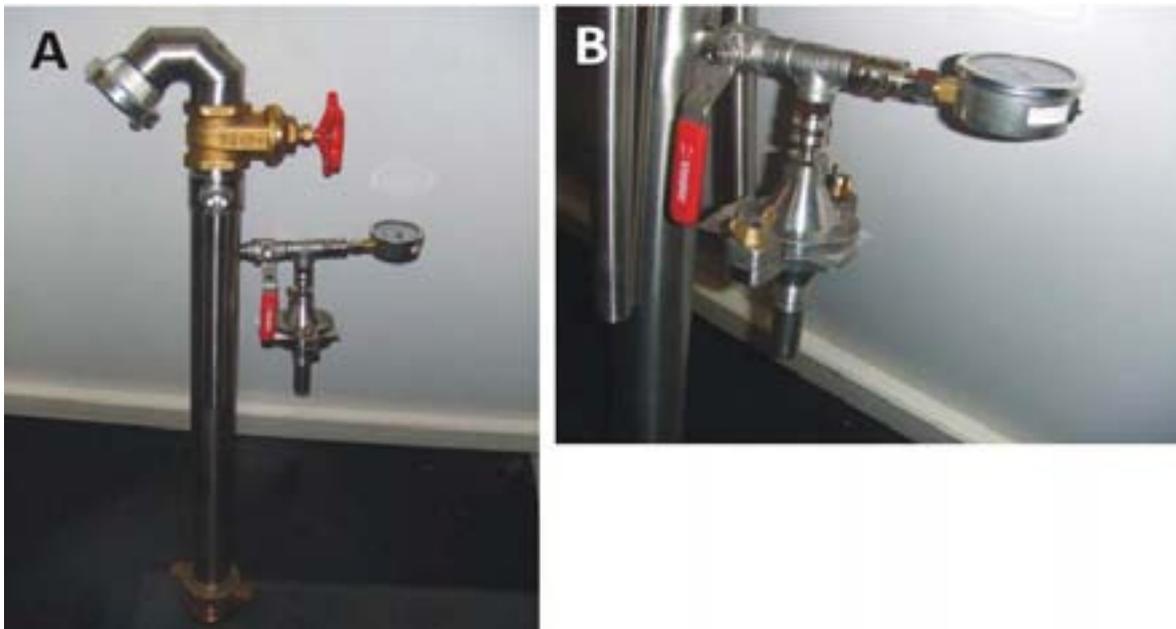


Abb. 9. Standrohr zur Überprüfung des ausgewählten Filtermaterials unter Betriebsbedingungen; A – Spezial-Standrohr mit Filtrierappatur im Bypass, B – Filtrierappatur mit eingespanntem Musterexemplar.

## 2.6. Stromteiler

Der Spülwasserstrom muss in der Apparatur vor der Filtration aufgeteilt werden, um die notwendigen Filtrationsleistungen zu erreichen. Dies ist erforderlich, um zum einen die festgelegte Durchflussmenge von bis zu 50  $\text{m}^3/\text{h}$  aufnehmen zu können, und zum anderen die Filterflächengröße praxistauglich zu konstruieren; ein Großteil der Durchflussmenge sollte zum 100  $\mu\text{m}$  Filter und ein kleinerer Teil zum 25  $\mu\text{m}$

Filter geleitet werden. Die Anforderung der Gewährleistung einer gleichbleibenden Wassermenge nach der Stromteilung ist problemlos über eine kontinuierliche Durchflussmessung mittels MID's (Magnetisch Induktiver Durchflussmesser) möglich. Die Aufteilung der für die Untersuchung wichtigen Ablagerungen inklusive der Invertebraten lässt sich dagegen nicht kontinuierlich messen. Zur Überprüfung der Trennungseigenschaften für Partikel (Ablagerungen und Invertebraten) im Verhältnis zu den Wasserteilströmen musste daher ein praxisnahes Untersuchungsverfahren entwickelt werden.

In einem ersten Ansatz wurde ein „Turbulenzstromteiler“ konstruiert, der sowohl die Entstehung einer turbulenten Strömung vor der Teilung, als auch eine Teilungsfunktion beinhaltet. Dazu wurde eine Apparatur mit Leitblechen konstruiert, an deren Ende ein einfaches T-Stück mit unterschiedlich großen Abgängen angeschlossen war. Der konstruierte Stromteiler wurde in den Versuchsaufbau zur Ermittlung der Filtermaterialien integriert (Abb. 10).

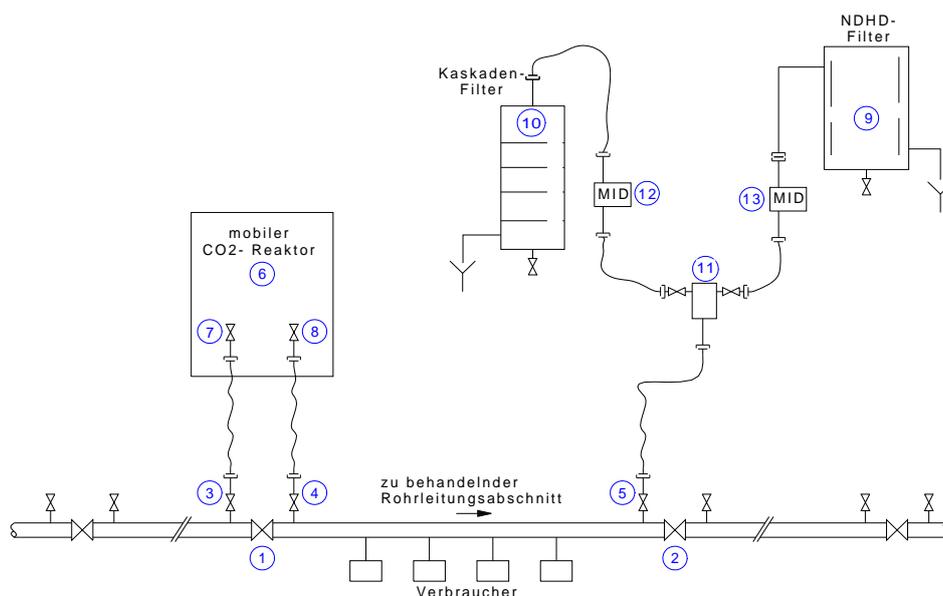


Abb. 10. Schematischer Aufbau zur Testung des Stromteilers, Nr. 11.

Es wurden verschiedene Aufteilungen der Teilströme bei unterschiedlichen Durchflussmengen getestet. In den Auswertungen hat sich gezeigt, dass entgegen den Erwartungen keine Durchfluss proportionale Aufteilung der Partikel erfolgte, lediglich die Durchflussmengen ließen sich kontinuierlich aufteilen, nicht jedoch die Partikel im proportionalen Verhältnis dazu.

Offensichtlich ist die Stromteilung in der Apparatur konstruktiv so zu gestalten, dass der Strom über den gesamten Querschnitt der zu durchströmenden Apparatur eine möglichst gleichmäßige Partikelverteilung aufweist. Zudem muss der Querschnitt am Punkt der Stromteilung so aufgeteilt werden, dass aus jedem Teil des kreisrunden Querschnitts ein gleich großer Anteil abgeteilt wird. Dies ist erforderlich, da das

Strömungsverhalten in der Mitte der Apparatur Turbulenzen aufweist und sich am äußeren Rand eine laminare Grenzschicht bildet (Abb. 11).

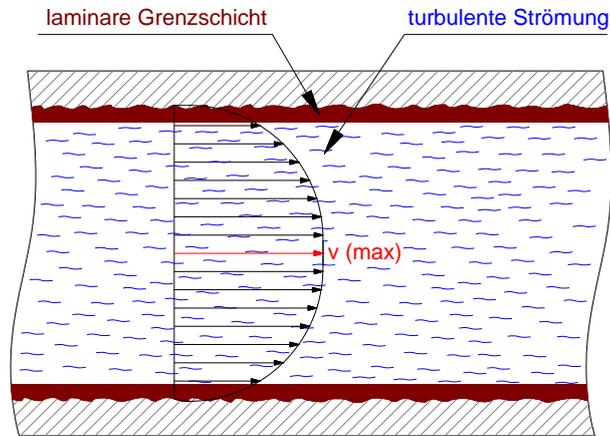


Abb. 11. Strömungsprofil einer turbulenten Rohrströmung.

Deshalb erfolgte eine absolut gleichmäßige Aufteilung des Querschnitts in zunächst acht gleiche Teile. Von den einzelnen Teilströmen sollte 1 Teil als Zuführung auf den 25  $\mu\text{m}$ -Teilstromfilter und 7 Teile auf den 100  $\mu\text{m}$  Hauptstromfilter eingesetzt werden.

In einem Versuchsaufbau (Abb. 12) wurde die neue Stromteilerapparatur im Technikummaßstab getestet.

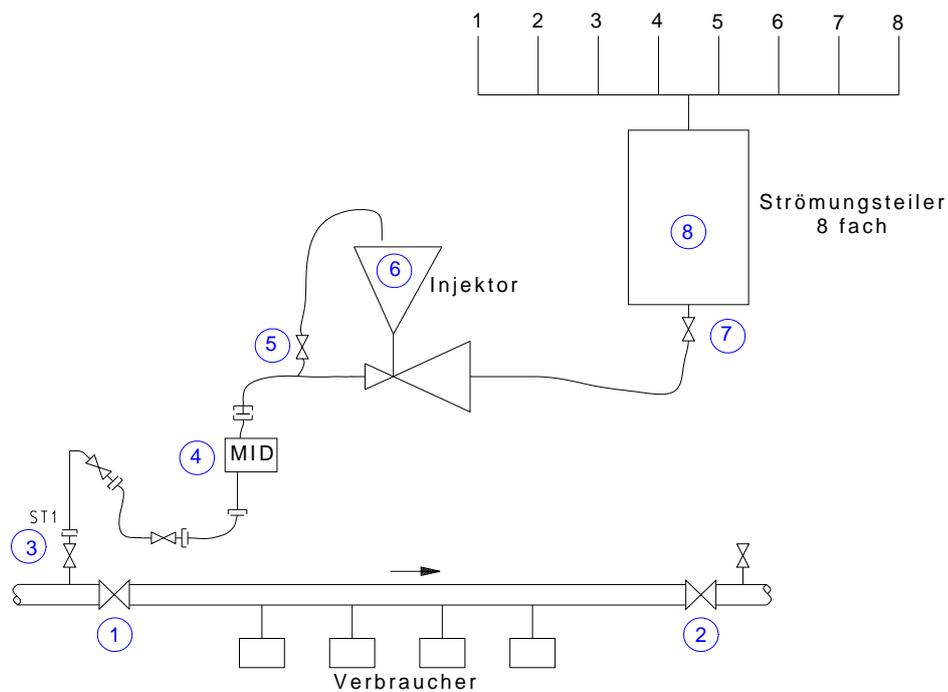


Abb. 12. Schematischer Aufbau Strömungsteilung 1/8.

Dazu wurde als Modell für die Partikel Filterkies mit einer Körnung von 1 - 2 mm in den Zulaufstrom aufgegeben und unter verschiedenen Bedingungen untersucht.

Einem Standrohr (3) wurde der Zulaufstrom entnommen und über einen MID (4) erfasst. Dem Injektor (6) wurde Kies einer Körnung von 1 – 2 mm zugegeben. Der Kies wurde durch das durchfließende Wasser mitgerissen und dann dem Strömungsteiler (8) zugeführt. Über den Schieber (5) wurde dem Injektor ein Teilstrom des Zulaufes als Spülwasser zugegeben.

Der Filterkies aus den Abläufen des Strömungsteilers wurde in 8 Gefäßen aufgefangen (Abb. 13) und später ausgewogen. Ein Abgleich von Einwaage vor Versuchsbeginn und Auswaage der Proben bestätigte den verlustfreien Versuchsablauf. Es konnte eine sehr gute Funktion des 8-fach-Stromteilers nachgewiesen werden.



Abb. 13. Strömungsteiler mit 8 Sedimentationsgefäßen für die Probenentnahme.

Bezogen auf die Gesamtmasse des Kies-Wassergemisches wurde die prozentuale Verteilung der Massen aus den 8 Teilströmen berechnet (Abb. 14). Aus der Abweichungen vom Mittelwert wurde die maximale Variationsbreite ( $= x(\max) - x(\min)$ ) und auf die Gesamtmasse bezogen die maximale prozentuale Variationsbreite berechnet, sie betragen zwischen 0,4 % (Versuch 7) und 1,8 % (Versuch 3).

Für eine einfache Handhabung wurde als Teilstromgröße für die Konstruktion des Stromteilers die Aufteilung 1/10 Teilstrom für den Zulauf des 25  $\mu\text{m}$  Filters und 9/10 Teilstrom für den Zulauf des 100  $\mu\text{m}$  Filters festgelegt. Die maximale Variationsbreite dieses Stromteilers betrug in weiteren Versuchen mit Filterkies weniger als 0,67 %.

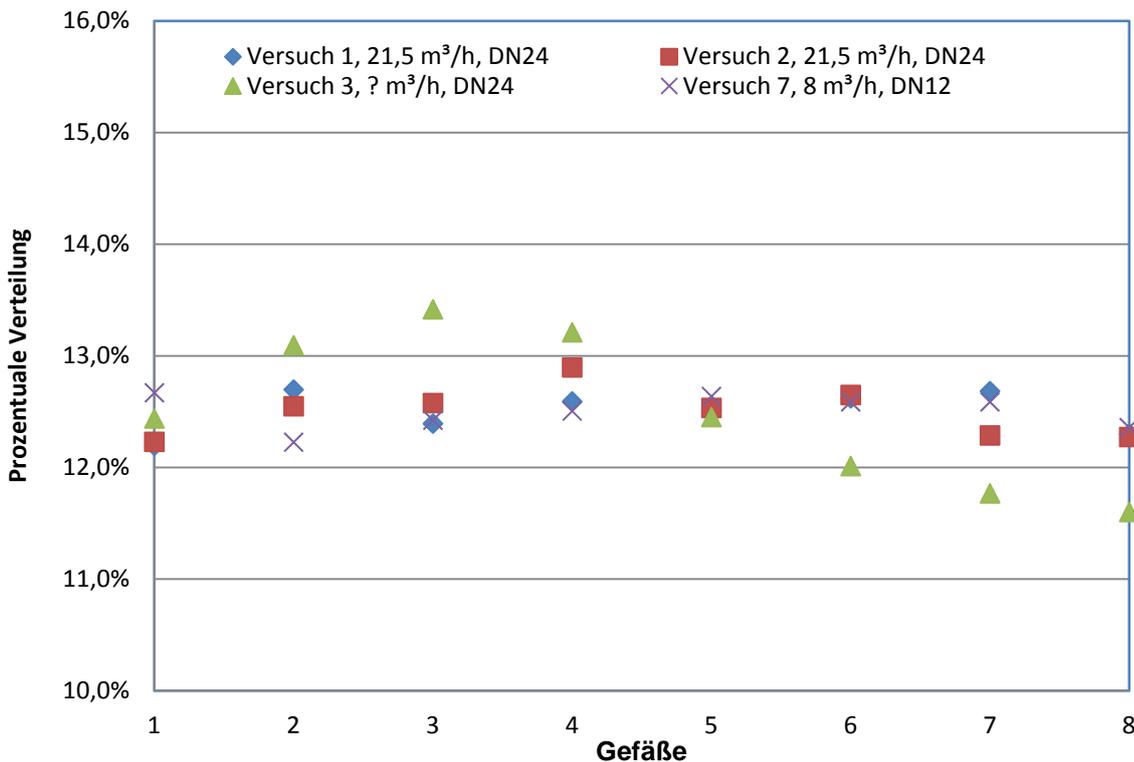


Abb. 14. Prozentuale Verteilung der Teilströme 1 – 8 des Stromteilers.

## 2.7. Aufbau der Gesamtapparatur

Für die Entwicklung der Gesamtapparatur mussten die gestellten Anforderungen mit den Ergebnissen der Vorversuche der Teilkomponenten angepasst werden. Daraus ergab sich die Festlegung der abschließenden Anforderungen an die Gesamtapparatur:

- Der Volumenstrom zur Probeentnahme soll mindestens 50 m<sup>3</sup>/h erreichen, bei einer Entnahmezeit von wenigen Minuten ist eine geringe Filtratmenge zu erzielen, bei einer Filtrationszeit von ca. 15 Minuten sollte eine Filtratmenge von max. 0,5 – 1 Liter nicht überschritten werden:
  - Anschlussnennweiten von min. DN 65 im Gesamtzulauf,
  - Konstruktion der Filtergeometrie mit guten Reinigungseigenschaften und mit geringer Probeentnahmemenge.
- Die Fließgeschwindigkeit und Filterdrücke müssen so niedrig gewählt werden, dass damit eine schonende Abtrennung der Invertebraten möglich und eine mechanische Zerstörung ausgeschlossen ist:
  - Konstruktion des Einlaufbereichs vor der Filterfläche mit Gleichrichtung des Stroms und sanftem, kontrolliertem Übergang auf die Filteroberfläche.

- Die Probenentnahme war so zu gestalten, dass die Probe unverfälscht, quantitativ zu entnehmen und ein Transport ins Labor zur Entnahme der Organismen möglich ist; das Filtrat muss rückstandsfrei entfernt werden können, um eine Verschleppung der Probeninhalte von einer Untersuchungsstelle zur nächsten auszuschließen:
  - Konstruktion der Filtergeometrie mit guten Reinigungseigenschaften und rückstandsfreier Entnahme der Probe, siehe oben,
  - Konzeption einer Reinigungsmethode mit entsprechenden Apparaturen.
- Planung von Anschlussmöglichkeiten an der Probenahmeapparatur für diverse Messgeräte und Messsonden.
- Die Probenahmeapparatur sollte mobil und in einem PKW oder Anhänger montiert sein und autark mit Energie versorgt werden:
  - Festlegungen von Komponentengrößen zur Auslegung der Gesamtapparatur und erforderliches Zubehör einschließlich eines Fahrzeugkonzepts.

Für die Gesamtauslegung wurde zunächst die Filtergeometrie festgelegt. Um alle Anforderungen zu erfüllen sind beide Komponenten, sowohl der 25 µm Filter für den 1/10 Teilstrom als auch der 100 µm-Filter für den 9/10 Teilstrom, aus Erfahrungswerten und überschlägiger Ermittlung der Filteroberfläche als Kegel konstruiert worden. Zur schonenden Anströmung wurde der Zulauf oberhalb des Filters in einer Einlaufzone tangential angeordnet.

In Abb. 15 ist der schematische Aufbau der Gesamtapparatur, des NDHD-S2 Filters (Nieder-Druck-Hoch-Durchsatz, Baureihe S2), dargestellt.

Für die Reinigung sind Reinigungsdüsen in das System integriert, und für das Reinigungswasser ist ein separater Partikelfilter (8) vorinstalliert worden. Für die Protokollierung der Gesamtpülwassermenge und der Durchflussmengen wurde ein MID (Magnetisch Induktiver Durchflussmesser) (4) in den Zulauf der Gesamtapparatur installiert. Zur visuellen Beurteilung des Spülwassers wurde vor dem MID ein Schauglas (3) integriert. Um bei anhaltender Trübung auch nach Entnahme der geplanten Spülwassermenge den Rohrnetzabschnitt trübungsfrei zu spülen ist über einen Dreiwegehahn (5) das direkte Umleiten des Spülwassers in den Abfluss, ohne über die Filter spülen zu müssen, möglich.

Vor den beiden Filterkomponenten ist der Stromteiler montiert. Die Durchflussmengen lassen sich durch die Ventile (17) des 9/10 Teilstroms für den 100 µm Filter und (16) des 1/10 Teilstroms für den 25 µm-Filter einstellen.

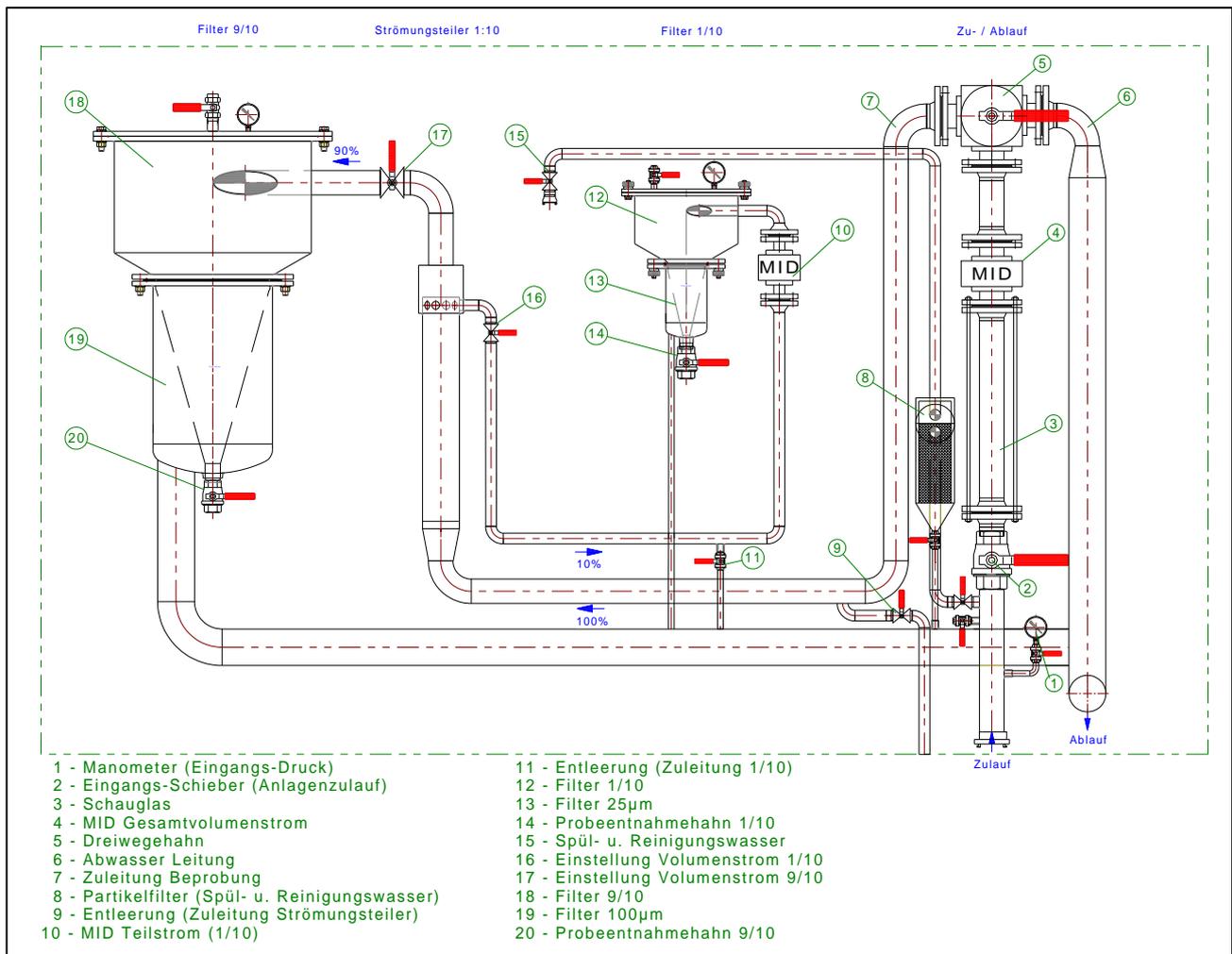


Abb. 15. Schematischer Aufbau der Gesamtapparatur (NDHD-S2 Filter).

Nach dem Erreichen der zu untersuchenden Spülwassermenge kann über einen Hauptabsperrhahn (2) die Spülung gestoppt werden. Der Abgriff des Reinigungswassers erfolgt vor der Absperrarmatur. Nachspülungen für die Trübungsentfernung können durch betätigen des Dreiwegehahns (5) und leicht geöffnetem Hauptabsperrhahn (2) erfolgen.

## 2.8. Probenahme

Durch die Anordnung der Ablaufleitungen in beiden Filterkomponenten lassen sich die Filtergehäuse soweit entleeren, dass sich nur noch wenig Restflüssigkeit mit dem Filtratrückstand im Inneren der Filter befindet. Durch das sanfte und kontrollierte Abspülen der Filteroberflächen mit darauf abgestimmten Reinigungsdüsen lässt sich die gesamte Filteroberfläche von oben nach unten reinigen.

Das überschüssige Spülwasser wird durch die Filteroberfläche in den Filterablauf geleitet. Dadurch lässt sich die Probenahmemenge auf ein Minimum reduzieren, so

dass die Probenahmegefäße klein gehalten werden können; in der Regel reichen Probenahmegefäße von 300 mL aus.

Zur weiteren Reduzierung der Probenmenge für den Transport in ein Labor ist eine Reduzierstation konstruiert worden (Abb. 16), in der die entnommene Probe aus den beiden Untersuchungsfiltern über einen kleineren Filter (1) weiter konzentriert werden kann.



Abb. 16. Reduzierstation mit Probeabfüllung in ein Gefäß zum Transport ins Labor, 1 = kleiner Filter, 2 = Abfluss, 3 = Filterhalterung, 4 = Probengefäß.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1. Rückhalt von Invertebraten bei verschiedenen Filter-Maschenweiten

Die Auswertung der Ergebnisse des Versuchs durch die TU Berlin haben gezeigt, dass Invertebraten und partikuläres organisches Material (Asselkot) eine ähnliche Ausspülcharakteristik aufweisen (Abb. 17). So wurden sowohl Asselkot als auch *Asellus aquaticus* (unter Zugabe von CO<sub>2</sub>) schon während der ersten Spülung nahezu quantitativ ausgetragen. Bei schonender Abtrennung und ausreichender Strukturstabilität kann Asselkot daher prinzipiell als Indikator für das Vorkommen von Wasserasseln in Trinkwasserverteilungssystemen herangezogen werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass vorzugsweise im Bereich kleiner Maschenweiten bis zu 50 % der im Spülwasser vorhandenen Individuen zurückgehalten werden. Fast 60 % der im Spülwasser vorhandenen Einzelindividuen sind kleiner als 25 µm und werden

somit erst in Filtern mit Maschenweiten von 10 µm oder geringer zurückgehalten. Bezogen auf die insgesamt vorhandene Biomasse entspricht dies jedoch nur einem Anteil von 5 %.

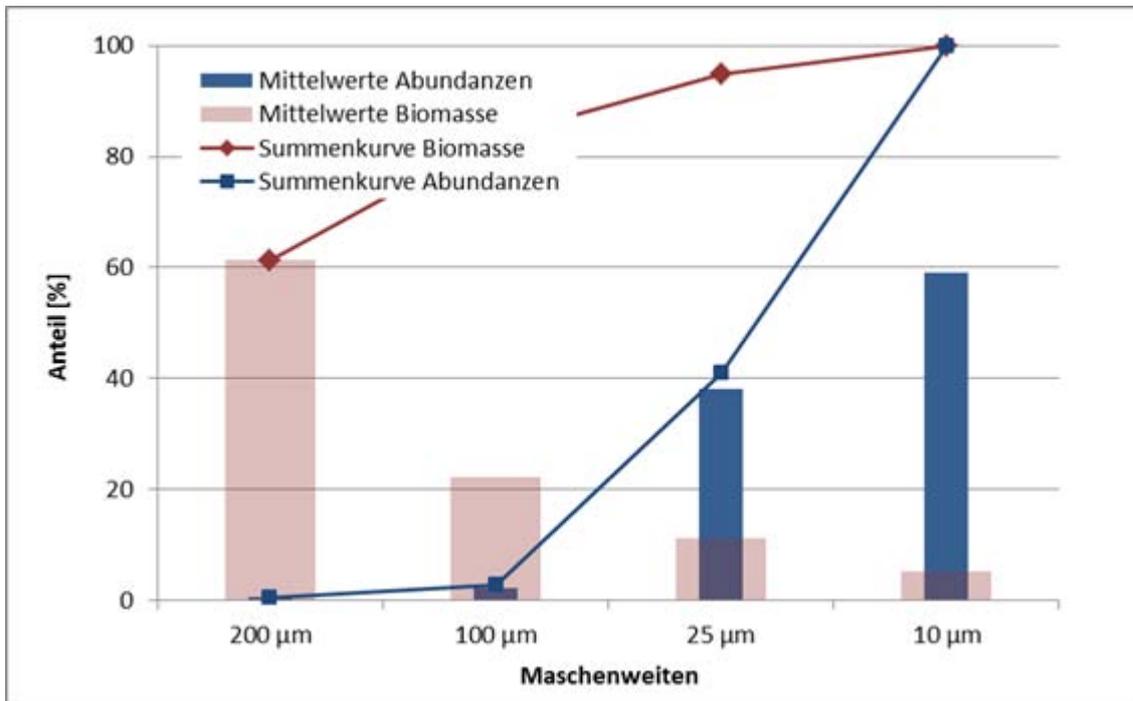


Abb. 17. Abtrennung der Invertebraten mit verschiedenen Maschenweiten des Kaskadenfilters zur Ermittlung der optimalen Maschenweiten für die Filtrierapparatur (Anzahl der Versuchsserien: 17).

Als Kompromiss zwischen Druckverlust und einer möglichst vollständigen Erfassung der vorkommenden Arten wurde für die zu entwickelnde Filtrierapparatur eine minimale Maschenweite von 25 µm festgelegt. Zur zuverlässigen Abtrennung von Makroinvertebraten und des partikulären organischen Materials (i.w. Asselkot) ist eine Maschenweite von 100 µm ausreichend.

### 3.2. Vorkommen verschiedener Invertebraten im Trinkwasserversorgungsleitungen

Die zu entwickelnde Filtrierapparatur muss sowohl im Falle hoher als auch sehr niedriger Besiedlungsdichten von Invertebraten bzw. Konzentrationen von partikulären Ablagerungen ein genaues, statistisch sicheres Ergebnis garantieren (Abb. 18, Tabelle 2). Dafür ist in Abhängigkeit der zu betrachtenden Tiergruppe eine Mindestmenge an Wasser zu filtrieren. Da insbesondere im Falle von Wasserasseln

ein entsprechender Nachweis auch bei geringen Besiedelungsdichten erfolgen muss, sollte mit der Probenahmeapparatur generell mehr als 1 m<sup>3</sup> filtrierbar sein.



Abb. 18. Wirbellose Tiere in Trinkwasserverteilungssystemen (von links nach rechts): Kleinkrebse (*Alona guttata*); Schalenamöben (*Centropyxis aculeata*); Fadenwürmer (*Nematoda* n.det.); Wassermilben (*Soldanellonyx monardi*); Ringelwürmer (*Nais communis*); Bärtierchen (*Dactylobiotus dispar*).

Tabelle 2. In der Trinkwasserverteilung festgestellte Taxa (aus: Gunkel et al., 2010, Grundlage: 240 Analysen).

Tiergruppe	Wahrscheinlichkeit des Vorkommens [%]	festgestellte Individuendichten [Ind. /m <sup>3</sup> ]		
		Mittelwert	Minimum	Maximum
Schalenamöben ( <i>Testacea</i> )	99	20601	2	737671
Ruderfußkrebse ( <i>Copepoda</i> )	84	438	0,2	5440
Fadenwürmer ( <i>Nematoda</i> )	80	241	0,2	7850
Rädertierchen ( <i>Rotatoria</i> )	76	304	1	6200
Blattfußkrebse ( <i>Cladocera</i> )	58	734	2	68400
Ringelwürmer ( <i>Oligochaeten</i> )	56	46	0,01	1730
Wassermilben ( <i>Hydracarina</i> )	54	84	0,03	2147
Wasserasseln ( <i>Asellus aquaticus</i> , <i>A. cavaticus</i> )	53	10	0,003	216
Muschelkrebse ( <i>Ostracoda</i> )	24	1654	1	96097
Bärtierchen ( <i>Tardigrada</i> )	19	55	2	667
Strudelwürmer ( <i>Turbellaria</i> )	9	83	5	725
Bauchhärlinge ( <i>Gastrotricha</i> )	5	42	0,1	333
Wimpertierchen ( <i>Ciliata</i> )	3	112	2	606

### 3.3. Beladung der 25 µm und 100 µm Filter bei Rohrnetzspülungen

Die Beladungsbedingungen auf der Filteroberfläche wurden mit einem Standrohr mit angeschlossenen Musterfiltereinsätzen bei relevanten Durchflussmengen getestet. Im Verhältnis der berechneten Durchflussmengen wurden Fließgeschwindigkeiten in dem ausgespülten Rohrnetzabschnitt von mindestens 1 m/s erzielt. Bei der Filtration im Bypass über die Muster-Filtereinsätze konnte somit der Austrag von praxisrelevanten Ablagerungen und Invertebraten zu Grunde gelegt werden. Um die Anforderung "drucklos" mit  $p < 0,2$  bar in der Praxis zu gewährleisten, wurde ein Sicherheitsfaktor in den Versuchen aufgeschlagen. Die Vorgabe für den maximalen Druck auf der Filteroberfläche wurde somit auf 0,5 bar für die Vorauswahl der Materialien festgelegt und durch ein installiertes Manometer überwacht.

Abb. 19 zeigt Übersichts- und Detailaufnahmen der beladenen Filter. Obgleich die Filtrationsdauer vergleichsweise kurz gewählt wurde, ist auf den Filtern A und C eine recht starke Belegung zu erkennen, im Allgemeinen handelte es sich dabei um relativ feines Material. Das Auftreten unzerfallener Asselkotpartikel konnte nur in wenigen Fällen dokumentiert werden. Aufgrund der schonenden Filtration ist vermutlich der Zerfall des ausgespülten Materials bereits im Rohrnetz erfolgt und nicht beim Auftreffen auf dem Filter. Die Beladung des Filters C war ebenfalls hoch und in vielen Fällen konnten unversehrte Asselkotpartikel identifiziert werden (Abb. 19D).

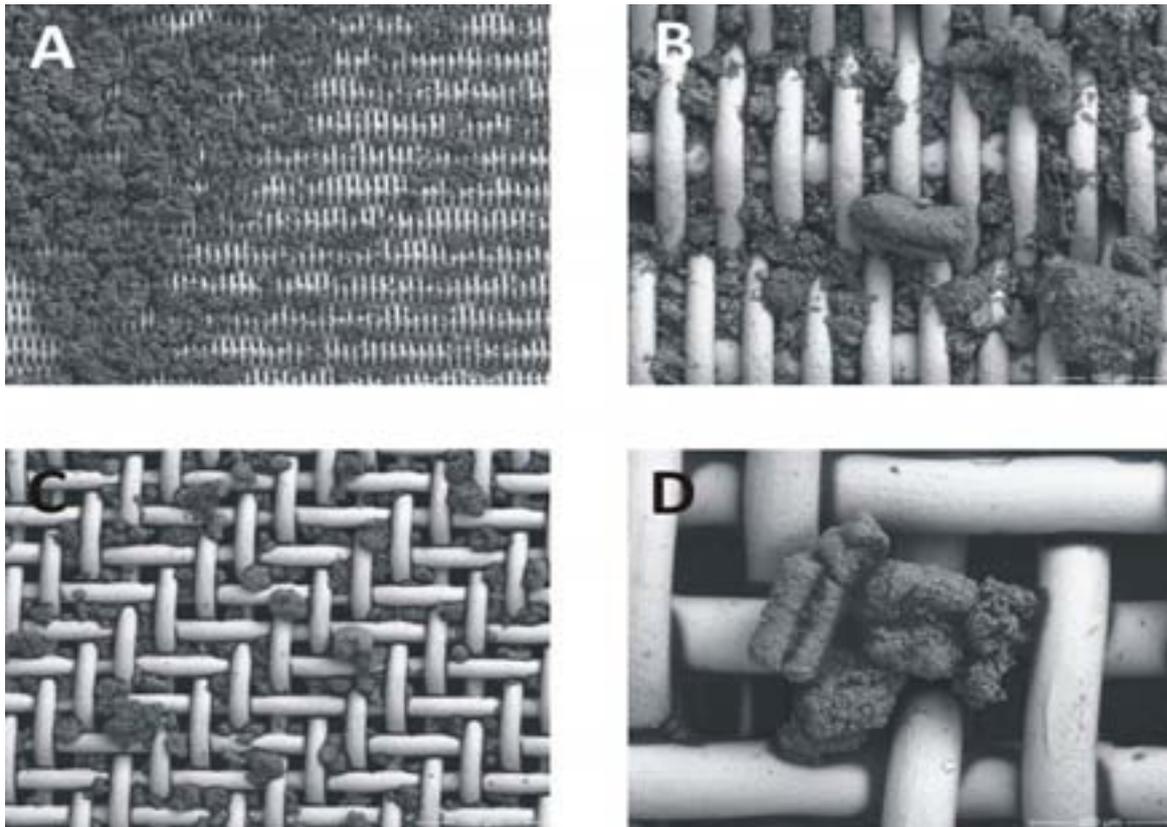


Abb. 19. Übersichts- und Detailaufnahmen der untersuchten Filtermaterialien; (A) und (B) zeigen das “Fabrikat D” 25  $\mu\text{m}$  Drahtgewebefäden, (C) und (D) zeigen das Quadratmaschengewebe mit einer Maschenweite von 100  $\mu\text{m}$ .

Die schadfreie Abtrennung zur Identifizierung und Vermessung ist somit bei sehr geringem Überdruck möglich. Versuche bei höheren Drücken (bis zu 0,5 bar Überdruck) zeigten, dass die zu konstruierende Filtrationsapparatur auch bei höheren Drücken ohne eine Beeinflussung des Filtrerrückstands betrieben werden kann. Angesichts der hier dargestellten Ergebnisse der Standrohrversuche zur Ermittlung der Filtereigenschaften unter Betriebsbedingungen sind das Fabrikat B, Quadratmaschengewebe 100  $\mu\text{m}$  und das Fabrikat D, Drahtgewebefäden 25  $\mu\text{m}$  als geeignete Filtermaterialien ausgewählt worden. Für das Filtermaterial sind die Kenndaten der Hersteller und Durchflussmengen aus den Versuchen im Forschungsprojekt in der Tabelle 3 zusammengefasst.

### 3.4. Stromteilung

Um die geforderten Durchflussmengen von bis zu 50  $\text{m}^3/\text{h}$  sicher filtrieren zu können, ist ein Stromteiler entwickelt worden, der 9/10 der Gesamtdurchflussmenge auf den 100  $\mu\text{m}$ -Filter leitet (Abb. 20 A) und 1/10 der Gesamtdurchflussmenge auf den 25  $\mu\text{m}$ -Filter leitet (Abb. 20B).

Tabelle 3. Kenndaten Filtermaterial.

Bezeichnung	Max. Teil- Volumenstrom	Geom. Porengröße <sup>1</sup>					
	m <sup>3</sup> /h	µm	Dicke mm	Porosität %	As <sup>2</sup> mm <sup>2</sup> /cm	Rp <sup>3</sup> N/ cm	Eu <sup>4</sup>
Filter 1/10	6	25	2	60	3,6	573	356
Filter 9/10	55	100	2	60	3,6	573	53

<sup>1</sup>Geometrische Porengröße = ein auf Basis charakteristischer Gewebeparameter wie Bindungsart, Drahtdurchmesser und Teilung berechneter Wert, beschreibt den Durchmesser der größten, sphärischen Kugel, die das Gewebe gerade noch passieren kann. <sup>2</sup>As = wirksame Querschnitt an den Schnittkanten, senkrecht zu den Drähten verlaufen, um Zugkräfte auf zu nehmen, <sup>3</sup>Rp = Streckgrenzwert für die Belastung der Gewebe senkrecht zum Querschnitt As, der laut Hersteller nicht überschritten werden darf, <sup>4</sup>Eu = dimensionslose Kennzahl (Eulerzahl) zur Beschreibung der Druck- zu den Trägheitskräften der Gewebe.



Abb. 20 A. 100 µm Filter, geringe Beladung; Abb. 20 B: 25 µm Filter, hohe Beladung.

Die Besonderheit liegt im Detail des Teilstromabgriffs innerhalb des Stromteilers, der zur sicheren Aufteilung der Partikelfrachten führt. Die Durchflussmengen der Teilströme werden über MID's erfasst. Zur leichten Bedienung bzgl. Ablesbarkeit und Einstellbereich ist ein MID für die Messung der Gesamtdurchflussmenge und ein MID für den 1/10 Teilstrom installiert worden.

### 3.5. Betrieb des NDHD-S2 Filters

Im Zulauf des NDHD-S2 Filters sind ein Hauptabsperrhahn sowie ein Schauglas zu visuellen Begutachtung integriert. Für die Spülung nach der Probenahme zur Entfernung eventuell vorhandener Trübungen kann der Wasserfluss mittels Dreiwegehahn nach dem Schauglas direkt auf den Abfluss umgestellt werden.

Der NDHD-S2 Filter (Abb. 21) ist komplett mit sämtlichem Zubehör in einem Anhänger installiert, der mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 1200 kg mit nahezu jedem PKW transportiert werden kann.



Abb. 21. Gesamtapparatur: NDHD-S2 Filter.

Der Zulauf vom Hydranten-Standrohr zum NDHD-S2 wird mittels zugelassenen Trinkwasserschläuchen (blau, Anschlussgröße 75 mm Storz-B) angeschlossen. Der Anlagenablauf wird in Gewebeschläuchen (natur-weiß, Anschlussgröße 100 mm Storz-A) angeschlossen. Zur einfachen Bedienung ist das Anschluss-Zubehör in einer Box auf der Deichsel montiert.

Die Stromversorgung erfolgt durch Akkus mit Wechselrichtern (12/230V) und ist im Inneren des Anhängers in Transportboxen untergebracht (Abb. 22).

#### **4. Diskussion**

Die Aufgabenstellungen für die Entwicklung und Konstruktion einer neuen Probenahmeapparatur und eines Messsystems haben gezeigt, dass kleine Einflussfaktoren wie z. B. das Detail der Stromteilung erhebliche Auswirkungen auf das Ergebnis der filtrierte Rückstände haben können. Bei den Praxistests wurde



Abb. 22. Zubehör: Stromversorgung in Transportboxen links, Standrohr und Schieberschlüssel rechts.

auch deutlich, dass sich viele dieser Einflussfaktoren bereits durch die persönliche Handhabung der verschiedenen Schritte und die Abfolgen bei der Probeentnahme auf das Ergebnis auswirken können.

Einige Beispiele dieser Einflussfaktoren sind,

- Auswahl der Probenorte bzw. Hydranten-Positionen im Rohrnetz,
- Kenntnisstand über den Zustand der Rohrleitung vor der Probenahme,
- Beschriftung der Proben, Reduzierung der Filtrerrückstände zum Abfüllen in kleinere Probengefäße,
- Handhabung der Messtechnik etc.

Aufgrund dieser Fülle von Fehlern bzw. Unterschieden in der Anwendung von Probenahme- und Messtechnik ist es wichtig, zum einen eine möglichst einfach bedienbare Technik (Fehlerminimierung) und zum anderen eine möglichst eindeutige und leicht verständliche Anleitung zur Verfügung zu stellen. Beides muss zwingend so aufeinander abgestimmt sein, dass reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden können.

## Referenzen

- TrinkwV (2001) Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch. BGBl I 2001, 959, Änderung durch Art. 263 V v. 25.11.2003 I 2304
- DVGW (1997) Tierische Organismen in Wasserversorgungsanlagen., DVGW Regelwerk , Merkblatt W271. DVGW Bonn
- Lieverloo, van J. H. M. van, Bosboom, D. W., Bakker, G. L., Brouwer, A. J., Voogt, R., Roos, De J. E. M. (2004) Sampling and quantifying invertebrates from drinking water distribution mains. Water Res. 38, 1101 – 1112.
- Gunkel, G., Michels, U., Scheideler, M. & Ripl, K. (2010) Vorkommen und Bedeutung von Kleintieren in Trinkwasserverteilungssystemen - Maßnahmen zu deren Regulierung. In: 3R (12), S. 716–724
- van Lieverloo, J. H. M. (1997) How to Control Invertebrates in Distribution Systems: By Starvation or by Flushing? Am. Water Works Ass., ISBN 0898679583, 35 pp.
- van Lieverloo, J. H. M., Hoogenboezem, W., Veenendaal, G. & van der Kooij, D. (2012) Variability of invertebrate abundance in drinking water distribution systems in the Netherlands in relation to biostability and sediment volumes. Water Research 46, 16, 4918–4932.

## Danksagung

Herzlicher Dank gilt den beteiligten Wasserversorgungsunternehmen für die Möglichkeit der Durchführung verschiedener Untersuchungen und für die praktische, technische Unterstützung des Projektes. Ohne die Unterstützung der Wasserversorger wäre das Projekt nicht durchführbar gewesen. Das Projekt wurde gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Aif, ZIM - wir bedanken uns für die kompetente Projektbegleitung. Den Projektpartnern einschließlich ihrer Mitarbeiter gilt ein besonderer Dank für die Unterstützung, kompetenten und konstruktiven Diskussionen bei der Entwicklung der Apparatur und für die angenehme und vertrauensvolle Zusammenarbeit.

## Kontaktadresse

Michael Scheideler  
Scheideler Verfahrenstechnik GmbH, Lorenkamp 3, 45721 Haltern am See.  
Fon: ++49 2364 105450, Fax: ++49 2364 1054520, e-mail: ms@scheideler.com

## **Partikuläre organische Stoffe als Nahrungsquelle für Invertebraten – Modellierung der Ablagerung in einem Trinkwasserverteilungssystem**

Klaus Ripl & Wolfgang Uhl

Technische Universität Dresden, Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft, Professur Wasserversorgung

**Abstract:** Investigations on particles entering drinking water supply systems were exemplarily performed for a distribution network of about 100 km length. In this connection, both the particle entry from the drinking water treatment plant and the formation of particulate matter due to corrosion of unprotected steel and cast iron pipes were considered. By means of systematic flushing campaigns within a representative section of the distribution system, the transport and the deposition of the entrained particles could be determined and assessed. With the knowledge of the distribution system hydraulics, particle characteristics, particle formation rates as well as the particulate load of the drinking water and by using a dynamic water quality model, particle deposition could be calculated for the entire distribution system. For the calculations the focus was mainly on the organic fraction of the particulate matter since this fraction may be the source of food for invertebrates. By modelling the deposition of particulate organics it was shown that the deposition rate decreased with the distance from the source of entry. Consequently, the largest deposits formed in the immediate vicinity to the treatment plant and corresponded to turbidity equivalents of up to 100 FNU within 6 months of system operation. Within individual pipe sections located near the treatment plant the deposition rate was 10 mg/(m<sup>2</sup>·day), whereas the rates were less than 0.4 mg/(m<sup>2</sup>·day) for the bigger part of the distribution system investigated.

Moreover, the interrelation between quantity and deposition rate of particulate organics and the presence as well as the growth rate of invertebrates (water lice) was investigated. It was shown that the presence of particulate organic deposits within distribution systems can support the occurrence and settlement of invertebrates (especially of water lice). However, no significant correlation could be determined so far.

**Key words:** Drinking water distribution system, particle, deposit, modelling, invertebrates

**Kurzfassung:** Für ein Trinkwasserverteilungsnetz wurde exemplarisch der Eintrag von partikulären Wasserinhaltsstoffen erfasst. Dabei wurden sowohl der Eintrag aus dem Wasserwerk als auch der Eintrag durch Korrosion ungeschützter Stahl- und Graugussleitungen betrachtet. Anhand von systematischen Rohrnetzspülungen in einem repräsentativen Teilbereich des Verteilungsnetzes erfolgte Bestimmung und Erfassung von Transport und Ablagerung der eingetragenen Partikel. Mit Kenntnissen von Rohrnetzhydraulik, Partikeleigenschaften, Bildungsraten und Frachten konnte für

das gesamte Verteilungsnetz die Bildung von Ablagerungen partikulären Materials unter Verwendung eines dynamischen Wassergütemodells berechnet werden. Die Betrachtung fand hauptsächlich für den organischen Anteil der partikulären Ablagerungen statt, da diese als Nahrungsquelle für Invertebraten dienen können. Durch die Modellierung der Ablagerungsbildung der partikulären organischen Stoffe konnte gezeigt werden, dass die Geschwindigkeit der Ablagerungsbildung mit der Entfernung zur Eintragsquelle abnimmt. Folglich haben sich die größten Ablagerungen in unmittelbarer Nähe zum Wasserwerk ausgebildet. Diese waren in einzelnen Leitungen mit einem Trübungsäquivalent von bis zu 100 FNU in ca. 6 Monaten Betriebszeit sehr hoch. Die Geschwindigkeit der Ablagerungsbildung betrug in einzelnen Leitungen in der Nähe des Wasserwerks bis zu 10 mg/(m<sup>2</sup>·Tag). Für den Großteil des Verteilungsnetzes ergaben sich Raten der Ablagerungsbildung von weniger als 0,4 mg/(m<sup>2</sup>·Tag).

Darüber hinaus wurde der Zusammenhang zwischen partikulären organischen Ablagerungen und dem Vorkommen bzw. der Wachstumsrate von Invertebraten (Wasserasseln) untersucht. Dabei zeigte sich, dass das Vorhandensein von partikulären organischen Ablagerungen in Verteilungsnetzen zu einer Besiedlung von Invertebraten (speziell von Wasserasseln) führen kann. Darüber hinaus können Bildungsraten organischer Ablagerungen von mehr als 3 mg/(m<sup>2</sup>·Monat) in Wachstumsraten von bis zu 1,1 Individuen/(m<sup>2</sup>·Monat) resultieren

## 1. Einführung

Partikuläre organische Stoffe dienen als Nahrungsquelle für Invertebraten. Aus diesem Grund sind partikuläre organische Wasserinhaltsstoffe von großer Bedeutung für das Wachstum von Mikroorganismen in Verteilungssystemen (Gauthier et al., 1999). Folglich ist die Dynamik organischer Partikel der zentrale Punkt zur Erklärung und Kontrolle von Besiedlungen durch Invertebraten in Trinkwasserverteilungsnetzen. Um Massenentwicklungen von Invertebraten vermeiden zu können, sind demzufolge Kenntnisse über Eintrag, Transport, Ablagerung und Mobilisierung von Partikeln in Verteilungsnetzen erforderlich. Als Eintragspfade kommen Einträge am Wasserwerk, die Korrosion metallischer, ungeschützter Rohr- und Armaturenoberflächen, mikrobiologische Prozesse in Biofilmen, die Fällung und Flockung von Wasserinhaltsstoffen, Einträge bei Neubau-, Reparatur- und Wartungsarbeiten sowie der Stoffwechsel von Invertebraten in Frage. Eine Zusammenfassung der Prozesse des Partikeleintrags stellt Abb. 1 in Anlehnung an Vreeburg (2007) dar.

Zu den am Wasserwerksausgang kontinuierlich in geringen Mengen in das Verteilungsnetz eingetragenen partikulären Stoffen gehören insbesondere organisches Material, Flockungsmittelreste (Aluminiumhydroxid, Eisen(III)-oxidhydrat), Manganoxid (Braunstein) und Sand (Gauthier et al., 2001). Bereits geringe Konzentrationen dieser Materialien führen über einen ausreichend langen Zeitraum summarisch zu einem größeren Feststoffeintrag. Im DVGW-Arbeitsblatt W 223, Teil 1, wird deshalb darauf hingewiesen, dass „[...] Ablagerungen im Verteilungsnetz auch bei geringsten

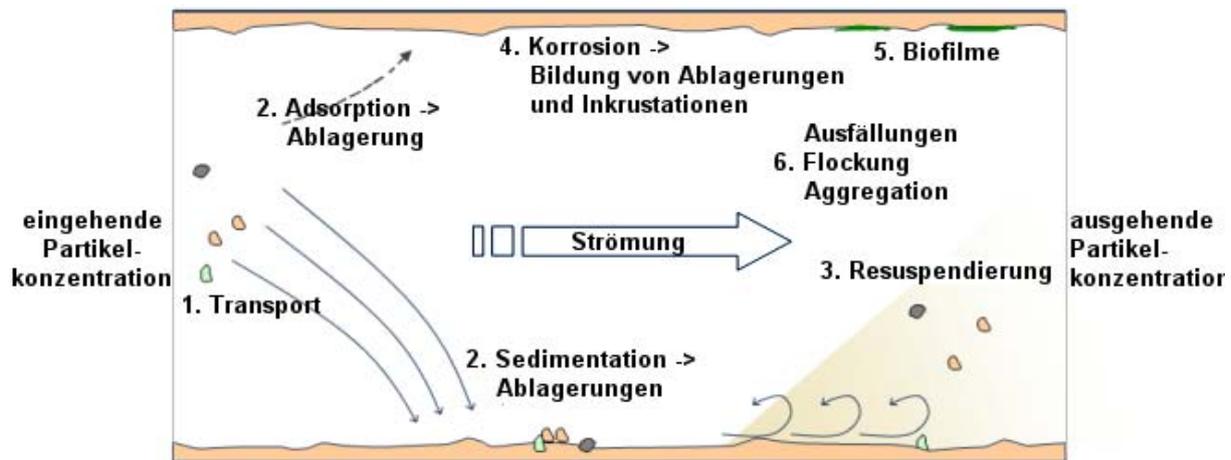


Abb. 1. Partikelbezogene Prozesse in einem Rohrabschnitt eines Trinkwasserverteilungssystems.

Konzentrationen von Eisen und Mangan entstehen können. Nach der Aufbereitung sollte für Eisen ( $\text{Fe}^0$ ) eine Konzentration  $\leq 0,02 \text{ g/m}^3$  und für Mangan ( $\text{Mn}^0$ )  $\leq 0,01 \text{ g/m}^3$  angestrebt werden, um Ablagerungen von Eisen und Mangan im Verteilungsnetz gering zu halten. [...]

Die Bewegung von Trinkwasser in Rohrleitungen, bezeichnet als Rohrströmung, ist das treibende Element für den Transport, die Ablagerung sowie die Mobilisierung von Partikeln in Trinkwasserverteilungsnetzen. Die Ausbildung von Ablagerungen wird dabei im Wesentlichen durch zwei Einflussfaktoren bestimmt (Ripl & Uhl, 2010): der maximalen an einem Tag vorherrschenden Strömungsgeschwindigkeit und der Partikelfracht. So nimmt mit Höhe der Strömungsgeschwindigkeit die Menge partikulärer Ablagerungen ab, während mit der Höhe der Partikelfracht die Ablagerungsbildung zunimmt, da sich potentiell mehr Partikel pro Zeiteinheit ablagern können. Die Menge an Ablagerungen wird dabei als Trübungsäquivalent bzw. Trübungspotential angegeben. Ein Trübungspotential von 50 FNU bedeutet dabei, dass bei vollständiger Mobilisierung von Ablagerungen mit diesem Trübungspotential die Trübung des Spülwassers um 50 FNU ansteigt. In Abhängigkeit von Strömungsgeschwindigkeit und Partikelfracht kann folgende Abschätzung der resultierenden Trübungspotentiale für Rohrleitungen vorgenommen werden,

- In Hauptversorgungsleitungen mit täglichen hohen Strömungsgeschwindigkeiten von ca. 0,1 m/s kann sich wenig Material ablagern (Trübungspotential  $< 50 \text{ FU}$ ). Partikel werden stattdessen in nachgelagerte Netzabschnitte transportiert.
- In Leitungen mit Strömungsgeschwindigkeiten kleiner ca. 0,1 m/s und ohne Stagnationszeiten, die an gut durchströmte Netzabschnitte anschließen, können sich bereits nach wenigen Monaten merkliche Trübungspotentiale von ca. 50 bis 100 FNU ausbilden.
- In Leitungen mit niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten und geringen Partikelfrachten, z. B. Netzabschnitte mit langen Transportzeiten bzw. größeren

Entfernungen zur Partikelquelle (je nach Rohrnetztopologie und Netzhydraulik 500 m, manchmal auch 1.000 m Rohrnetzdistanz), können sich größere Trübungspotentiale ausbilden ( $\gg 100$  FNU). Die Ablagerungsbildung verläuft jedoch sehr langsam (über mehrere Jahre).

Die Erfassung von Eintrag, Transport, Ablagerung und Mobilisierung kann für Verteilungsnetze aus Zeit- und Kostengründen nicht ausschließlich durch Messungen im Rahmen wiederholter Rohrnetzspülungen stattfinden. Daher ist eine modellgestützte Beschreibung dieser Prozesse gewünscht. Dafür steht ein dynamisches Wassergüte-Modell (Ripl & Uhl, 2010) zur Verfügung. Mit diesem lassen sich Daten aus Berechnungen zur Rohrnetzhydraulik, die beispielsweise mittels STANET durchgeführt werden können, importieren und für die nachfolgenden Wassergütesimulationen aufbereiten, und Partikeltransport und Ablagerungsbildung in Verteilungssystemen unter Verwendung mechanistischer Ansätze berechnen, das Trübungspotential für Rohrleitungen ermitteln und diesbezüglich Bewertungen von Rohrnetzen vornehmen, Spülintervalle bestimmen und die Ergebnisse grafisch darstellen. Durch die Kopplungsmöglichkeit mit Rohrnetzmodellen können Veränderungen im Rohrdurchmesser durch Ablagerungsbildung und deren Einfluss auf die Fließgeschwindigkeit berücksichtigt werden.

Ziel der durchgeführten Untersuchungen war folglich die Erfassung und modellgestützte Bewertung von potentiell als Nahrungsquelle für Invertebraten dienende, partikuläre organische Ablagerungen in einem Trinkwasserverteilungssystem. Darüber hinaus sollte untersucht werden, inwieweit sich ein Zusammenhang zwischen organischen Ablagerungen und dem Vorkommen bzw. der Vermehrungsrate von Invertebraten nachweisen lässt.

## **2. Material und Methoden**

### **2.1. Charakterisierung von Partikeln in Trinkwasserverteilungssystemen**

Für die Beschreibung des Transports, der Ablagerung und der Mobilisierung von Partikeln ist eine Charakterisierung der Partikel anhand ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften erforderlich. Die zur Partikelcharakterisierung messtechnisch erfassten Parameter sowie die dazugehörigen Analysemethoden sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Für die Bestimmung der Partikelnassdichte mittels Sedimentationsversuche erfolgte die Herstellung von Suspensionen, welche gut durchmischt in eine 50 cm hohe, vertikal gerichtete, zylindrische (Sedimentations-) Säule gefüllt wurden (Abb. 2). In dieser befindet sich eine Probenahmestelle 30 cm unterhalb des Wasserspiegels, von wo durch ein Partikelzählgerät Proben zur Bestimmung der Partikelkonzentration entnommen wurden. Während der Sedimentation ändert sich die Partikelkonzentration.

Tabelle 1. Parameter und Analysenmethoden zur Partikelcharakterisierung.

Parameter	Einheit	Bestimmungsmethode
Trübung	FNU	<u>Labor</u> : Statische Streulichtmessung (TURB 430 IR, Fa. WTW, Deutschland) <u>Feld</u> : Statische Streulichtmessung (Ultraturb plus sc, Fa. Hach-Lange, Deutschland)
Partikelkonzentration	1/mL	Einzelpartikelzählung durch Einzelpartikelextinktion (Abakus Mobil Fluid, Fa. Klotz, Deutschland)
Partikelgröße, Partikelgrößenverteilung	µm	1 ... 200 µm: Einzelpartikelzählung durch Einzelpartikel-extinktion (Abakus Mobil Fluid, Fa. Klotz, Deutschland) 1 ... 1000 nm: Photonenkorrelationsspektroskopie (Zetasizer Nano, Fa. Malvern, Großbritannien)
Zeta-Potential	mV	Elektrophorese (Zetasizer Nano, Fa. Malvern, Großbritannien)
Trockensubstanzgehalt (TS)	kg/m <sup>3</sup>	Filtration der Probe über Polycarbonatfilter 0,45 µm und Trocknung des Rückstandes
Nassdichte	kg/m <sup>3</sup>	Sedimentationsversuche
gesamter organischer Kohlenstoff (TOC)	kg/m <sup>3</sup>	Thermokatalytischer Hochtemperaturaufschluss (Liquitoc II, Fa. Elementar, Deutschland)
gelöster organischer Kohlenstoff (DOC)	kg/m <sup>3</sup>	Filtration der Probe über Polycarbonatfilter 0,45 µm, dann thermokatalytischer Hochtemperaturaufschluss (Liquitoc II, Fa. Elementar, Deutschland)
partikulärer organischer Kohlenstoff (POC)	kg/m <sup>3</sup>	POC = TOC – DOC
Konzentration elementaren Eisens	kg/m <sup>3</sup>	Aufschluss mit Labor-Mikrowelle und Salpetersäure, dann Atomabsorptionsspektrometrie (Z220, Fa. Varian, Vereinigte Staaten)
Konzentration elementaren Mangans	kg/m <sup>3</sup>	Aufschluss mit Labor-Mikrowelle und Salpetersäure, dann Atomabsorptionsspektrometrie (Z220, Fa. Varian, Vereinigte Staaten)

Sind alle Partikel aus dem Wasserkörper oberhalb der Probenahmestelle an dieser vorbei sedimentiert, sinkt die Partikelkonzentration auf Null und der Sedimentationsversuch endet. Aus der Sedimentationsbewegung resultiert in Abhängigkeit von den Partikel-eigenschaften und den hydraulischen Bedingungen durch die Probennahme eine charakteristische Zeitreihe für die Partikelkonzentration an der Probennahmestelle. Beeinflusst wird deren Verlauf durch die zu bestimmende Dichteverteilung der Partikel und die Partikelgröße. Letztere wird mit dem Partikelzählgerät gemessen.

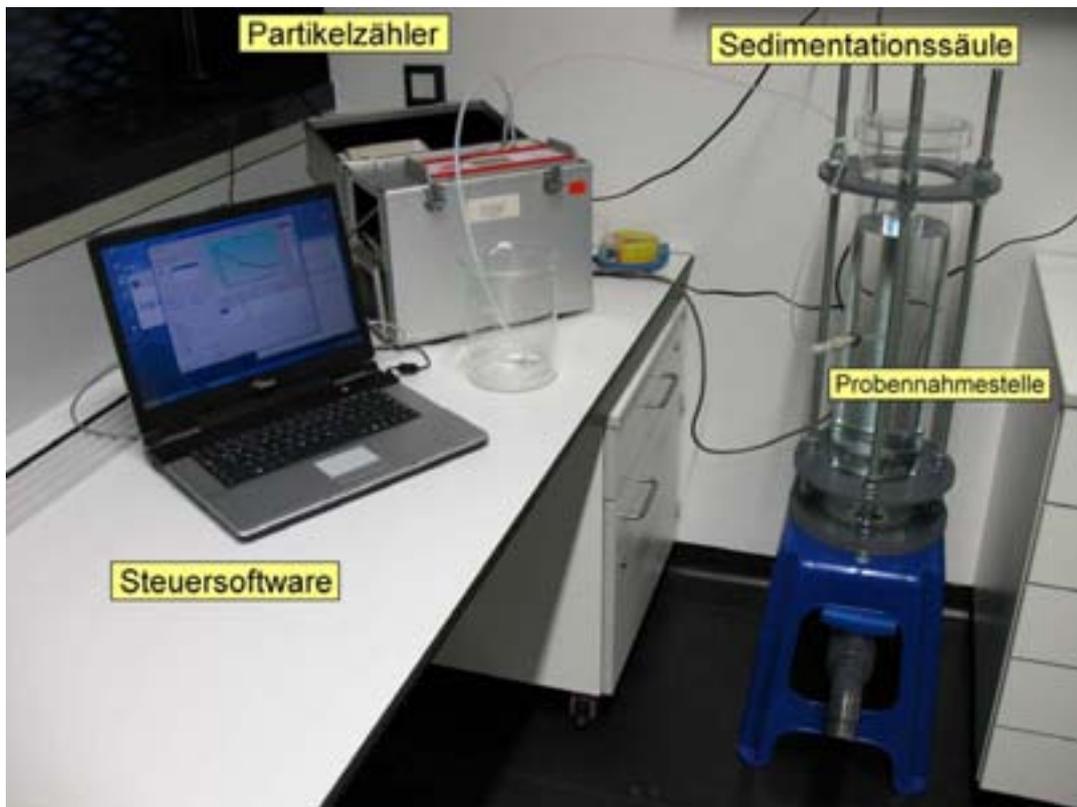


Abb. 2. Versuchsaufbau für Sedimentationsanalysen.

Bei der Partikelsedimentationsbewegung handelt es sich um einen Prozess mit laminaren Strömungsbedingungen. Die Partikel-Reynolds-Zahl berechnet sich nach Gleichung (1),

$$\text{Re}_P = \frac{v_{\text{St}} \cdot 2 \cdot R_P}{\nu_{\text{kin}}}, \quad (1)$$

$v_{\text{St}}$  die Sedimentationsgeschwindigkeit,  
 $R_P$  der Partikelradius,  
 $\nu_{\text{kin}}$  die kinematische Viskosität des Wassers.

Für Reynoldszahlen, die deutlich kleiner als 1 sind kann die Geschwindigkeit der Sedimentationsbewegung eines Partikels  $v_{\text{St}}$  mittels Stokes'scher Gleichung berechnet werden:

$$v_{\text{St}} = \frac{2 \cdot R_P^2 \cdot g \cdot (\rho_P - \rho_F)}{9 \cdot \eta_F} \quad (2)$$

$R_P$  der Partikelradius,  
 $g$  die Erdbeschleunigung ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ),

$\rho_P$  die Partikelnassdichte,  
 $\rho_F$  die Wasserdichte und  
 $\eta_F$  die dynamische Viskosität.

Da die Geschwindigkeit  $v_{St}$  im Sedimentationsversuch bestimmt wurde, ist durch Umstellung von Gleichung (2) die Bestimmung der Nassdichte  $\rho_P$  möglich.

Die Bestimmung des Vorkommens von Invertebraten (Wasserassel) erfolgte durch Filtration der Spülwässer durch ein Sieb mit einer Maschenweite von 100  $\mu\text{m}$  und einem nachfolgenden Filter mit einer Porengröße von 30  $\mu\text{m}$ . Im Labor fand anschließend eine Analyse der abfiltrierten Partikel statt. Dabei wurden mittels Lichtmikroskopie die Anzahl, das Entwicklungsstadium, die Größe und das Geschlecht der aus den Leitungen ausgespülten Invertebraten (Wasserasseln) bestimmt.

## 2.2. Bestimmung des Partikeleintrags in Trinkwasserverteilungssysteme

Für die Bestimmung des Partikeleintrags wurden der Eintrag am Wasserwerk und der durch Korrosion in metallischen Leitungen verursachte Eintrag von Partikeln berücksichtigt. Um den Eintrag am Wasserwerk erfassen zu können, wurden Messkampagnen mit einem Partikelzählgerät Abakus Mobil Fluid der Firma Markus Klotz GmbH (Deutschland) durchgeführt. Das Messprinzip der Partikelzählung beruht dabei auf Extinktionsmessungen, wobei Suspensionen in bis zu 32 frei konfigurierbaren Größenklassen im Bereich von 1 bis 200  $\mu\text{m}$  messtechnisch erfasst und bewertet werden können. Da im Hinblick auf die Nahrungsgrundlage von Invertebraten der organische Anteil der partikulären Stoffe von besonderer Bedeutung ist, erfolgte die Bestimmung des partikulären organischen Kohlenstoffanteils (POC) durch Analyse von gesamtem organischen Kohlenstoff (TOC) und gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) einzelner Proben am Wasserwerksausgang und Berechnung nach Gleichung (3),

$$\text{POC} = \text{TOC} - \text{DOC} \quad (3)$$

Zur Erfassung des Partikeleintrags durch Korrosion wurden alle ungeschützten Grauguss- und Stahlleitungen als potentieller Ort für die Bildung von Ablagerungen betrachtet. Für das in Abb. 3 blau markierte Untersuchungsgebiet sind die als korrodierend angenommenen Leitungen rot dargestellt.

Die Bestimmung der Korrosionsgeschwindigkeit der jeweiligen Leitungen bzw. die Ablagerungsbildung erfolgte mittels Spülung der einzelnen Leitungsstränge. Dabei wurde durch eine Erstreinigung der Referenzzustand hergestellt. Durch eine Wiederholungsspülung nach 6,25 Monaten, die unter ähnlichen hydraulischen Bedingungen wie die Erstspülung durchgeführt wurde, fand die Bestimmung der in diesem Zeitraum gebildeten Ablagerungen statt. Dabei konnten für die in Abb. 3 mit Strichlinie markierten Leitungsabschnitte auswertbare Ergebnisse erzielt werden.

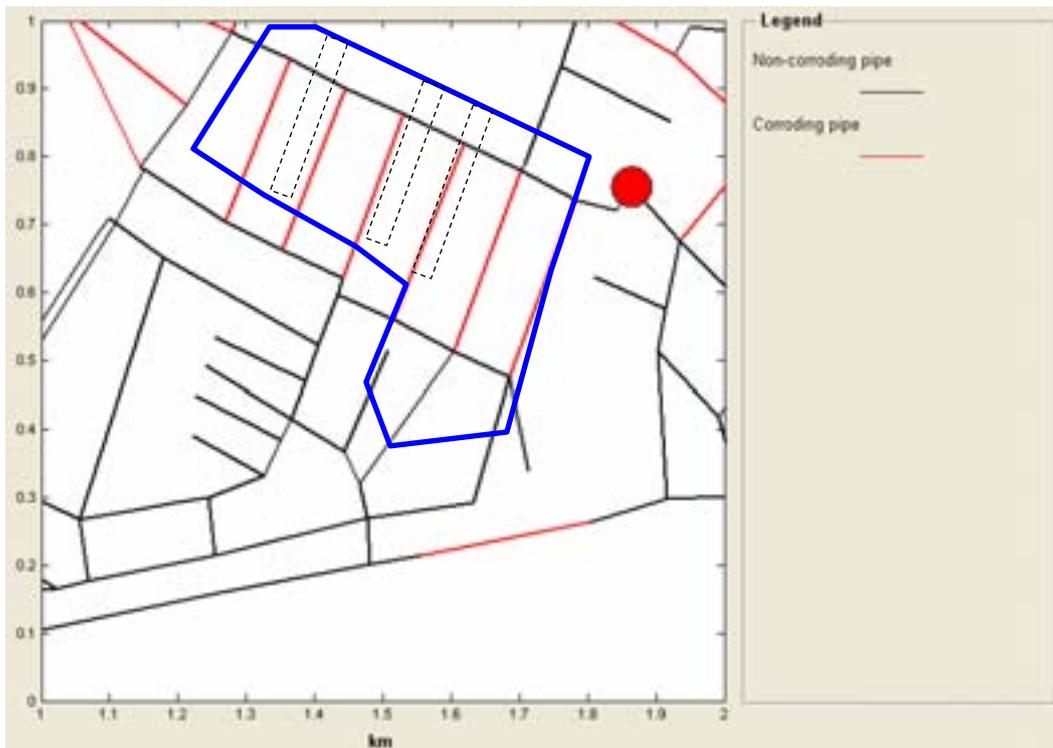


Abb. 3. Ungeschützte Stahlleitungen (rot) im Untersuchungsgebiet (blau). Die auf Korrosionsvorgänge untersuchten Leitungen sind gestrichelt markiert.

### 2.3. Bestimmung von Transport und Ablagerung von Partikeln in Trinkwasserverteilungssystemen

Um die Ausbildung von Ablagerungen, deren Menge und dazugehöriges Trübungspotential, bestimmen zu können, bedarf es systematischer Spülungen ausgewählter Rohrstränge. Bei diesen Spülungen wurden Durchfluss und Trübung kontinuierlich erfasst, um Rückschlüsse auf Menge und Ort von Ablagerungen ziehen zu können. Für die Spülung war eine ausreichende Geschwindigkeit zu garantieren, die den an einem Tag maximal erreichbaren Volumenstrom überstieg. Nur so konnte eine Mobilisierung partikulärer Ablagerungen gewährleistet werden.

Durch die Aufzeichnung der Trübung über die Zeit (Spüldauer) wurde mittels Weg-Zeit-Gesetz die von den ausgespülten Partikeln zurückgelegte Wegstrecke  $s_{FI}$  nach Gleichung (4) ermittelt und folglich auf den Ort der Ablagerung geschlossen.

$$s_{FI}(t_{FI}) = \bar{v}_{FI} \cdot t_{FI} \quad (4)$$

In Gleichung (4) sind  $t_{FI}$  die Spüldauer und  $\bar{v}_{FI}$  die mittlere Spülgeschwindigkeit, welche sich aus dem gemessenen Spülvolumenstrom  $Q_{FI}$  und dem Rohrrinnendurchmesser  $D_{Pipe}$  berechnet (Gleichung 5),

$$\bar{v}_{Fl} = \frac{4 \cdot Q_{Fl}}{\pi \cdot D_{Pipe}^2} \quad (5)$$

Um aus der am Spülhydranten gemessenen Trübung Turb die mobilisierte Ablagerungsmasse ermitteln zu können, ist die Berechnung der Feststoffkonzentration  $c_{P,T}$  der im Spülwasser enthaltenen Partikel in  $\text{kg/m}^3$  unter Verwendung des Verhältnisparameters  $X_{Turb,TS}$  (in  $\text{FNU}/(\text{kg/m}^3)$  erforderlich (Gleichung 6),

$$c_{P,T} = TS = \text{Turb} \cdot X_{Turb,TS} \quad (6)$$

Die mobilisierte Ablagerungsmasse  $m_{P,mob}$  (in  $\text{kg/m}$ ) ergibt sich dann aus der Feststoffkonzentration und der Fläche  $A$  des Strömungsquerschnitts (Gleichung 7),

$$m_{P,mob} = c_{P,T} \cdot A \quad (7)$$

Normiert auf die Rohroberfläche beträgt die Ablagerungsmenge (Gleichung 8)

$$m_{P,mob}^* = \frac{m_{P,mob}}{\pi \cdot D_{Pipe}} \quad (8)$$

## 2.4. Modellierung von Transport, Ablagerung und Mobilisierung von Partikeln in Trinkwasserverteilungssystemen

Für die Beschreibung der Transport-, Ablagerungs- und Mobilisierungsprozesse von Partikeln wurde ein durch Ripl & Uhl (2010) entwickeltes dynamisches Wassergütemodell eingesetzt. Grundlage für die Modellrechnungen sind Kenntnisse zur Struktur und den hydraulischen Bedingungen im betrachteten Trinkwassernetz. Letztere resultieren u. a. aus dem Wasserverbrauch, der Trinkwassereinspeisung, den Reibungsverlusten sowie der Topologie des Verteilungsnetzes. Aus diesem Grund verfügt das dynamische Wassergütemodell über eine Schnittstelle zu Rohrnetzmodellen (z. B. Stanet). Damit lassen sich unter Berücksichtigung der Partikeleintragspfade und bei Kenntnis von Partikelgröße und -dichte Partikelbewegungen mittels Eulerscher Diskrete-Volumen-Methode (Rossman, et al., 1993) berechnen und die Rechenergebnisse grafisch darstellen. Die Modellrechnungen erfolgten auf Basis von Tagessimulationen (Durchschnittstag) in Ein-Stunden-Schrittweite.

### 3. Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1. Eigenschaften von Partikeln

Der für die Berechnung abgelagerter Feststoffmengen aus Trübungsmessungen erforderliche Umrechnungsfaktor  $X_{\text{Turb,TS}}$  wurde auf Grundlage empirischer Gleichungen, die den Zusammenhang zwischen Trübung und Massenkonzentration beschreiben, ermittelt. Der lineare Zusammenhang von Trübung und Massenkonzentration wurde, wie in Abb. 4 dargestellt, in drei Messkampagnen bestimmt und der Umrechnungsfaktor als Mittelwert aus den drei Einzelwerten gebildet. Er betrug 1973 FNU/(kg/m<sup>3</sup>).

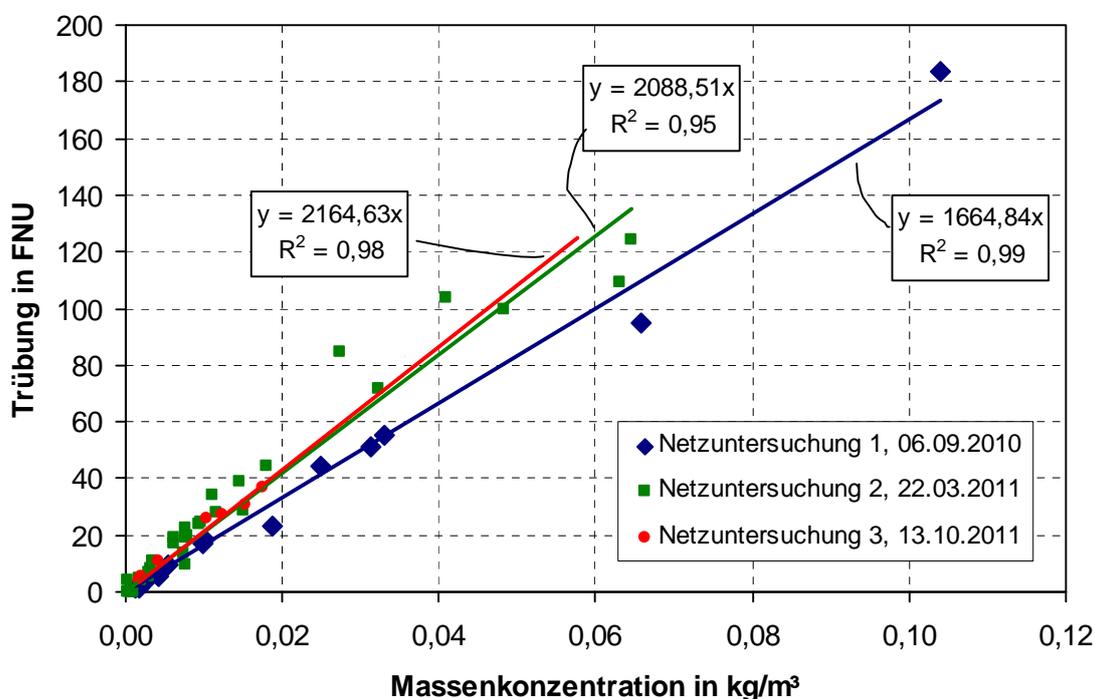


Abb. 4. Linearer Zusammenhang zwischen Trübung und Trockensubstanzgehalt der Spülproben aus verschiedenen Messkampagnen.

#### 3.2. Eintrag von Partikeln

Für das Wasserwerk wurden folgende Partikeleinträge ermittelt:

- Partikeleintrag: 0,019 mg/L (7 kg/Jahr; vor allem Eisenoxide),
- Feststoffvolumenkonzentration:  $1,73 \cdot 10^{-6} \%$ ,
- Konzentration organischen Materials: 0,004 mg/L (20 %).

Die Menge der aus dem Wasserwerk eingetragenen und in den Leitungen abgelagerten organischen Partikel nimmt in Abhängigkeit von den Strömungsbedingungen mit zunehmender Entfernung zum Wasserwerk ab. Dieser Sachverhalt ist exemplarisch

für das ausgewählte Untersuchungsgebiet in Abb. 5 dargestellt. Der größte Teil partikulären organischen Materials wurde über die Hauptleitung in Straße 1 eingetragen und zum größten Teil jeweils im oberen Abschnitt der abzweigenden Leitungsstränge abgelagert. Aus diesem Zusammenhang kann geschlussfolgert werden, dass der Eintrag organischer Partikel hauptsächlich über das Wasserwerk erfolgt und dass die Ablagerung durch Transport- und Sedimentationsprozesse bedingt ist.

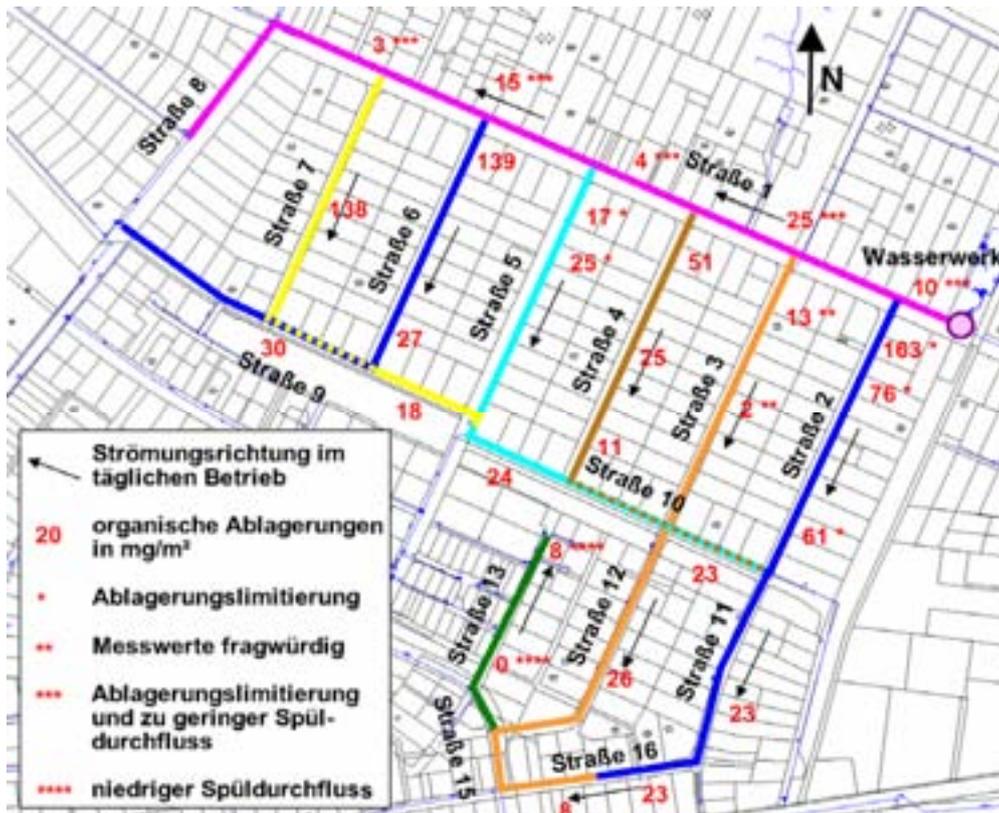


Abb. 5. Menge partikulärer organischer Ablagerungen im Untersuchungsgebiet in mg/m<sup>2</sup> nach 6,3 Monaten Betrieb (September 2010 bis März 2011).

Anhand der Darstellung und Betrachtung des Anteils organischen Materials an der Gesamtheit der sich ausbildenden Ablagerungen (Abb. 6) lässt sich nachweisen, dass anorganische Partikel aufgrund ihrer höheren Dichte schneller sedimentieren als organische partikuläre Stoffe. Folglich nimmt in einigen Leitungen der Anteil organischen Materials an den Ablagerungen mit zunehmender Entfernung zum Wasserwerk zu. Aufgrund dieser Ergebnisse können Korrosionsprozesse, die zu einer Neubildung anorganischer Partikel führen, in diesen Leitungssträngen ausgeschlossen werden. Diese Schlussfolgerungen können getroffen werden, da die Trinkwasseraufbereitung für das untersuchte Versorgungssystem ohne Zugabe von Flockungsmitteln erfolgt und daher ein nennenswerter Einfluss von Flockungsprozessen auf das Transport- und Ablagerungsverhalten der Partikel ausgeschlossen werden kann. Ein möglicher

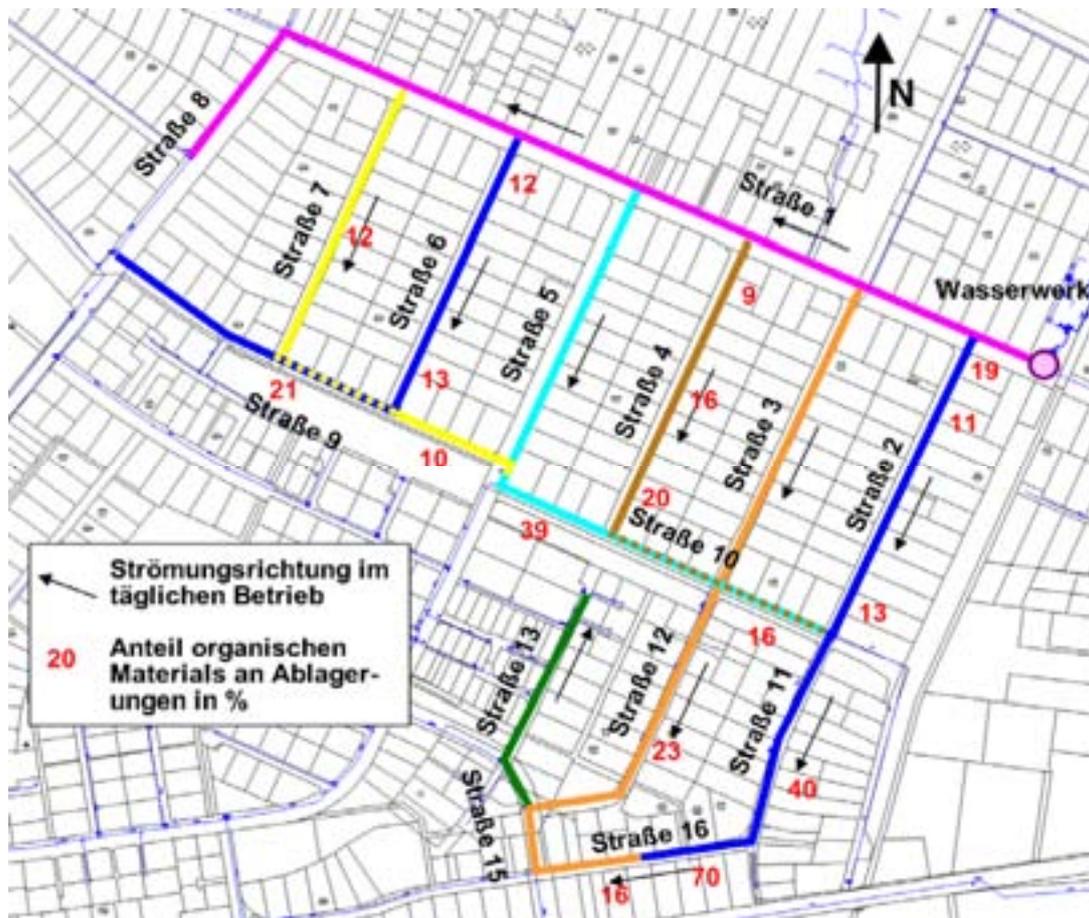


Abb. 6. Anteil organischen Materials an der Gesamtheit der Ablagerungen.

Einfluss von Veränderungen in der Roh- und Trinkwasserqualität konnte in den hier durchgeführten Untersuchungen jedoch nicht erfasst werden.

In Leitungen, für die der Zusammenhang zwischen dem Anteil des organischen Materials an den Ablagerungen mit der Entfernung zum Wasserwerk nicht eindeutig war, ist von Korrosionsprozessen auszugehen. Die im Untersuchungszeitraum von September 2010 bis März 2011 bestimmte Ablagerungsneubildung durch Korrosion betrug im Mittel  $0,35 \text{ mg Eisenoxid}/(\text{m}^2 \cdot \text{Tag})$  in den ungeschützten Stahlleitungen. Die größten Mengen an Ablagerungen aus Korrosion wurden dabei aus den wasserwerksnah gelegenen Stahlleitungen ausgespült.

### 3.3. Beschreibung von Transport und Ablagerung von Partikeln

Die den Transport, die Ablagerung und die Mobilisierung von Partikeln bestimmenden hydraulischen Bedingungen des untersuchten Verteilungnetzes sind in Abb. 7 (mittlere tägliche Strömungsgeschwindigkeiten) und Abb. 8 (Anteil laminarer Strö-

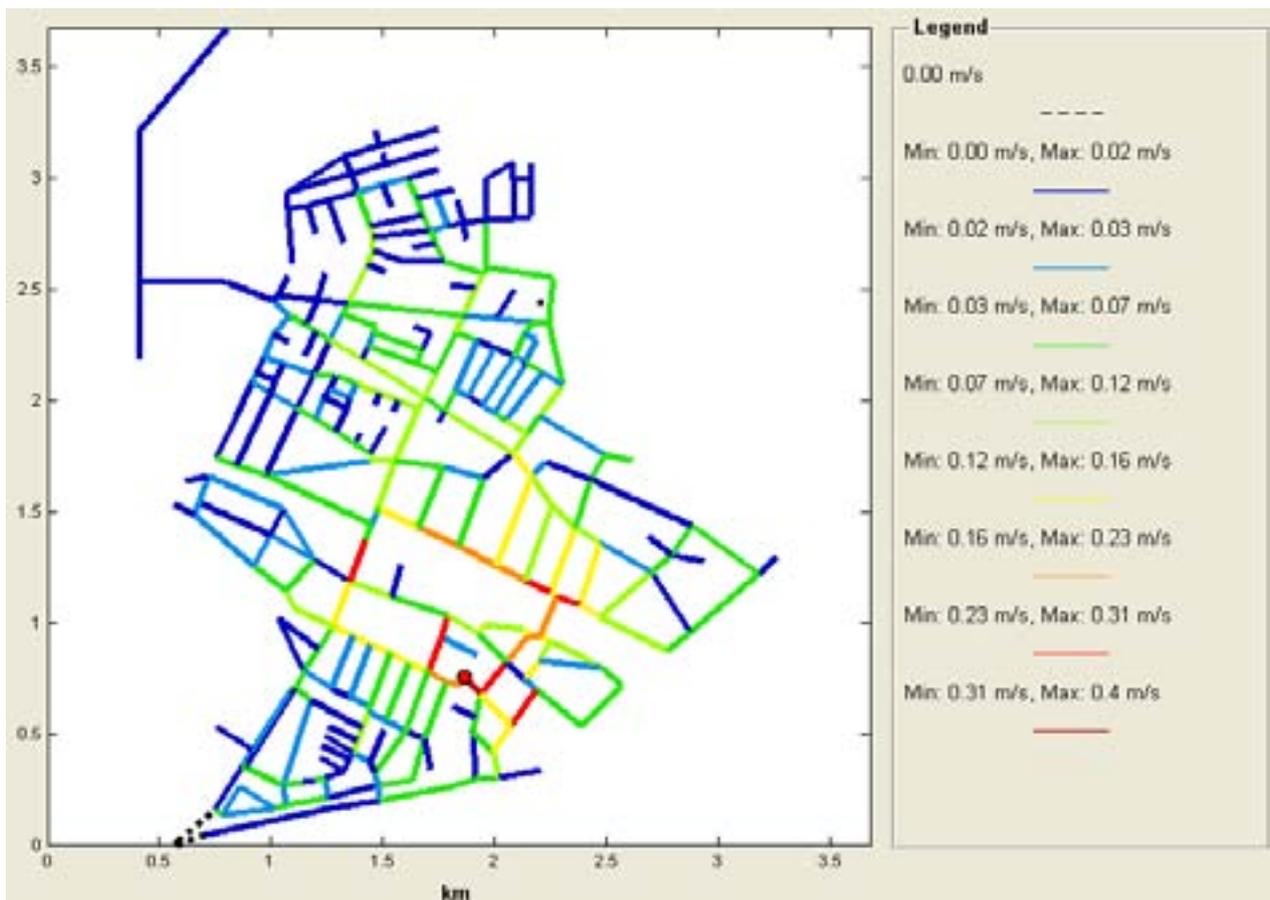


Abb. 7. Mittlere tägliche Strömungsgeschwindigkeiten im Verteilungsnetz.

mungsbedingungen) dargestellt. Wie in Abb. 7 erkennbar, beträgt die Höchstgeschwindigkeit 0,4 m/s. Sie wird in den rot markierten Leitungen, die alle in unmittelbarer Nähe zum Wasserwerk (roter Punkt) liegen, erreicht. Mit zunehmender Entfernung zum Wasserwerk nimmt die mittlere tägliche Strömungsgeschwindigkeit ab und erreicht in den Randbereichen des Verteilungsnetzes nur noch Werte von weniger als 0,02 m/s. Die an einem Durchschnittstag maximal erreichten Geschwindigkeiten (Daten nicht gezeigt) traten zur Stunde des maximalen täglichen Verbrauchs um 8 Uhr morgens auf und betragen das 1,7-fache der mittleren täglichen Geschwindigkeit.

Bei Betrachtung der Strömungsbedingungen zeigte sich, dass in einigen der Rohrstränge mit den höchsten mittleren Strömungsgeschwindigkeiten keine laminaren Strömungsbedingungen zu verzeichnen waren (gepunktete Linien in Abb. 8). In allen anderen Leitungen herrschten zumindest teilweise laminare Bedingungen, in den rot markierten Leitungen sogar zu 100 %; in letzteren Bereichen konnte es daher zu Stagnationszeiten kommen.

Die aus den hydraulischen Bedingungen und den eingetragenen Frachten resultierenden Transportkonzentrationen der Partikel sind für das untersuchte Verteilungsnetz für einen exemplarischen Zeitpunkt in Abb. 9 dargestellt.

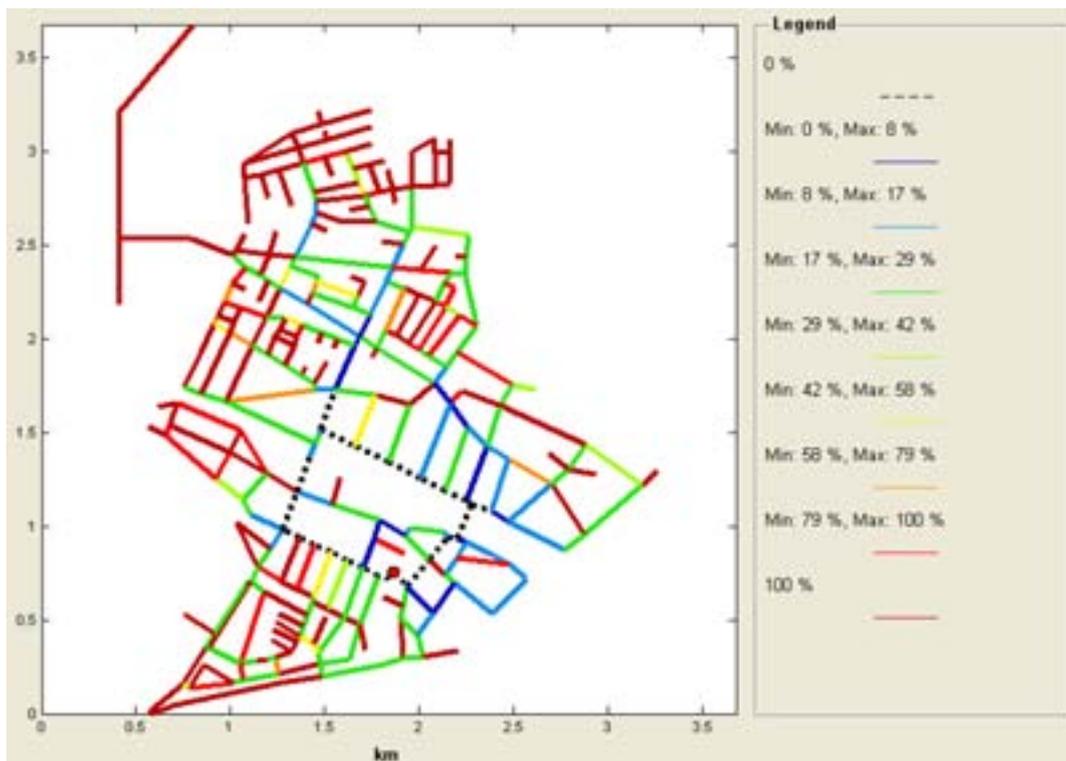


Abb. 8. Zeitlicher Anteil laminarer Strömungsbedingungen im Verteilungsnetz an den täglichen hydraulischen Bedingungen (0 % = ganztägig turbulente Bedingungen = gepunktete Leitungen).

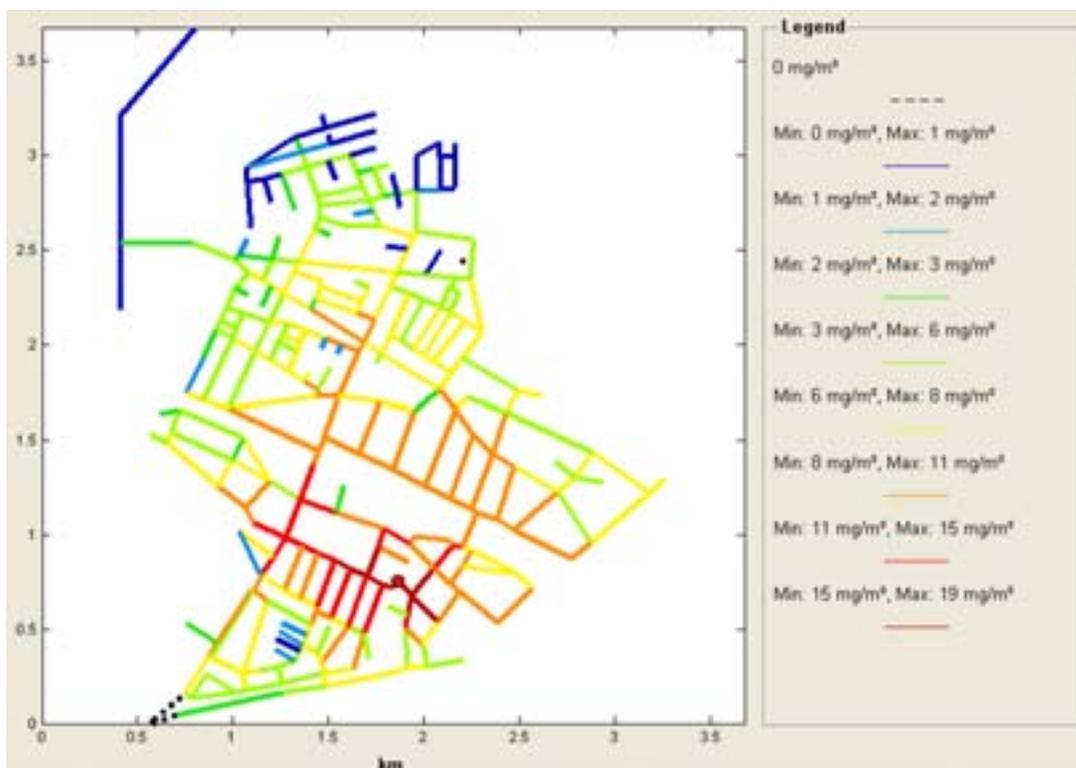


Abb. 9. Transportkonzentration von Partikeln aus dem Wasserwerk im Verteilungsnetz um Mitternacht. Roter Punkt: Wasserwerk.

Daran konnte gezeigt werden, dass nur maximal 30 % der am Wasserwerk (roter Punkt) eingetragenen Partikel die Randbereiche des Verteilungsnetzes erreichen. In den nördlichen Endsträngen sind es sogar nur noch 5 %. Das bedeutet, dass sich mehr als 70 % der an einem Tag eingetragenen Partikel im Zentrum des Verteilungsnetzes ablagern. Folglich nimmt die Geschwindigkeit der Ablagerungsbildung von am Wasserwerk eingetragenen Partikeln mit der Entfernung zur Eintragsquelle ab. Dieser Sachverhalt geht auch aus der in Abb. 10 dargestellten Ablagerungsbildung für das Versorgungsgebiet hervor. Trotz hoher Strömungsgeschwindigkeiten bilden sich die größten Ablagerungen in unmittelbarer Nähe zum Wasserwerk aus. Diese Ablagerungen entsprachen Trübungspotentialen von bis zu 100 FNU, die sich innerhalb von 6 Monaten ausgebildet hatten. Mit abnehmender Geschwindigkeit erfolgte eine recht schnelle Ablagerung der eingetragenen Partikel, so dass sich nur noch geringe Mengen von weniger als  $0,4 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{Tag})$  in einem Großteil des weiter vom Wasserwerk entfernten Teils des Verteilungssystems abgelagert haben.

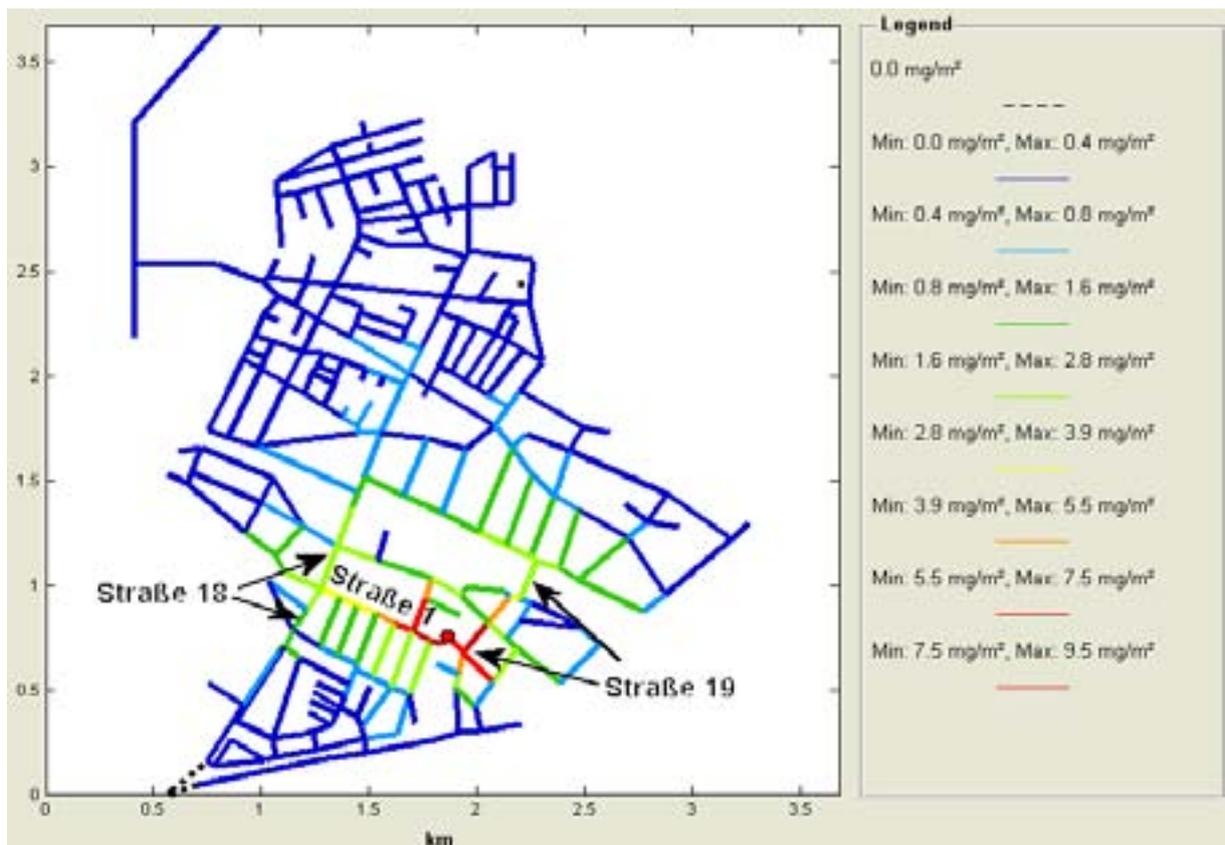


Abb. 10. Ablagerungsbildung durch am Wasserwerk eingetragene Partikel innerhalb eines Tages. Roter Punkt: Wasserwerk.

### 3.4. Einfluss von Ablagerungen auf die Populationsdichte von Invertebraten

Nach dem Betrieb von September 2010 bis März 2011 wurde im März 2011 die Ablagerungs- und Besiedlungssituation untersucht. In Abb. 11 sind das Vorkommen von Invertebraten (Wasserasseln) in Verteilungsnetzen und die darin enthaltenen organischen Ablagerungen dar- bzw. gegenübergestellt.

Dabei ist zu erkennen, dass Wasserasseln über einen sehr großen Bereich von Ablagerungsmenge in großer Anzahl auftraten. Dass mit der Ausbildung organischer Ablagerungen stets eine Besiedlung von Invertebraten einhergeht oder eine minimal erforderliche Ablagerungsmenge existiert, konnte jedoch nicht gezeigt werden. Vermutlich spielen neben der Nahrungsverfügbarkeit auch die hydraulischen Bedingungen eine Rolle bei der Besiedlung.

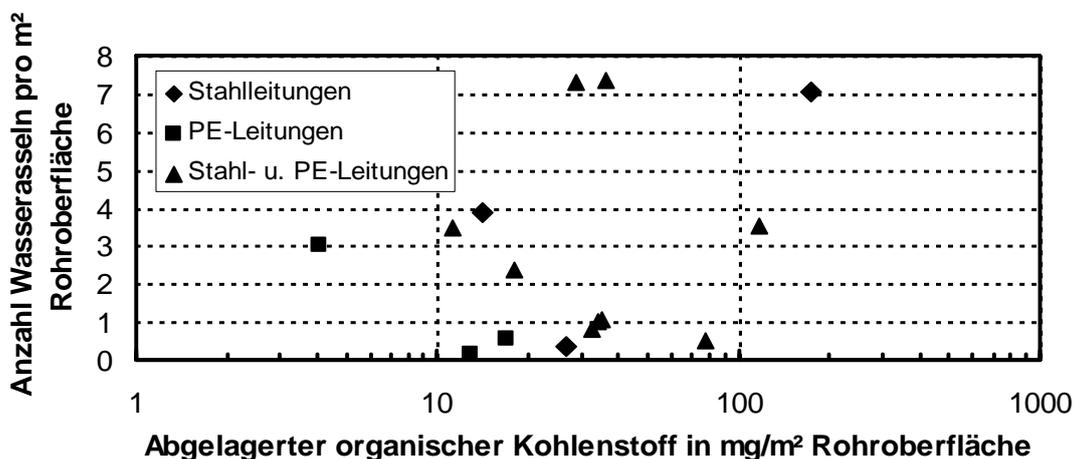


Abb. 11. Anzahl an Wasserasseln pro m<sup>2</sup> Rohroberfläche in Abhängigkeit von Ablagerungen partikulärer organischer Stoffe in mg pro m<sup>2</sup> Rohroberfläche.

## 4. Zusammenfassung

Um die Bildung von Ablagerungen partikulären organischen Materials und eine daraus resultierende Besiedlung von Trinkwasserverteilungssystemen durch Invertebraten bestimmen und bewerten zu können, wurden exemplarisch für ein Verteilungsnetz

- der Eintrag von Partikeln am Wasserwerk und durch Korrosion in ungeschützten Stahl- und Graugussleitungen erfasst,
- die in das Verteilungssystem eingetragenen Partikel charakterisiert,
- der Transport der Partikel und die Bildungsrate von Ablagerungen anhand systematischer Rohrnetzspülungen in einem repräsentativen Teilbereich bestimmt, und

- der Transport und die Ablagerungsrate der Partikel unter Verwendung eines dynamischen Wassergütemodells für das gesamte Verteilungsnetz berechnet.

Aus den Messungen und Probenahmen während der Spülungen konnten Menge und Art der Ablagerungen sowie die Position der Ablagerungen im Verteilungsnetz bestimmt werden. Anhand wiederholter Spülungen in Zeitabständen von mehreren Monaten erfolgte die Ermittlung der Geschwindigkeit der Ablagerungsbildung in den Leitungen des untersuchten Teilbereichs des Verteilungsnetzes.

Dabei zeigte sich, dass die im untersuchten Verteilungsnetz vorhandenen partikulären Ablagerungen hauptsächlich aus Eisenoxiden und organischen Stoffen bestanden. Die Ablagerungsmenge nahm mit der Entfernung vom Wasserwerk deutlich ab. Daraus konnte geschlussfolgert werden, dass dem Eintrag von Partikeln aus dem Wasserwerk eine große Bedeutung bei der Ablagerungsbildung zukommt.

Die aus der Korrosion von ungeschützten Stahl- und Graugussleitungen resultierende Bildungsrate partikulärer Ablagerungen war mit einem Wert von  $0,35 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{Tag})$  für den Untersuchungszeitraum von September 2010 bis März 2011 sehr niedrig. Die vom Wasserwerk eingetragenen Partikelfrachten waren dagegen mit Konzentrationen von  $0,019 \text{ mg}/\text{L}$  sehr hoch. Der Anteil organischen Materials an der Gesamtmenge eingetragener Partikel betrug ca. 20 %. Daraus resultierten partikuläre organische Ablagerungen in einzelnen Rohrsträngen von bis zu  $163 \text{ mg}/\text{m}^2$  in einem Zeitraum von reichlichen 6 Monaten, da sich die Ablagerungen nicht gleichmäßig im Rohrnetz verteilt hatten.

Diese Ablagerungsmengen waren ausreichend für die Ausbildung stabiler Populationen von Invertebraten, den Wasserasseln. Neben dem Zusammenhang zwischen partikulären organischen Ablagerungen und dem Vorkommen von Wasserasseln wurde auch der Einfluss auf die Wachstumsrate untersucht. Dabei zeigte sich, dass nicht nur das Vorhandensein von partikulären organischen Ablagerungen in Verteilungsnetzen zu einer Besiedlung von Invertebraten (speziell von Wasserasseln) führen kann. Darüber hinaus können Bildungsraten organischer Ablagerungen von mehr als  $3 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{Monat})$  in Wachstumsraten von bis zu  $1,1 \text{ Individuen}/(\text{m}^2 \cdot \text{Monat})$  resultieren.

Mit einem dynamischen Wassergütemodell, welches den partikelkräftebasierten Transport der partikulären Feststoffe mit der Rohrströmung und deren Ablagerung beschreibt, wurde die Ablagerungsbildung für das gesamte betrachtete Ortsnetz berechnet. Als Basis für diese Berechnungen dienten die Ergebnisse der für das Teilgebiet durchgeführten Messkampagnen während der Netzspülungen. Die Berechnungen ergaben, dass die Geschwindigkeit der Ablagerungsbildung um das Wasserwerk herum bis zu  $10 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{Tag})$  betrug. Das partikelhaltige Wasser wurde anschließend durch die Hauptleitungen im Rohrnetz verteilt. In angrenzenden schwach durchströmten Leitungen kam es zur Ablagerung von einem Großteil der Partikel. Dabei bildeten sich Ablagerungsmengen mit Trübungspotentialen von bis zu 100 FNU.

In Rohrleitungen mit dichter Besiedlung von Wasserasseln konnten auch größere Mengen abgelagerten organischen Materials ermittelt werden. Die bisherigen Ergebnisse lassen jedoch noch keinen Rückschluss von der Ablagerungsmenge oder der Geschwindigkeit der Ablagerungsbildung auf die Besiedlung mit Wasserasseln zu.

### **Referenzen**

- DVGW W 223-1 (2005) Enteisenung und Entmanganung; Teil 1: Grundsätze und Verfahren. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, Bonn.
- Gauthier, V., Barbeau, B., Tremblay, G., Millette, R. & Bernier, A.-K. (2001) Evaluating turbidity transit throughout a distribution system. Am. Water Works Association, Proceedings of Water Quality Technology Conference 11.-15. Nov. 2001, Nashville, Tn, USA.
- Gauthier, V., Gérard, B., Portal, J.-M., Block, J.-C. & Gatel, D. (1999) Organic matter as loose deposits in a drinking water distribution system. *Water Research* 33(4), 1014-1026.
- Ripl, K. & Uhl, W. (2010) Minimierung sedimentbürtiger Gütebeeinträchtigungen durch modellgestützten Rohrnetzbetrieb. Entwicklung eines Transportmodells für amorphe Verbindungen. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 02WT0619 des Bundesministeriums für Bildung und Forschung.
- Rossmann, L. A., Boulos, P. F. & Altman, T. (1993) Discrete volume-element method for network water-quality models. *J. J. Water Res. Pl.-ASCE*. 119(5), 505-517.
- Stanet. [www.stafu.de](http://www.stafu.de). Geprüft 20.03.2013.
- Vreeburg, J. H. G. (2007) Discolouration in drinking water systems: a particular approach. Dissertation, TU Delft.

### **Danksagung**

Wir danken Frau Dr.-Ing. Irene Slavik, Mitarbeiterin an der Professur Wasserversorgung der Technischen Universität Dresden, für die kritische Diskussion und Mitarbeit am Manuskript. Frau Jana Brückner danken wir für die Analyse des umfangreichen Probenmaterials. Der AiF möchten wir für die Förderung des Forschungsvorhabens danken, welches vier engagierten Unternehmen und Forschungseinrichtungen eine spannende und produktive Zusammenarbeit ermöglicht hat.

### **Kontaktadresse**

Klaus Ripl, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Uhl  
Technische Universität Dresden, Institut für Siedlungs- und Industrieresourcemanagement,  
Professur Wasserversorgung, 01062 Dresden  
Tel.: 0351 463 33126, e-mail: [klaus.ripl@web.de](mailto:klaus.ripl@web.de), [wolfgang.uhl@tu-dresden.de](mailto:wolfgang.uhl@tu-dresden.de)

## Repräsentative Beprobung von Trinkwasserverteilungssystemen

Ute Michels<sup>1</sup>, Jessica Polak<sup>1</sup>, Michael Scheideler<sup>2</sup> & Günter Gunkel<sup>3</sup>

<sup>1</sup>AquaLytis, <sup>2</sup>Scheideler Dienstleistungen, <sup>3</sup>Technische Universität Berlin

**Abstract:** Small invertebrate became more important for water distribution mains since few years, but until now there are low standard methods for sampling and analyzing these animals in drinking water distribution systems. Within an interdisciplinary research project of the Berlin University of Technology, the Technical University of Dresden and the companies AquaLytis and Scheideler Verfahrenstechnik a sampling and analyzing system has been developed, which enable a gentle and quantitative separation of water louses, their feces and of other invertebrates using flushing of a water hydrant. The presented method consists of flushing a main section and filtering the flushed water through two separate Filters (100 µm, 25 µm) after dividing the flow (1:9). Removal efficiency for different taxa or animal groups were evaluated by collecting invertebrates removed from mains after flushing the main sections with the new sampling system and after flushing the main sections with carbonated water. The results show a bright variability. Comparable results depend on the kind of sampling technology primarily, flow rates and the material of main have no influence of the removal efficiency (range of flow-rate between 0,5 to 1,5 m/s). Furthermore quality and quantity of deposits are important too to access the abundance of water louse in drinking water distribution systems.

**Keywords:** Trinkwasserverteilungssystem, Invertebraten, Wasserqualität, Biologische Trinkwasserqualität, Wasserassel, *Asellus aquaticus*

### 1. Einleitung

In den letzten Jahren gewann der biologische Aspekt in der Trinkwasserversorgung insbesondere in der Trinkwasserverteilung vermehrte Aufmerksamkeit infolge des Auftretens von Makroinvertebraten (mit dem bloßen Auge sichtbare wirbellose Tiere wie Wasserasseln, Brunnenkrebse und Gliederwürmer) bei einigen Endverbrauchern und den damit im Zusammenhang stehenden Verbraucherbeschwerden. Umfangreiche Untersuchungen zum Vorkommen und zur Verbreitung wirbelloser Tiere in der Trinkwasserverteilung wurden in den Niederlanden (van Lieverloo et al., 2004, 2012) und Dänemark

(Christensen et al., 2011) durchgeführt; wesentliche Erkenntnisse für die Praxis der Wasserversorgung in der BRD sind im Regelwerk des DVGW in Form des DVGW-Hinweises W 271 zusammengefasst (DVGW, 1997).

Zur qualitativen und quantitativen Untersuchung von tierischen Organismen in Wasserversorgungsanlagen existieren bislang kaum verbindliche standardisierte Verfahren. Im europäischen Kontext gibt es allein in den Niederlanden eine für die wasserwirtschaftliche Praxis verbindlich festgelegte Methode (van Lieverloo et al., 2004). Die mit unterschiedlichen Methoden erhobenen Daten sind somit nicht oder nur eingeschränkt miteinander vergleichbar. Eine Harmonisierung vorhandener Daten respektive der zur Erhebung angewandten Methodik wäre nicht nur für eine Gesamtschau der Problematik 'Invertebraten in der Trinkwasserverteilung' wünschenswert sondern auch Grundlage für eine Einordnung und Bewertung der Befunde und die ggf. erforderliche Ableitung von Maßnahmen.

Im Fokus des Forschungsprojektes standen somit die methodischen Aspekte der Invertebratenproblematik, die Erarbeitung von technischen und verfahrenstechnischen Grundlagen für eine repräsentative und vergleichbare Datenerhebung.

Im Falle der in der Trinkwasserverteilung vorkommenden und überlebensfähigen Tiere handelt es sich um Arten der unter Meiofauna und/oder Benthos zusammengefassten ökologischen Gruppen. Von Einzellern über kleine Metazoa bis zu makroskopisch sichtbare Invertebraten wurden in Trinkwasserverteilungssystemen registriert, entsprechend vielfältig ist auch deren Größenspektrum (Gunkel et al., 2010; van Lieverloo et al., 2004, 2012; Christensen et al., 2011). Diese Tiere sind an ihren natürlichen Lebensraum durch verschiedene Strategien und insbesondere durch ihr thigmotaktisches Verhalten angepasst. Die hier vorkommenden Arten schützen sich mit Hilfe verschiedener Ausbildungen und/oder speziellen Verhaltensweisen vorm Verdriften. Im Ersatzlebensraum Rohrleitung besiedeln die überlebensfähigen wirbellosen Tiere die Rohrwandungen und/oder leben in den sich dort regelmäßig bildenden Ablagerungen.

Aus den Kenntnissen zum natürlichen und „technischen“ Lebensraum sowie den morphologischen sowie physiologischen Eigenschaften der vorkommenden Tierarten ergeben sich folgende Anforderungen an die Technik sowie das Verfahren zur Probeentnahme:

1. Die im natürlichen Lebensraum am Gewässergrund lebenden Tiere besiedeln die Wände des Rohrleitungssystems und halten sich dort fest, → während der Probeentnahme muss der Festhaltereflex überwunden werden;
2. Das Größenspektrum der bisher festgestellten Organismen reicht von 20 µm bis zu 15 mm, → mit der verwendeten Filtertechnik muss eine quantitative Erfassung der vorkommenden Taxa möglich sein;

3. Wirbellose Tiere sind zumeist empfindlich z. B. gegenüber mechanischer Beschädigung, → das Verfahren der Probeentnahme darf nicht zur Beschädigung / Zerstörung der Tiere führen;
4. Das Trinkwasser ist im Vergleich zu „normalen Oberflächengewässern“ ein nährstoffarmer Lebensraum, was zur Ausbildung geringerer Individuendichten führt, → für ein reproduzierbares Ergebnis sind größere Wassermengen zu filtrieren.

Die Entnahme von Proben für eine Analyse von Invertebraten erfolgt meist über Hydranten, indem über die Erzeugung einer Fließgeschwindigkeit mit entsprechender hydraulischer Wirkung die Tiere von den Wänden abgelöst, ins Freiwasser transportiert, über geeignete Netze zurückgehalten und somit einer Untersuchung zugänglich gemacht werden. Mit der einfachsten Möglichkeit, handelsübliche Planktonnetze direkt an geeignete Zapfstellen anzubringen und das Wasser entsprechend zu filtrieren, sind jedoch keine quantifizierbaren Aussagen möglich, da die Tiere beim Auftreffen auf die Gaze zerschlagen werden können. In vielen Fällen wird daher mit Filtrierapparaturen gearbeitet, bei welchen die Druckentlastung erst nach dem Filtrationsschritt erfolgt (DVGW, 1997) oder dieser sogar drucklos durchgeführt wird (Scheideler et al., 2013). Die Maschenweiten der verwendeten Filter variieren von 10 bis 500 µm, wobei in jedem Falle ein Kompromiss zwischen der Möglichkeit, große Volumenströme/Wassermengen filtrieren zu können und der möglichst vollständigen Erfassung aller vorhandenen Organismen gefunden werden muss. Im Falle der von Christensen et al. (2011) dokumentierten Untersuchungen erfolgte der Filtrationsschritt im Labor bei entsprechend geringen Filtrationsgeschwindigkeiten (2 - 10 L/min) unter Einkaufnahme des damit verbundenen enormen Zeitaufwandes.

## **2. Material and Methoden**

### **2.1. Arbeitshypothese und Versuchsplanung**

Während die oben unter Punkt 2 - 4 benannten Anforderungen an eine repräsentative Beprobung mit der Entwicklung des technischen Equipments berücksichtigt werden müssen (s. Scheideler et al., 2013), geht es im Folgenden um die Erarbeitung eines standardisierbaren Verfahrens zur Gewährleistung repräsentativer Ergebnisse.

Im Rahmen von Praxistests in Trinkwasserverteilungssystemen wurde untersucht, welche konkreten Randbedingungen während der Probeentnahme eingehalten bzw. eingestellt werden müssen, um

1. einen möglichst vollständigen/weitgehenden Austrag von Tieren aus dem Rohrleitungssystem zu erreichen und um
2. vergleichbare Ergebnisse zu erzielen.

Da die zu analysierenden Organismen vor allem am Boden und an den Wänden des Rohrleitungssystems leben und sich dort direkt oder indirekt festhalten, müssen diese über die Erzeugung einer entsprechenden Fließgeschwindigkeit zunächst von den Wandungen abgelöst werden, um mit dem Wasserstrom ausgetragen zu werden. In vorangegangenen Untersuchungen wurde immer wieder deutlich, dass insbesondere der Austrag von Wasserasseln erst bei bei Fließ- bzw. Spülgeschwindigkeiten um 1 m/s erfolgt (Christensen et al., 2011; van Lieferloo et al., 2004; DVGW, 1997). Dies führte zur Arbeitshypothese, dass ein quantitativ reproduzierbarer Austrag vor allem von der in der zu beprobenden Rohrleitungsstrecke erzeugten Strömungsgeschwindigkeit abhängt. Darüber hinaus wird das Material der Rohrleitung als zweiter wesentlicher, den quantitativen Austrag beeinflussender Parameter benannt (Christensen et al., 2011). Das Versuchsprogramm beinhaltete somit die Untersuchung verschiedener Leitungsmaterialien und die Beprobung verschiedener Teststrecken bei unterschiedlich hohen Strömungsgeschwindigkeiten. Die nachfolgende Übersicht fasst die Planung der Versuche zusammen (Tabelle 1).

Tabelle 1. Vorplanung der Teststrecken; PE =Polyäthylen, AZ = Asbestzement, St = Stahl, GG = Grauguss, GGG = duktiler Grauguss.

Variante	Material	Fließgeschwindigkeit während der Probeentnahme [m s <sup>-1</sup> ]	Anzahl geeigneter Teststrecken
1.1	PE	0,6	2
1.2	PE	1	1
1.3	PE	1,6	-
2.1	AZ	0,6	2
2.2	AZ	1	2
2.3	AZ	1,5	1
3.1	St	0,6	2
3.2	St	1	2
3.3	St	1,5	1
4.1	GG / GGG	0,6	1
4.2	GG / GGG	1	-
4.3	GG / GGG	1,5	-

## 2.2. Durchführung der Tests in Trinkwasserverteilungssystemen

Unter Berücksichtigung der Versuchsplanung wurden aus dem jeweiligen Betriebsführungsgebiet der Wasserversorger geeignete Teststrecken ausgewählt und im November/Dezember 2012 beprobt. Neben dem Vorhandensein der zu

testenden Rohrmaterialien mussten an der entsprechenden Strecke folgende Voraussetzungen gegeben sein,

- die Rohrleitungsstrecke ist durch Schieberstellungen separat zu beproben (um im gesamten Rohrabschnitt eine gleichbleibende Fließgeschwindigkeit zu gewährleisten, dürfen keine Abzweigungen vorhanden sein),
- die Rohrleitungsstrecke enthält möglichst gleiche Rohrdurchmesser und Materialien,
- das Vorhandensein von zwei Eintritts- und einem Austrittshydranten,
- die Fließgeschwindigkeiten entsprechend Versuchsplanung müssen erreichbar sein.

Unter diesen Prämissen war es nicht möglich, alle Testvarianten durchzuführen; die Auswertungen wurden somit auf die Materialien Stahl, Asbestzement und Polyäthylen begrenzt, im Falle von Grauguss als Rohrleitungsmaterial konnte nur eine Teststrecke untersucht werden.

Der Versuchsablauf wurde generell in zwei Phasen unterteilt (Abb. 1):

*Phase 1:* Spülung der Teststrecke und Entnahme der Proben mittels Filtrierapparatur (NDHD-S2, Scheideler et al., 2013) mit folgenden technischen Spezifikationen: Entnommenes Wasservolumen: 1m<sup>3</sup>,  
Aufteilung des Volumenstromes: 1:9,  
Maschenweiten der Filter: 25 µm (1/10-Teilstrom) und 100 µm (9/10 Teilstrom),  
Spülgeschwindigkeit: entsprechend Versuchsplanung.

*Phase 2:* Nachspülen der Teststrecke mit kohlendioxidhaltigem Wasser, um die in der Teststrecke noch verbliebenen wirbellosen Tiere auszutragen und Filtration des Spülwassers über die Filtrierapparatur (NDHD-S2). Um einen möglichst vollständigen Austrag zu gewährleisten, wurden Spülung und anschließende Probeentnahme mehrmals wiederholt. Um einen Eintrag wirbelloser Tiere aus vorgelagerten Rohrleitungen zu verhindern, wurde im Falle der CO<sub>2</sub>-Spülungen ein Vorfilter mit der Maschenweite von 100 µm verwendet.

### **2.3. Analyse und Datenaufbereitung**

Die Aufarbeitung der entnommenen Proben erfolgte entsprechend den in der limnologischen Praxis gängigen Methoden zur Analyse von Zooplankton bzw. der Meiofauna. Die in den Proben vorhandenen wirbellosen Tiere wurden unter optischer Vergrößerung determiniert, vermessen und gezählt; die Zähl- und Messergebnisse und die daraus berechneten Biomassen wurden auf das jeweilige Rohrvolumen der Teststrecke bezogen und als Anzahl in Ind./m<sup>3</sup> bzw. als Biomasse in µg/m<sup>3</sup> angegeben. Der Grad der Determination richtete sich nach

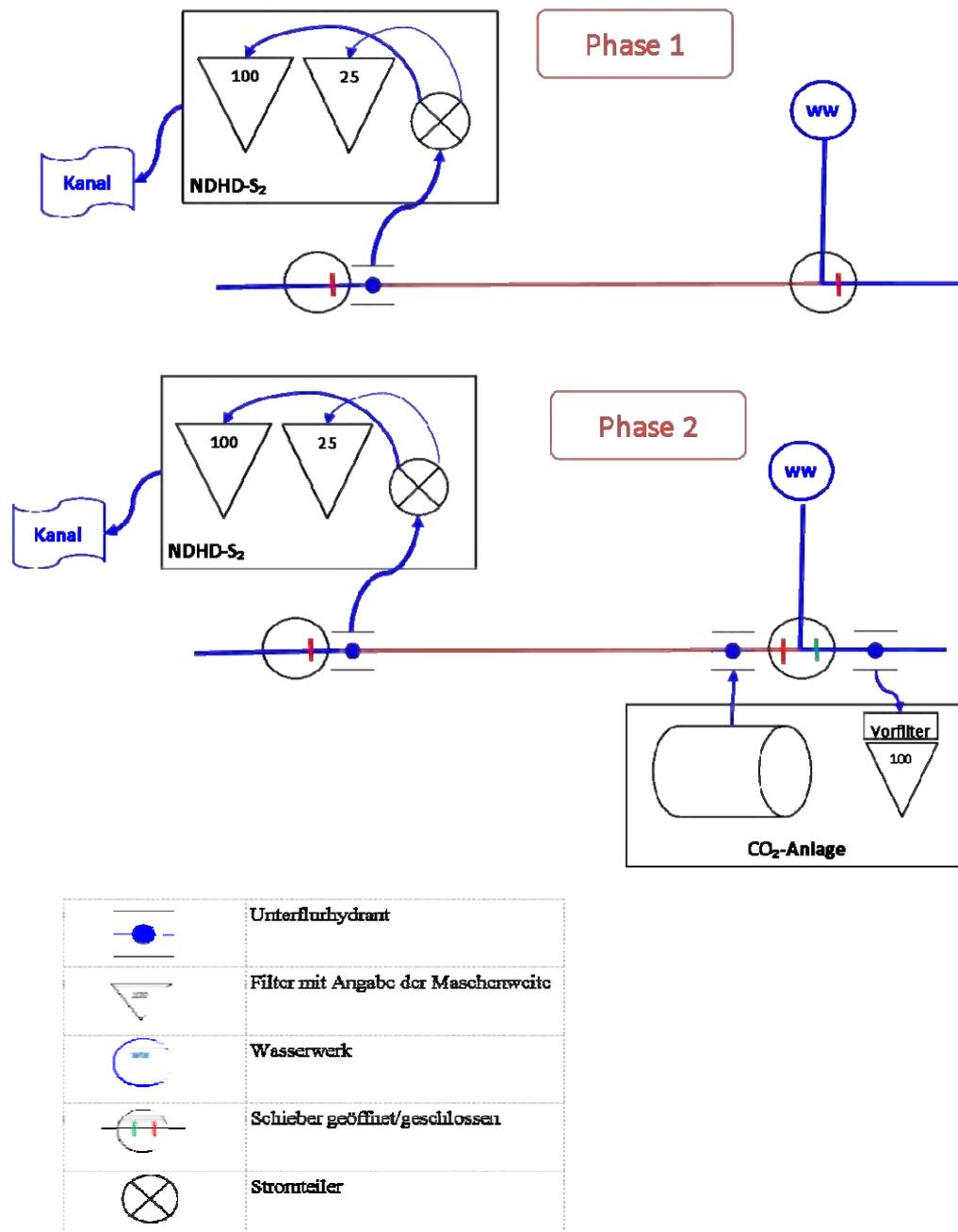


Abb. 1. Versuchsaufbau und Versuchsablauf (schematische Darstellung).

dem Erfordernis, ein Biovolumen bzw. eine Biomasse zu ermitteln. Im Falle von Tiergruppen mit einfachem Körperbau (z. B. Gliederwürmer, Fadenwürmer) war hierfür die Angabe der Tiergruppe bereits ausreichend, im Fall von Schalenamöben oder Rädertierchen erfolgte die Determination bis auf Gattungs- oder Artniveau. Auf dieser Grundlage konnte für Makro- und Mikroinvertebraten und für die Kotpellets von Wasserasseln der jeweilige Austrag über die

Filtrierapparatur (NDHD-S2), die CO<sub>2</sub>-Spülung und ein Gesamtaustrag ermittelt werden. Die Berechnung der Biovolumina bzw. Biomassen erfolgt nach von Tümpling & Friedrich (1999).

### 3. Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1. Taxazahlen und Individuendichten

Unter den oben benannten Prämissen konnte eine Vielzahl von Taxa registriert werden, die insgesamt 8 verschiedenen Tiergruppen zuzuordnen sind. Der aktuelle qualitative Nachweis ist dem früherer Untersuchungen sowie Angaben für ähnliche Erhebungen in den Niederlanden sowie Dänemark vergleichbar (z. B. Gunkel et al., 2010; Christensen et al., 2011; Evans, 2004; van Lieverloo et al., 2004).

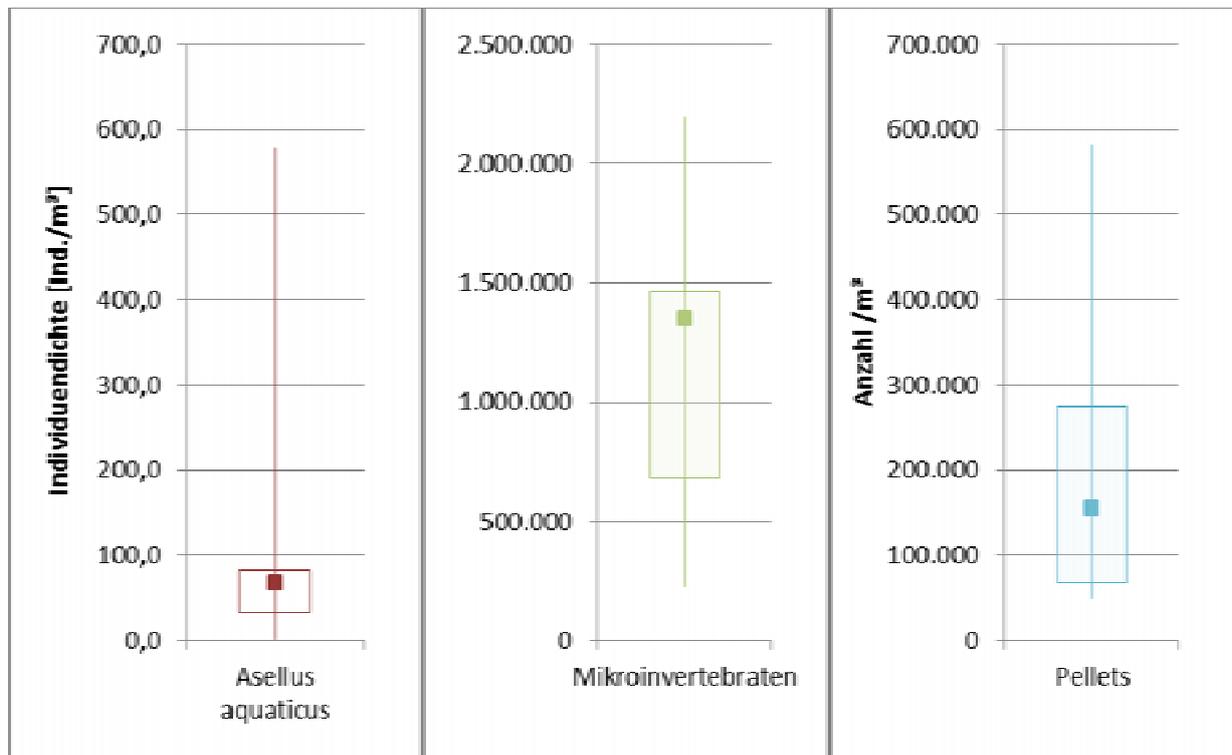


Abb. 2. Besiedlungsdichten wirbelloser Tiere und Anzahl von Kotpellets in den untersuchten Rohrleitungen verschiedener Trinkwasserverteilungssysteme.

Bemerkenswert sind vor allem die vorgefundenen Besiedlungsdichten wirbelloser Tiere in den untersuchten Rohrabschnitten, ermittelt nach komplettem Austrag mittels Kohlendioxid-Spülung (Abb. 2). In allen Abschnitten wurden Wasserasseln registriert. Die Besiedlungsdichten variieren hier zwischen 1 bis 580 Ind./m<sup>3</sup> Rohrleitungsinhalt, das sind 16 bis 4640 Tiere pro Kilometer

Rohrleitung. Im Falle der Mikroinvertebraten sind die festgestellten Individuenabundanzen noch um ein Vielfaches höher: pro Kubikmeter Rohrinhalt wurden zwischen 225.000 und mehr als 2 Millionen Tiere registriert, bezogen auf die Länge der Rohrleitung sind es 1.100 bis 175.000 Ind./km Die Dichte der Besiedelung ist sowohl im Falle von Makro- als auch von Mikroinvertebraten unabhängig vom Material der Rohrleitung.

### 3.2. Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit von Hydrantenspülungen

Für vergleichbare Analysen von Invertebraten aus Trinkwasserleitungen ist es erforderlich, den Anteil der mit einer definierten Methode nachweisbaren Taxa und Individuen am jeweiligen Gesamtbestand zu kennen. Dieser Anteil entspricht im Prinzip dem remobilisierbaren Anteil an der vorhandenen Tiergemeinschaft im Rohrleitungsabschnitt. Bezüglich des remobilisierbaren Anteils wurden in den einzelnen Teststrecken erhebliche Unterschiede festgestellt; im Falle der Wasserasseln konnten maximal 80 % der vorhandenen Tiere mit dem Probeentnahmesystem nachgewiesen werden, minimal waren es lediglich 0,8 % (Abb. 3)!

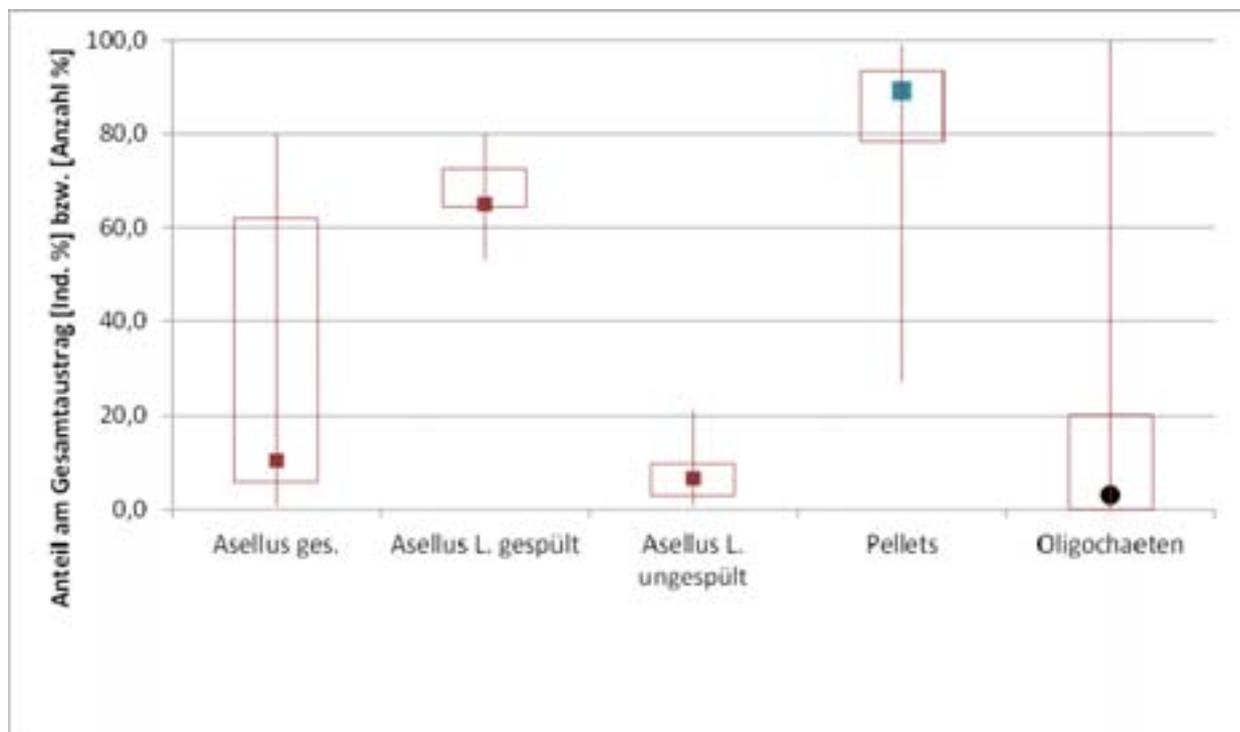


Abb. 3. Schwankungsbreite des Austrags von Makroinvertebraten (Wasserasseln, Kotpellets und Oligochaeten) aus Rohrleitungen (Boxplots). Legende: *Asellus* ges. = *Asellus aquaticus*; L. = Rohrleitung; Pellets = Kotpellets von *Asellus aquaticus*; angegeben sind die Mediane, oberes und unteres Quartil, Minimum und Maximum.

Im Falle der Mikroinvertebraten lag die Schwankungsbreite etwas geringer zwischen 21 und 71 %. Allein die Kotpellets der Wasserasseln konnten in allen Teststrecken nahezu quantitativ nachgewiesen werden, der Austrag mittels Filtrierapparatur (NDHD-S2) erfolgte zu 80 bis 100 %.

### **3.2.1. Austrag von Makroinvertebraten (*Asellus aquaticus*, deren Kotpellets und Oligochaeten)**

#### *a) Wasserasseln*

Die zunächst verfolgte Arbeitshypothese, dass ein quantitativ reproduzierbarer Austrag vor allem von der in der zu beprobenden Rohrleitungsstrecke erzeugten Strömungsgeschwindigkeit abhängt, konnte im Rahmen der Tests nicht bestätigt werden: Bei Fließ- bzw. Spülgeschwindigkeiten zwischen 0,5 und 1,5m/s wurde mit einer Erhöhung der Spülgeschwindigkeit kein signifikant höherer Austrag wirbelloser Makroorganismen erreicht. Darüber hinaus hatte auch das Rohrmaterial keinen Einfluss auf die Remobilisierbarkeit während der Probenentnahme. Im Verlaufe weiterer Recherchen bezüglich der untersuchten Rohrleitungen wurde im Falle der Wasserasseln vielmehr deutlich, dass der Anteil ausgetragener Individuen in hohem Maße von der Vorbehandlung bzw. der Menge des dort abgelagerten Materials anhängt. So wurden aus gespülten Strecken<sup>1</sup> deutlich mehr Wasserasseln im Vergleich zum Gesamtaustrag mobilisiert als im Falle von nicht oder seltener gespülten Strecken (Abb. 3). Dies erklärt sich aus deren Mobilität und stark ausgeprägtem thigmotaktischen Verhalten. Die Tiere sind offensichtlich in der Lage bereits geringe Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeit wahrzunehmen, um schnellstmöglich Schutz in Nischen bzw. in den vorhandenen Ablagerungen zu suchen. Ähnlich zu interpretierende Ergebnisse konnten bereits in vorangegangenen Untersuchungen festgestellt werden bzw. sind in Christensen et al. (2011) dokumentiert; im Falle von Wiederholungsuntersuchungen nach jeweils einem Monat wurden höhere Individuendichten an Wasserasseln registriert als im Falle der Ausgangsuntersuchungen. Für eine Beurteilung der tatsächlich vorhandenen Besiedlungsdichte an Wasserasseln müssen demzufolge die Ablagerungsbedingungen in den zu untersuchenden Rohrleitungsabschnitten bekannt sein. Da sich ein solcher Parameter im praktischen Einsatz vorab kaum genau ermitteln lässt, kann eine Abschätzung über zwei Ablagerungszustände erfolgen,

1. im Falle aktuell gespülter, neu verlegter oder ausgetauschter Rohrleitungsabschnitte beträgt der Austrag von Wasserasseln im Vergleich zu deren Gesamtbestand in der Rohrleitung durchschnittlich 68 % bezogen auf die Individuendichte bzw. 64 % bezogen auf die Biomasse,

---

<sup>1</sup>Die Spülungen erfolgten längstens 4 Monate vor Versuchsbeginn

2. im Falle nicht gespülter Rohleitungsabschnitte beträgt der Austrag von Wasserasseln durchschnittlich nur 8 % bezogen auf die Individuendichte bzw. 11 % bezogen auf die Biomasse.

#### *b) Kotpellets*

Zusätzlich zur Analyse der Wasserasseln selbst können deren Kotpellets quantitativ erfasst werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass diese bereits bei Fließgeschwindigkeiten von 0,5 m/s quantitativ remobilisiert werden und die Analysenergebnisse sehr gut reproduzierbar sind. Darüber hinaus ist der Zusammenhang zwischen der Anzahl vorhandener Kotpellets und der Besiedelungsdichte von Wasserasseln statistisch signifikant, so dass eine Beurteilung von Wasserasseln auch auf diesem Wege zusätzlich möglich ist (s. a. Tietze & Gunkel, 2013).

#### *c) Gliederwürmer (Oligochaeten)*

Im Gegensatz zu den Wasserasseln unterliegt der quantitative Austrag von Gliederwürmern (Oligochaeten) generell einer hohen Variabilität und es sind tendenziell sehr niedrige Austrags- bzw. Wiederfindungsraten zu erreichen (Abb. 3). Im Zusammenhang mit der Erarbeitung einer für die Niederlande standardisierten Methode konnten im Rahmen der Untersuchungen von van Lieferloo et al. (2004) Wasserasseln zu durchschnittlich 44 % ausgetragen werden mit einem Schwankungsbereich von 22 bis 63 %. Im Vergleich dazu wurden für Oligochaeten signifikant geringere Austräge erzielt: die Wahrscheinlichkeit ihres Nachweises lag bei durchschnittlich 30 % (2 - 65 % Schwankungsbereich). Auch wenn auf Grund der unterschiedlichen Erfassungsmethode kein direkter Vergleich der Daten möglich ist, werden jedoch grundsätzliche Tendenzen deutlich. Auf Grund ihrer Körperform und ihres ausgeprägten thigmotaktischen Verhaltens sind Oligochaeten offensichtlich am Besten in der Lage sich vor einem Verdriften mit der Wasserströmung zu schützen.

### **3.2.2. Austrag von Mikroinvertebraten**

Die Bedeutung der mikroskopisch kleinen Invertebraten besteht vor allem in ihrer Gesamtheit als Biomasse bzw. biogener organischer Substanz und in dem damit verbundenen Hinweis auf vorhandene Nahrungsquellen. In diesem Zusammenhang ist die Analyse ihres qualitativen und quantitativen Vorkommens von Bedeutung und Bestandteil der biologischen Wasserqualität. Auf Grund ihrer geringen Körpergröße bzw. ihres flachen Habitus sind sie vergleichsweise gut gegenüber turbulenter Strömung geschützt. Dies trifft umso mehr zu, wenn die Biofime der Rohrwandungen als Hauptnahrungsquelle genutzt werden. Eine zweite wichtige Nahrungsquelle stellen organische Ablagerungen im Rohrleitungssystem dar (Mulm), hier lebende Organismen (Mulmfauna) können sich

nur schwer vorm Austrag bei Probeentnahmen oder Spülungen schützen, da sie quasi mit ihrem Lebensraum selbst ausgetragen werden. Der quantitative Austrag von Mikroinvertebraten scheint somit vor allem von ihrem bevorzugten Lebensraum abzuhängen. Der Anteil nachweisbarer Individuen unterliegt im Falle der betrachteten Tiergruppen einer mehr oder weniger großen Schwankungsbreite und ist unabhängig vom Rohrmaterial und dem Ablagerungszustand der Rohrleitung sowie von der Fließgeschwindigkeit während der Probenahme (Abb. 4).

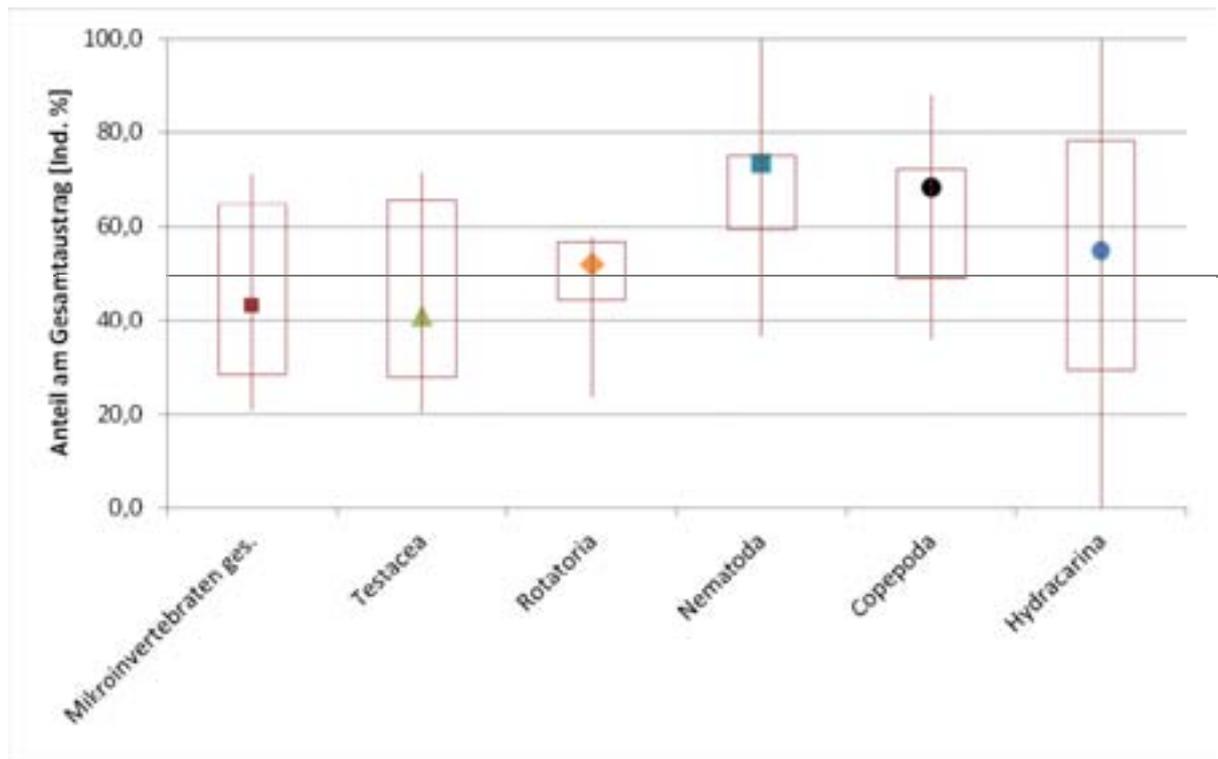


Abb. 4. Schwankungsbreite des Austrags von Mikroinvertebraten aus Rohrleitungen (Boxplots mit Median, oberes und unteres Quartil, Minimum, Maximum).

Vergleichsweise hohe Remobilisierungsraten wurden im Falle von Fadenwürmern (*Nematoda*) und Ruderfußkrebse (*Copepoda*) festgestellt, der Anteil nachweisbarer Individuen betrug durchschnittlich 69 % (*Nematoda*) und 70 % (*Copepoda*). Im Falle der Ruderfußkrebse kamen van Lieferloo et al. 2004 zu ähnlichen Ergebnissen. Der quantitative Nachweis von Schalenamöben (*Testacea*) und Wassermilben (*Hydracarina*) ist auf Grund der großen Schwankungsbreite dagegen sehr unsicher (Abb. 4). Schalenamöben sind offensichtlich sowohl im Biofilm der Rohrwandungen als auch im Mulm zu finden und werden je nach aktuellem Habitat mehr oder weniger gut ausgetragen. Im Falle der räuberisch lebenden und mobilen Wassermilben (*Hydracarina*) ist die aktuelle Präsenz im

Mulm oder im Biofilm möglicherweise der entscheidende Faktor, der einen Austrag ermöglicht oder verhindert.

Die Darstellung in Abb. 4 zeigt darüber hinaus, ob innerhalb der betrachteten Tiergruppen Präferenzen für einen Lebensraumtyp (Biofilm oder Mulm) vorhanden sind. Während Rädertiere (*Rotatoria*), Schalenamöben (*Testacea*) und Wassermilben (*Hydracarina*) ein eher unspezifisches Verhalten zeigen, sind Fadenwürmer (*Nematoda*) und Ruderfußkrebse (*Copepoda*) offensichtlich mit dem Mulm assoziiert und werden direkt mit diesem ausgetragen.

#### 4. Schlussfolgerungen

Die qualitative und quantitative Analyse wirbelloser Tiere in Trinkwasserverteilungssystemen ist eine wichtige Kenngröße der biologischen Wasserqualität. Unter standardisierten Bedingungen für Probeentnahme und Analyse sind repräsentative Angaben zu Individuendichten und Biomassen der vorkommenden Organismen möglich. Ein vergleichbares Ergebnis hängt vor allem von der Art der Probeentnahme (drucklose Filtration, verwendete Maschenweiten) ab. Im Falle der Wasserasseln ist darüber hinaus die Kenntnis des Ablagerungszustandes (gespült, nicht gespült) für die Bewertung des insgesamt vorhandenen Individuenbestandes erforderlich. Im Falle der Mikroinvertebraten kann auf Basis der vorhandenen Tiergruppen ebenfalls eine Abschätzung des Gesamtbestandes vorgenommen werden, teilweise besteht jedoch noch eine große Variabilität der Daten. In den Tabellen 2 und 3 sind die für eine standardisierte Probeentnahme empfohlenen Parameter bzw. Randbedingungen und die unter diesen Bedingungen registrierten Remobilisierungsraten für die wichtigsten Arten bzw. Tiergruppen zusammengestellt.

Tabelle 2. Empfohlene Parameter bzw. Randbedingungen für die Beprobung von Trinkwasserverteilungssystemen.

Art der Probeentnahme	Probeentnahme aus Hydranten, Filtration vor Ort Filtrierapparatur
Probenvolumen	1m <sup>3</sup>
Filtration und Filter	drucklose Filtration, parallele Filtration über zwei Filter nach Stromteilung, Maschenweiten 100 µm und 25 µm
Fließgeschwindigkeit während der Probeentnahme	0,5 bis 1,5 m/s

Tabelle 3. Beprobung von Trinkwasserverteilungssystemen: Anteil nachweisbarer Individuen bezogen auf die Gesamtbesiedelungsdichte, angegeben sind Median, Minimum und Maximum.

Art / Tiergruppe	Anteil nachweisbarer Individuen [%]
<i>Asellus aquaticus</i> (ungespülter Rohrabschnitt)	7 (3-10)
<i>Asellus aquaticus</i> (gespülter Rohrabschnitt)	65 (65-73)
Gliederwürmer (Oligochaeta)	17 unsicher, da sehr große Schwankungsbreite
Rädertiere (Rotatoria)	50 (44-57)
Fadenwürmer (Nematoda)	74 (60-75)
Ruderfußkrebse (Copepoda)	69 (49-73)
Schalenamöben (Testacea)	41 unsicher, da sehr große Schwankungsbreite

## 5. Zusammenfassung

Zur qualitativen und quantitativen Untersuchung von tierischen Organismen in Wasserversorgungsanlagen existieren bislang kaum verbindliche standardisierte Verfahren. Im Fokus des Forschungsprojektes standen somit die methodischen Aspekte der Invertebratenproblematik, die Erarbeitung von technischen und verfahrenstechnischen Grundlagen für eine repräsentative und vergleichbare Datenerhebung. An insgesamt 14 Teststrecken in verschiedenen Trinkwasserversorgungsgebieten wurde untersucht, bei welchen Randbedingungen der Probeentnahme ein möglichst vollständiger Austrag tierischer Kleinstlebewesen erreicht werden kann und unter welchen Bedingungen vergleichbare Ergebnisse erzielt werden sind. Mit 9 Testvarianten wurde der Einfluss von Rohrmaterial und Strömungsgeschwindigkeit während der Probeentnahme auf den Austrag von Invertebraten untersucht. Im Rahmen der Versuchsdurchführung wurde nach einer standardisierten Probenahme auch der Gesamtbestand wirbelloser Tiere jeder Teststrecke mittels CO<sub>2</sub>-Spülverfahren ermittelt.

Der Austrag wirbelloser Tiere aus Trinkwasserverteilungssystemen ist unter den Versuchsbedingungen (erzeugte Fließgeschwindigkeit in der Teststrecke zwischen 0,4 m/s bis 1,5 m/s) unabhängig von der Höhe der Fließgeschwindigkeit und dem Material der Rohrleitung. Ein vergleichbares Ergebnis hängt vor allem von der Art der Probeentnahme (drucklose Filtration, verwendete Maschenweiten) ab. Im Falle der Wasserasseln ist darüber hinaus die Kenntnis des 'Ablagerungszustandes' (gespült, nicht gespült) für die Bewertung des insgesamt vorhandenen Individuenbestandes erforderlich. Der quantitative Austrag (Nachweis) von Mikroinvertebraten scheint vor allem von deren bevorzugten Lebens-

raum abzuhängen. Der Anteil nachweisbarer Individuen unterliegt in Anhängigkeit der betrachteten Tiergruppe einer mehr oder weniger großen Schwankungsbreite.

## Referenzen

- Christensen, S. C. B., Nissen, E., Arvin, E. & Albrechtsen, H.-J. (2011) Distribution of *Asellus aquaticus* and microinvertebrates in a non-chlorinated drinking water supply system--effects of pipe material and sedimentation. *Wat. Res.* 45,10, 3215–3224.
- DVGW (1997) DVGW Regelwerk, Technische Mitteilung, Hinweis W 271, Tierische Organismen in Wasserversorgungsanlagen. DVGW Bonn, 45 S.
- Evins, C. (2004) Small animals in drinking water distribution systems. In *Safe piped water: managing microbial water quality in piped distribution systems*. World Health Organization, IWA Publishing, London, 101-120.
- Gunkel, G., Michels, U., Scheideler, M., & Ripl, K. (2010) Vorkommen und Bedeutung von Kleintieren in Trinkwasserverteilungssystemen - Maßnahmen zu deren Regulierung. *3R* 12, 716–724.
- Scheideler, M., Gunkel, G. & Michels, U. (2013) Entwicklung einer Mehrfach-Filterapparatur für die Erfassung von Invertebraten in Trinkwasserverteilungssystemen. In: U. Michels, G. Gunkel, M. Scheideler & K. Ripl (Hrsg.) *Invertebraten im Trinkwasser – Probenahme, Analytik und Bewertung*. Universitätsverlag der TU Berlin, ISBN 978-3-7983-2575-3 (online), 3 -29.
- Titze, D. & Gunkel, G. (2013) Asselkot als Indikator für die Besiedlung von Trinkwasserversorgungssystemen mit Wasserasseln. In: U. Michels, G. Gunkel, M. Scheideler & K. Ripl (Hrsg.) *Invertebraten im Trinkwasser – Probenahme, Analytik und Bewertung*. Universitätsverlag der TU Berlin, ISBN 978-3-7983-2575-3 (online), 63-82.
- van Lieverloo, J. H. M., Hoogenboezem, W., Veenendaal, G. & van der Kooij, D. (2012) Variability of invertebrate abundance in drinking water distribution systems in the Netherlands in relation to biostability and sediment volumes. *Wat. Res.* 46, 16, 4918–4932.
- van Lieverloo, J. H. M., Bosboom, D.W., Bakker, G. L., Brouwer, A. J., Voogt, R. & Roos, J. E. M de (2004) Sampling and quantifying invertebrates from drinking water distribution mains. *Wat. Res.* 38, 5, 1101–1112.
- von Tümppling, W. & Friedrich, G. (1999) *Methoden der biologischen Wasseruntersuchung*, Bd. 2. Gustav Fischer Verlag, Jena, 545 S.

## Danksagung

Herzlicher Dank gilt den an den Untersuchungen beteiligten Wasser- und Abwasserzweckverbänden sowie deren Unternehmen zur Betriebsführung für die Möglichkeit der Durchführung verschiedener Untersuchungen und für die praktische, technische Unterstützung des Projektes. Der Technischen Universität Berlin, FB Wasserreinhaltung und der Technischen Universität Dresden, Professur Wasserversorgung danken wir für die Unterstützung durch

Bereitstellung von Kapazitäten im Bereich Labor und Technikum. Das Projekt wurde gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, wir bedanken uns für die kompetente Projektbegleitung. Besonderer Dank gilt allen Projektpartnern und deren unmittelbar beteiligten Mitarbeitern für die vertrauensvolle Zusammenarbeit und konstruktiven Diskussionen.

### **Kontaktadresse**

Ute Michels,  
AquaLytis, Karl-Marx-Straße 119, 15745 Wildau.  
Fon: ++49 3375 246366, Fax: ++49 3375 246367,  
e-mail: utemichels@aqualytis.com

## **Kotpellets der Wasserassel als Indikator für die Besiedlung von Trinkwasser-Versorgungssystemen**

Daniel Titze & Günter Gunkel

Technische Universität Berlin, Germany

**Abstract:** Since many years the drinking water quality has to be evaluated using chemical-physical, toxicological and hygienic parameters, but increasing significance of water quality become biological parameter, because some small invertebrate such as the water louse (*Asellus aquaticus*), up to 16 mm long, as well as other animals (among else water fleas, worms, thecamoeba) are habitants of drinking water distribution systems. Up to now, no standard method as well as no simple and practicable sampling exists for the qualitative and quantitative determination of these animals in drinking water distribution systems. Within an interdisciplinary research project of the Berlin University of Technology, the Technical University of Dresden and the companies Aqualytis and Scheideler Verfahrenstechnik a sampling and analyzing system has been developed, which enable a gentle and quantitative separation of water louses, their feces and of other invertebrates using flushing of a water hydrant. It was demonstrated that feces of water louses are a good indicator for the occurrence of water louses in drinking water system. Microscopically determination of feces can be easily done. Feces of water louse are very stable in drinking water, and even after 6 weeks, only a beginning destruction by bacteria and fungi occurred. Using the sampling and analyzing system these small invertebrates as well as feces of water louses were separated using a two step low pressure high flow rate stainless steel filter system with 100 µm and 25 µm mesh size.

**Keywords:** Biologische Trinkwasserqualität, Wasserassel, *Asellus aquaticus*, Invertebraten, Trinkwasserversorgungssysteme

### **1. Einführung**

Die Anforderungen an die Qualität von Trinkwasser sind zu mindestens in vielen europäischen Ländern sehr hoch, und die wasserchemischen Qualitätsnormen (= toxikologische Unbedenklichkeit) sowie die Grenzwerte für pathogene mikrobielle Kontaminanten (= hygienische Unbedenklichkeit) werden in der Regel eingehalten und eventuell auftretende Störungen werden umgehend beseitigt. Dagegen ist das Auftreten von Bewohnern der Trinkwasserversorgungssysteme aus der Gruppe der Invertebraten (wirbellose Kleinstlebewesen) in enger Verbindung mit dem

wandseitigen Bewuchs, dem Biofilm (= biologische Trinkwasserqualität) bislang nur am Rande Gegenstand der öffentlichen Diskussion (van Lieverloo et al., 2012; Christensen et al., 2011; Michels, 2008), obwohl diese Rohrnetzbewohner sowohl aufgrund der Wasserqualitätsnormen (“rein“, “ästhetisch“; TrinkwV, 2003; DIN 2000, 2000; UBA, 2004) als auch aufgrund möglicher gesundheitlicher Risiken (Verkeimung durch tote Tiere, Carrier für pathogene Bakterien) Gegenstand regelmäßiger Untersuchungen sein sollte (WHO, 2004; Evins, 2004; Gunkel & Scheideler, 2011; Christensen et al., 2013).

Während Bakterien problemlos aus den Trinkwasserversorgungssystemen ausgetragen und nachgewiesen werden können, ist dies bei dem Biofilm nicht möglich und indirekte Verfahren (Besiedlung eingebrachter Substrate) müssen zum Einsatz kommen. Bei den Invertebraten ist der Nachweis ungleich schwieriger, da sich die Organismen z. T. aktiv an der Rohrwandung festhalten (van Lieverloo et al., 2004; DVGW, 2010). Dieser Festhaltereflex tritt insbesondere bei der Wasserassel (*Asellus aquaticus*) auf, ein Vertreter der Krebstiere, bis zu 16 mm groß (Michels 2008). Die Wasserassel ist zugleich ein Indikatororganismus für die Besiedlung der Trinkwasserversorgungssysteme, u. a. wegen der leichten Erkennbarkeit (mit bloßem Auge auf den Hausfiltern sichtbar) und der großen Bedeutung für die ästhetische Beurteilung des Wassers.

Das Auftreten von Wasserasseln ist ein eindeutiger Beweis für erhöhte Einträge von biologisch nutzbaren organischen Kohlenstoffverbindungen und in Folge von einer starken Entwicklung des Biofilms und anderen Invertebraten, die sich direkt oder indirekt vom Biofilm ernähren. Wasserasseln fressen als größte Konsumenten in den Trinkwasserversorgungssystemen Bakterien und Pilze (Graça et al., 1994), sind aber auch kannibalisch bzw. Aasfresser (eigene Beobachtung).

Wasserasseln (Abb. 1) entwickeln in Trinkwasserversorgungssystemen selbstständige Populationen, d.h. sie vermehren sich mit 2 – 3 Generationen pro Jahr in Mitteleuropa (Chambers, 1977; Adcock, 1979) und können erhebliche Dichten erreichen, die Maximalfunde lagen bei 15.000 Tieren pro km Trinkwasserver-sorgungsleitung (Michels, 2008; Gunkel & Scheideler, 2011). Somit ist die quantitative Ermittlung der Dichte der Wasserasseln ein zentraler Aspekt der biologischen Trinkwasserqualität und es müssen geeignete und praktikable Verfahren für deren Bestimmung entwickelt werden.

Der quantitative Austrag von Wasserasseln ist zuverlässig nur mit einer sehr aufwändigen Probenahmetechnik, dem CO<sub>2</sub>-Spülverfahren möglich; hierbei werden die Wasserasseln mit CO<sub>2</sub> narkotisiert, können sich somit nicht mehr festhalten, und werden mit dem Spülstrom ausgetragen (Gunkel & Scheideler, 2011). Dieses Verfahren arbeitet zuverlässig, erfordert aber die Herstellung erheblicher Mengen von CO<sub>2</sub> angereichertem Spülwasser, was durch ein mobiles Equipment erfolgt.



Abb. 1. Wasserassel (*Asellus aquaticus*).

Im Rahmen des Projekts “Entwicklung eines mobilen Probenahme- und Messsystems für Invertebraten und partikuläre Belastungen in Trinkwasserverteilungssystemen“ des BMWi sollte daher untersucht werden, ob Asselkot als einfach auszutragende Rohnetzablagerung ein Indikator für das Vorkommen von Wasserasseln in Trinkwasserverteilungssystemen sein kann. Ein essentielles Kriterium ist die eindeutige mikroskopische Identifizierung der Asselkot-Pellets, eine ausreichende Stabilität des Asselkots im Rohrnetz und eine schonende Abtrennung in einer Filtrierapparatur. Elektronenmikroskopische Aufnahmen von Pellets aus Spülungen zeigten jedoch, dass ein signifikanter Anteil der Partikel beim Auftreffen auf das Filter zerbricht, auch wenn ein NDHD (Niederdruck-Hochdurchsatz) Filter verwendet wird.

Im Rahmen des Projektes wurde die Filtertechnik weiter entwickelt und es wurden Struktur- und Stabilitätseigenschaften von Asselkotpellets untersucht. Zudem wurde eine Korrelation zwischen der Größe der Asseln und der Größe der ausgeschiedenen Kotpellets hergestellt. Diese ermöglicht es, die Population innerhalb eines Rohrnetzes zu charakterisieren und u. a. die Vermehrungsrate, d. h. die Zahl der Generationen pro Jahr, zu bestimmen.

## **2. Material und Methoden**

### **2.1. Laboruntersuchungen**

Die Hälterung der Wasserasseln erfolgte in permanent mit Trinkwasser (chlorfrei) durchströmten Kunststoffbehältern; es wurden hierzu Tiere der durchgeführten Spülungen der Trinkwasserversorgungsleitungen verwendet. Die Tiere wurden mit Erlenlaub gefüttert.

Die Untersuchungen zur Größe der Asselkotpellets in Abhängigkeit der Tiergröße wurden als batch Versuche in handelsüblichen Bechergläsern durchgeführt.

Die Charakterisierung der Strukturstabilität von Asselkot erfolgte an einzelnen, frisch gewonnenen Kotpartikeln in kleinskaligen Säulen; um weitestgehend realitätsnahe Bedingungen einzustellen wurden die Versuchssäulen kontinuierlich mit Leitungswasser durchströmt.

Die Beziehung der Größe der Kotpellets zur Größe der Tiere wurde nach Separierung der Tiere in einzelne Größenklassen und anschließender Abtrennung der Pellets ermittelt. Die Vermessung der Kotpartikel erfolgte am Mikroskop (Olympus Axioskop) mit der Partikelsoftware *analySis*.

Spülrückstände aus Trinkwasserversorgungsleitungen wurden zur Dokumentation mit einem Stereomikroskop zuerst auf das gleiche Ausgangsvolumen gebracht (80 mL). Je nach Partikeldichte wurden die Proben anschließend mit ELGA-Wasser in festen Verdünnungsstufen bis auf eine mikroskopisch analysierbare Dichte gebracht. Die Proben wurden fotografiert (Olympus SC30) und mit der Software zu einem Bildstreifen aus 10 Aufnahmen zusammengesetzt.

Aufgrund des beobachteten Auftretens von Asselkot in den Trinkwasserversorgungsleitungen des Technikums an der TU Berlin wurden dort weitere Analysen durchgeführt. Die Beprobung erfolgte über Rückspülungen von 4 kontinuierlich betriebenen und im Rahmen des Projektes installierten Hausfiltern. Die Maschenweite der im Hausfilter eingesetzten Filter betrug 100 µm. Bedingt durch den kontinuierlichen Betrieb und die Ablagerung von Material auf den Filtern ist die effektive Maschenweite der Filter jedoch deutlich geringer, so dass auch eine Abtrennung von Partikeln <100 µm erfolgte. Über den gesamten Beprobungszeitraum von einem Jahr konnten nur wenige Exemplare von *Asellus aquaticus* auf den Filtern beobachtet werden, so dass die Charakterisierung der Wasserassel-Population im Leitungsnetz ausschließlich über den Asselkot als Indikator erfolgte.

## 2.2. Felduntersuchungen

Die Untersuchungen zum Wachstum der Wasserasseln, zum Auftreten von Asselkot in Abhängigkeit von der Besiedlung und zur Größenverteilung des ausgetragenen Wasserasselkots in Abhängigkeit von der Größe der Wasserasseln wurden an einem umfangreichen Probensatz eines norddeutschen Wasserversorgers durchgeführt, die Probe wurden während einer mehrmonatigen Spülung im Jahre 2009 gewonnen. Das Rohrnetz weist eine Ausdehnung von maximal ca. 4 km auf; die Einspeisung des Trinkwassers erfolgt über ein zentral gelegenes Grundwasserwerk. Zur statistischen Absicherung wurden pro Strecke mindestens 200 Tiere bzw. Kotpellets vermessen. Mit Hilfe der logistischen Regression, der Probit-Analyse, können die Populationen bzw. die Kotpellets aus den Spülungen in Kohorten eingeteilt werden, d. h. Gruppen von Tieren bzw. Kotpellets gleicher Größe (= Kohortenanalyse).

Die Überprüfung und Validierung des entwickelten Probenahme- und Messsystems wurde im November 2011 an insgesamt 14 Teststrecken in 2 verschiedenen Trinkwasserverteilungssystemen durchgeführt. Ein wichtiger Untersuchungsaspekt war die Wiederfindungsrate von partikulärem organischem Material (POM) in den beiden Teilströmen des entwickelten Probenahme- und Messsystems sowie die Wirksamkeit der verwendeten Filtrationseinheiten. Es konnten bei den Spülungen verschiedene Rohrmaterialien (Polyethylen, Asbestzement und Stahl) untersucht werden, um den möglichen Einfluss des Rohrmaterials auf die Austragungsrate der Wasserasseln und des Asselkots zu ermitteln. Die Spülungen wurden mit drei verschiedenen Spülgeschwindigkeiten durchgeführt ( $0,3 \text{ m sec}^{-1}$ ;  $0,6 - 0,7 \text{ m sec}^{-1}$ ;  $1,0 - 1,5 \text{ m sec}^{-1}$ ). Neben der Unterscheidung nach Material und Spülgeschwindigkeit erfolgte auch eine Differenzierung des erreichten Spülaustrages nach dem Zustand der jeweiligen Rohrleitung; unterteilt wurden die Rohrleitungen in nicht vorbehandelt (keine Kenntnis über die Vorbehandlung bzw. mindestens ein Jahr nicht gespült), sehr selten gespült (eine Spülung pro Jahr), selten gespült (Spülintervall alle 4 Monate) und häufig gespült bzw. kurz vorher gespült (letzte Spülung liegt weniger als einen Monat zurück).

### **2.3. Analytische Verfahren**

Um einen Eindruck über die strukturellen Eigenschaften von Asselkot zu bekommen wurden rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen an Pellets unterschiedlicher Herkunft durchgeführt. Die Pellets stammten dabei aus den Leitungsnetzen von zwei verschiedenen norddeutschen Wasserversorgern. Die unter realen Betriebsbedingungen produzierten Pellets wurden zudem mit frisch gewonnenem Asselkot von gehälterten Wasserasseln verglichen.

Zur Darstellung und Mikroanalyse der unterschiedlichen Ablagerungen im Rohrnetz ist in Zusammenarbeit mit der Zentraleinrichtung Elektronenmikroskopie (ZELMI) an der TU Berlin die Rasterelektronenmikroskopie in Verbindung mit der energiedispersiven Röntgenmikroanalyse (REM-EDX) eingesetzt worden. Das Graphitverfahren, das die Abbildung von Biofilmen ohne die übliche Bedampfung mit Gold ermöglicht, wurde in seiner Leistungsfähigkeit hierzu optimiert. Zudem wurde ein REM-EDX-Verfahren zur quantitativen Analyse von Asselkot entwickelt, und eine Validierung bzw. Kalibrierung des neuen Messverfahrens mit mehrfach EDX-Messungen zur Bestimmung der Elementzusammensetzung wurde durchgeführt. Es wurden EDX-Messungen von mehreren Partikeln gemacht, um die durchschnittliche Elementzusammensetzung des ausgetragenen Asselkots entlang der Spülstrecke zu erhalten.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1. Struktur des Asselkots

Asselkot hat eine rötliche Färbung und die charakteristische Form eines abgeflachten Zylinders mit einer Längsfurche (Abb. 2). Somit ist die mikroskopische Identifizierung von Asselkot einfach und eindeutig.

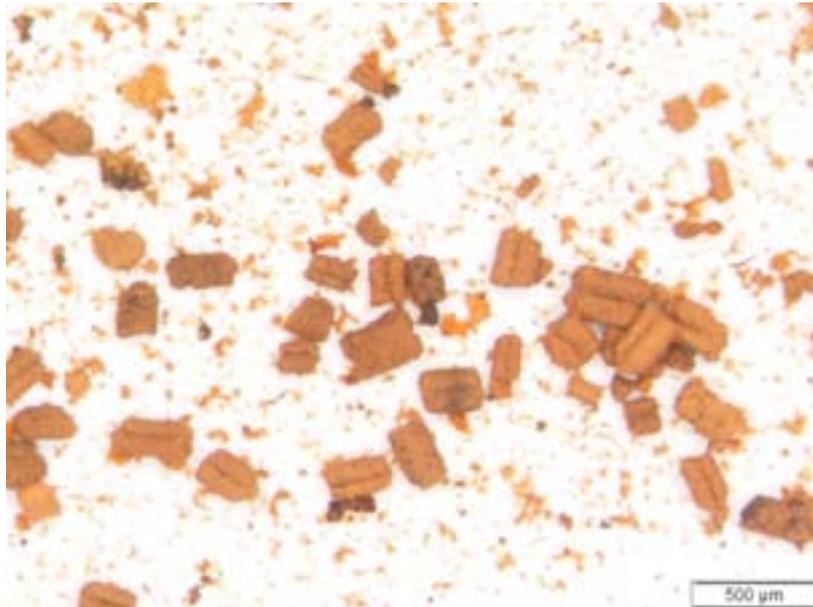


Abb. 2. Lichtmikroskopische Aufnahme von Asselkot aus einer Trinkwasserverorgungsleitung.

Die Struktur und Konsistenz von Asselkot ist abhängig von der Herkunft der Tiere, wie der Vergleich von Asselkot aus der Hälterung an der TU Berlin und aus Trinkwasserversorgungsleitungen gezeigt hat. Die Asselkotpellets aus den Spülungen zweier norddeutscher Kleinstädte haben eine sehr kompakte Struktur, bestehen nahezu ausschließlich aus sehr feinpartikulären Nahrungsresten und zeigen eine deutliche Längsfurche (Abb. 3A und B). Die Struktur des Kots von an der TU Berlin gehaltenen Asseln ist sehr locker und besteht aus plättchenartigen Nahrungsresten, die mit feinpartikulärem Material zusammengefügt sind. Die Längsfurche ist nur schwer erkennbar (Abb. 3C und D).

Ursache für die unterschiedliche Struktur der Asselkotpellets ist die unterschiedliche Ernährung der Tiere; während sich die Asseln in der Hälterung ebenso wie Tiere im Freiland von Erlenlaub und dem darauf befindliche Aufwuchs ernähren, steht den Wasserasseln in Trinkwasserverteilungssystemen hauptsächlich der Biofilm aus Bakterien, insbesondere eisenoxidierende Bakterien, Pilzen und anderen kleineren Organismen als Nahrung zur Verfügung. Die mikroskopische Analyse von Asselkot

aus verschiedenen Trinkwasserverteilungssystemen zeigt deutlich, dass sich die Struktur der Partikel nicht voneinander unterscheidet, u. a. da die Nahrungsgrundlage in Trinkwasserversorgungssystemen vergleichbar ist.

Die unterschiedliche Nahrung führt auch zur Änderung der chemischen Zusammensetzung des Asselkots, insbesondere ist der Kohlenstoffgehalt des Kots der Wasserasseln aus der Hälterung deutlich höher als der von den Tieren aus Trinkwasserversorgungsleitungen.

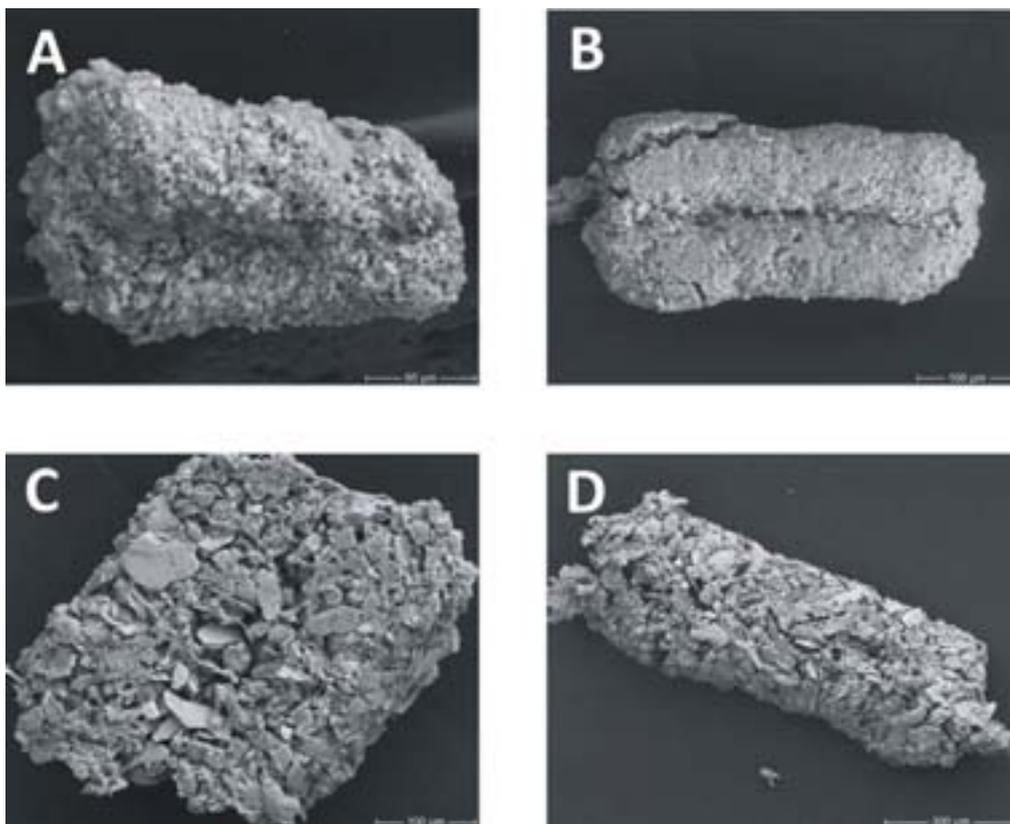


Abb. 3. Elektronenmikroskopische Aufnahmen von Asselkotpartikeln; (A) und (B) stammen aus den Leitungsnetzen von zwei norddeutschen Wasserversorgern, (C) und (D) sind von gehälterten und mit Erlenlaub gefütterten Wasserasseln.

### 3.2. Nachweis von Asselkotpellets in Trinkwasserversorgungssystemen

Eine zu hohe Kräfteeinwirkung des Spülstromes auf das NDHD Filter hat Beschädigungen der empfindlichen Invertebraten und des Asselkots zur Folge, so dass das entwickelte Probenahme- und Messsystem zum Einen mit einem Stromteiler (9 : 1) versehen wurde und zum Anderen mit zwei verschiedenen NDHD Filtersystemen (100  $\mu\text{m}$  bzw. 25  $\mu\text{m}$  Massenweite) ausgestattet wurden. Diese Filtrationsstufen

wurden aufgrund der Ergebnisse an einer Filterkaskade (200 µm, 100 µm, 25 µm, 10 µm) bei Untersuchungen in Trinkwassernetzen als Optimum ermittelt.

Die zweistufige Filtereinheit ermöglicht es Wasserasseln und anderen großen Invertebraten nahezu zerstörungsfrei mit einem großen Volumenstrom auf dem 100 µm Edelstahlfilter abzutrennen, während die feinpartikulären Bestandteile mit einem kleinen Volumenstrom auf dem 25 µm Edelstahlfilter zurückgehalten werden. In Kalibrierungsversuchen konnte gezeigt werden, dass beide Filter sehr gut fängig sind und auch kleine, sehr empfindliche Kotpellets schonend abgetrennt wurden, so dass diese für eine weitere mikroskopische Analyse verwendet werden können (s. Abb. 11).

Das Probenahme- und Messsystem muss an einen Hydranten angeschlossen werden und mit hoher Spülgeschwindigkeit von  $>30 - 50 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$  betrieben werden, dies entspricht einer Spülrate von  $>60 \text{ cm sec}^{-1}$ . Die erreichte Spüleffektivität sollte eine Reynoldszahl  $>2000$  aufweisen.

### 3.3. Stabilität von Asselkot

Die Untersuchungen zeigten, dass die Asselkotpellets über einen Zeitraum von mehreren Wochen ihre mikroskopisch leicht zu identifizierende Struktur behalten (Abb. 4A). Innerhalb der ersten 14 Tage nach Versuchsbeginn konnten keine strukturellen Veränderungen festgestellt werden. Erst nach einer Versuchslaufzeit von 6 Wochen zeigten sich erste Alterungserscheinungen. So konnte zum Einen ein schleimiger Überzug auf den Partikeln registriert werden, der auf eine beginnende mikrobielle Zersetzung hindeutet; zum Anderen wurden Pilzhyphen identifiziert, die ebenfalls als Indiz für einsetzende Zerfallsprozesse angesehen werden können (Abb. 4B und C).

Asselkot besitzt ein leicht negatives Zeta-Potential (Ripl, mündl. Mitteilung), so dass es zur Agglomeration von größeren Partikeln kommen kann, dies wurde auch mikroskopisch beobachtet, eine Reaktion, die die Sedimentation und lokale Akkumulation des Asselkots fördert.

### 3.4. Verfrachtung von Asselkot

Im Gegensatz zur aktiven Verbreitung der Wasserasseln in einem Trinkwasserverteilungssystem kann Asselkot nur passiv mit Hilfe des vorbeiströmenden Wassers in dessen Fließrichtung transportiert werden. Die Dichte der Asselkotpellets liegt mit  $1.200 \text{ g dm}^{-3}$ , etwas über der durchschnittlichen Dichte von *Asellus aquaticus* (ca.  $1.100 \text{ g dm}^{-3}$ ). Durchgeführte Berechnungen belegen, dass Asselkot mit einer Größe von 100 µm bei einer Fließgeschwindigkeit des Wassers von  $0,02 \text{ m s}^{-1}$  (laminare

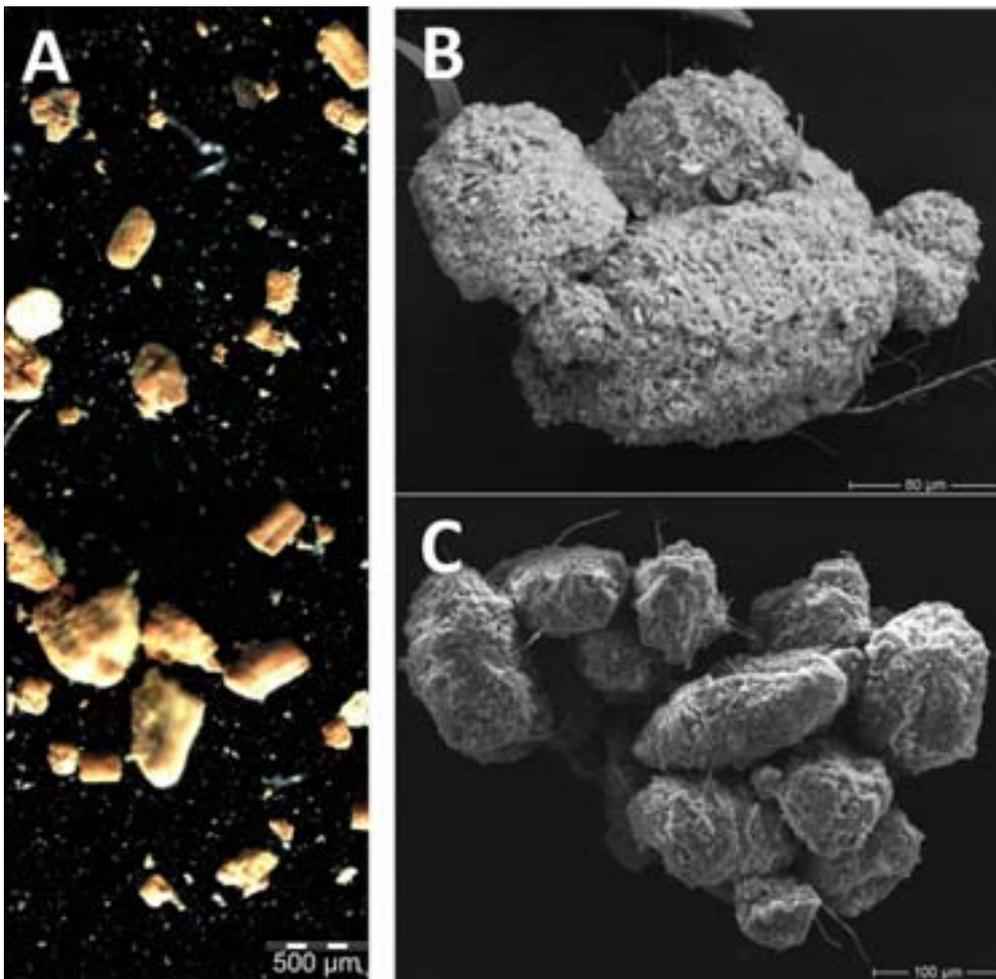


Abb. 4. Aufnahmen von Asselkot aus kleinskaligen durchströmten Säulen zur Ermittlung der Stabilität der Partikel; (A) lichtmikroskopische Aufnahme des Asselkots nach einer Laufzeit von 6 Wochen; (B und C) elektronenmikroskopische Aufnahmen von gealterten Asselkotpartikeln nach 6 Wochen, in (C) sind deutlich Pilzhyphen erkennbar.

Strömung) über eine Strecke von 1 m transportiert wird, bevor es zu einer Sedimentation kommt (Abb. 5). Die berechnete Transportstrecke gilt jedoch lediglich für den Fall, dass die Ausscheidung in der Rohrmitte erfolgt.

Wird der Kot im Bereich der Rohrwand ausgeschieden oder ist der Durchmesser der Partikel größer als 150 µm verringert sich die Transportstrecke nochmals deutlich. Eine Resuspension erfolgt erst bei deutlich höheren Fließgeschwindigkeiten und dem Auftreten turbulenter Strömungen bei ca.  $0,5 \text{ m sec}^{-1}$  (abhängig vom Rohrdurchmesser). Dies bedeutet, dass in schwach durchströmten Leitungen Asselkot nur bei Verbrauchsspitzen mit kurzfristig höheren Strömungsgeschwindigkeiten resuspendiert wird, dann aber auch nur wenige Meter transportiert wird, bevor es zu einer

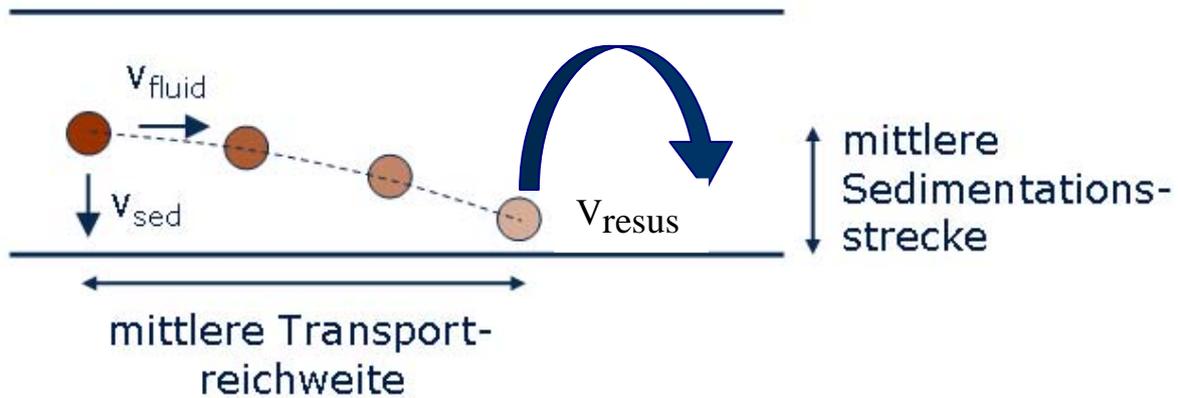


Abb. 5. Verfrachtung eines Partikels im Inneren einer durchströmten Trinkwasser- versorgungsleitung,  $V_{\text{resus}} > V_{\text{fluid}}$ .

erneuten Ablagerung kommt. Die Netto-Transportstrecken pro Tag sind gering und überschreiten in der Regel 10 m nicht. Nur in stark durchströmten Leitungen ( $>0,05 \text{ m sec}^{-1}$ ) erfolgt eine regelmäßige Resuspension und Verfrachtung mit anschließender Sedimentation; nur hier werden deutlich höhere Netto-Transportstrecken pro Tag erreicht.

Allerdings haben Versuche zur Ermittlung der Stabilität von Asselkot gezeigt, dass keine nennenswerte Alterung der Partikel über einen Zeitraum von 6 Wochen auftritt, so dass aufgrund der langen Haltbarkeit von Asselkot eine Verfrachtung über einige hundert Meter nicht auszuschließen ist. Unter typischen Netzbedingungen mit Fließgeschwindigkeiten von  $>0,05 \text{ m sec}^{-1}$  ist jedoch nicht mit einer signifikanten Verfrachtung der Kotpellets während ihrer Haltbarkeit im Rohrnetz zu rechnen.

### 3.5. Asselkot als Indikator für die Besiedlung von Trinkwasserversorgungssystemen

#### 3.5.1. Größenbeziehungen zwischen Wasserasseln und deren Kotpellets

Mit Hilfe des ausgetragenen Asselkots ist eine präzise Charakterisierung der im Trinkwasserverteilungssystem vorhandenen Wasserassel-Population nur möglich, wenn ein Zusammenhang zwischen Asselgröße und Größe der ausgeschiedenen Asselkotpellets besteht, wobei die Größe der Pellets durch deren Breite definiert wird. In Abb. 6 sind die Häufigkeitsverteilungen der drei untersuchten Wasserassel-Größenklassen bezüglich ihrer Kotpelletgrößen dargestellt. Diese belegen, dass der Asselkot verschieden großer Tiere unterschiedliche Größe aufwies und dass die Größe des Asselkots mit einer Normalverteilung mit geringer Streuung beschrieben werden kann.

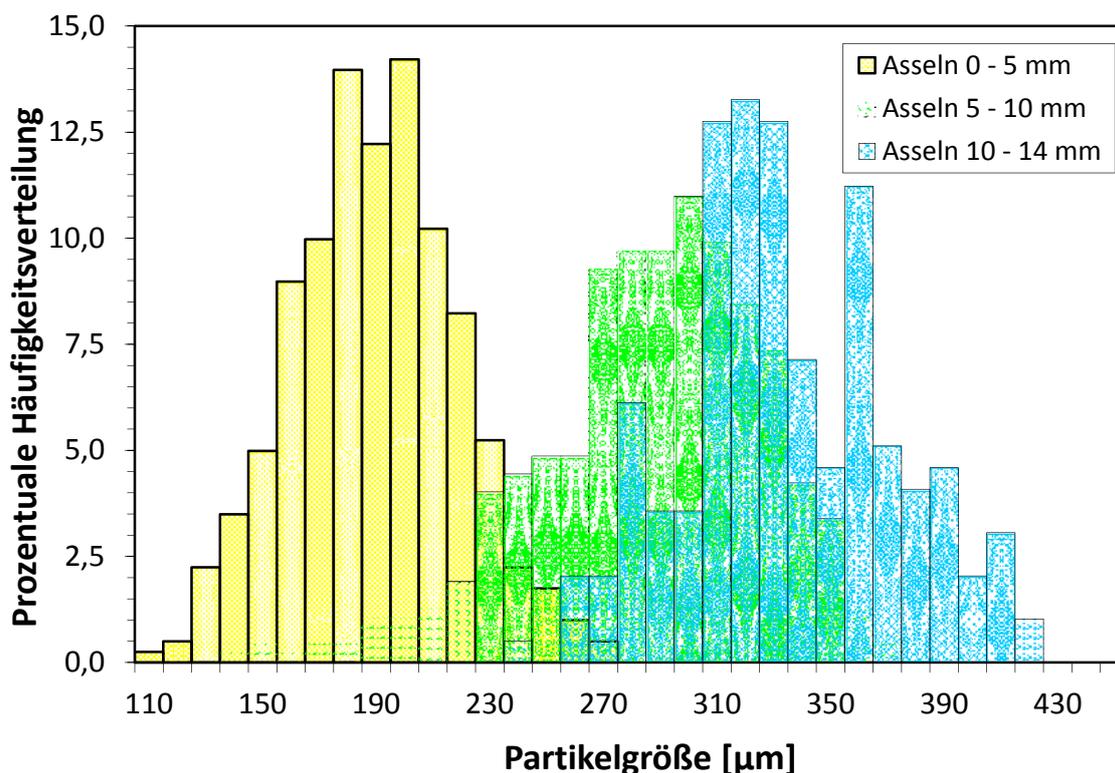


Abb. 6. Häufigkeitsverteilungen von Asselkotpellets aus drei verschiedenen Größenklassen von *Asellus aquaticus*.

Der Zusammenhang zwischen der Größe der Tiere und der Breite der Pellets kann sehr gut durch eine quadratische Funktion beschrieben werden (Abb. 7). Das berechnete Minimum der Partikelbreite liegt bei 50 µm; dies entspricht Jungtieren mit einer Körperlänge von 1 mm und stimmt gut mit gemessenen Darmbreiten von speziell präparierten Wasserasseln überein. Bedingt durch die nicht proportionale Zunahme der Kotpelletbreite liegt das berechnete Maximum bei einer Größe der Asseln von 12 mm bei ca. 350 µm.

### 3.5.2. Hydrantenspülungen zum Austrag von Wasserasseln und deren Kotpellets

Der quantitative Austrag von Wasserasseln aus Trinkwasserverteilungssystemen lässt sich zuverlässig nur mit dem aufwändigen CO<sub>2</sub>-Spülverfahren realisieren. Dies wurde durch umfangreiche Spülmaßnahmen zur Validierung des Probenahme- und Messsystems erneut bestätigt. Durch eine konventionelle Wasserspülung zur Untersuchung am Hydranten werden im Durchschnitt lediglich 24 % der im Rohrabschnitt befindlichen Wasserasseln austragen. Bei diesen Untersuchungen am Hydranten betrug das Spülvolumen 1 m<sup>3</sup>, die Spülgeschwindigkeit bei 0,6 – 1,5 m sec<sup>-1</sup> und die Spüldauer lag je nach Rohrquerschnitt bei 3 – 5 Minuten.

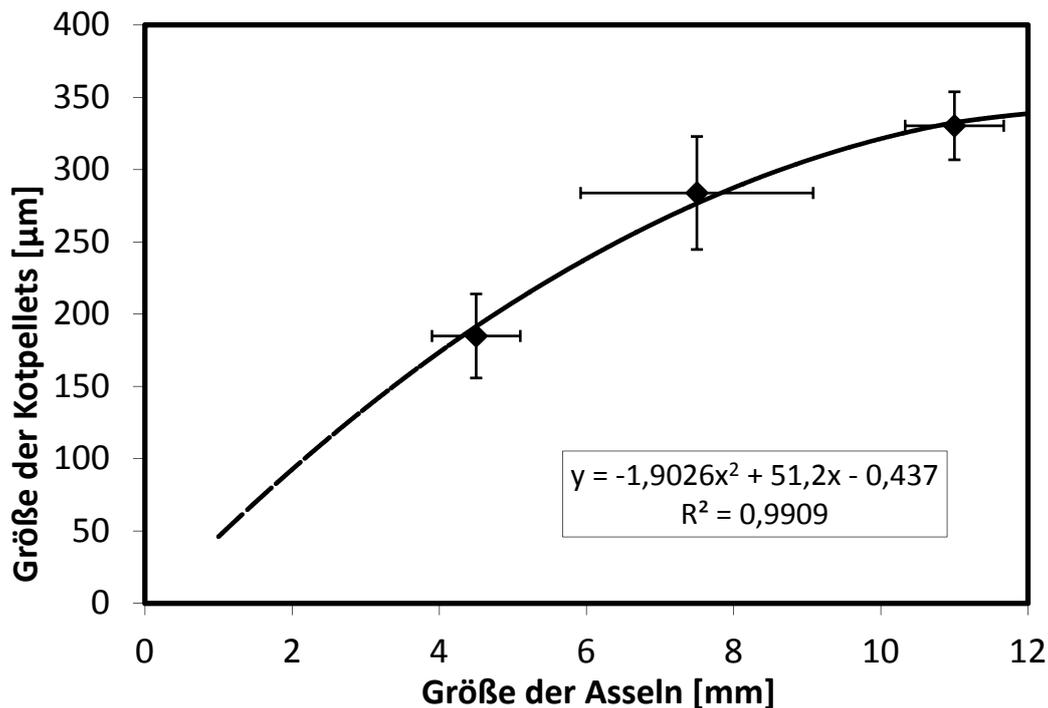


Abb. 7. Korrelation zwischen der Größe von *Asellus aquaticus* und der Größe der ausgeschiedenen Pellets, angegeben sind die Standardabweichungen für die Größe der Wasserasseln (horizontale Linien) und der Kotpellets (vertikale Linien).

Hohe Austragsraten bei den Netzuntersuchungen am Hydranten waren nur in Kombination mit dem CO<sub>2</sub> Spülverfahren zu erreichen, unter diesen Bedingungen wurden ca. 95 % der Wasserasseln ausgetragen und konnten auf dem 100 µm Filter des Probenahme- und Messsystems nachgewiesen werden wie Vergleichsuntersuchungen mit einer kompletten CO<sub>2</sub> Spülung eines Streckenabschnittes zeigten. Eine mögliche Korrelation zwischen Vorbehandlung des gespülten Rohrabschnitts und Effizienz des Austrags an Makroinvertebraten konnte beobachtet werden (Michels et al., 2013).

Im Gegensatz dazu wird Asselkot bereits mit konventionellen Wasserspülungen nahezu quantitativ ausgetragen und es wurden mittlere Asselkot-Austragsraten von 94 % mit dem Probenahme- und Messsystem erreicht. Verlässliche Aussagen über einen Befall mit Wasserasseln können somit bei einer Untersuchung am Hydranten über den Asselkot erfolgen in Verbindung mit einer Wasserspülung und Abtrennung über ein 2-stufiges Filtersystem, ein quantitativer Austrag der Wasserasseln bei einer Hydratenspülung ist durch Anwendung des CO<sub>2</sub>-Spülverfahrens möglich (Gunkel & Scheideler, 2011).

Die Beziehung zwischen den ausgetragenen Kotpellets und der Anzahl der Wasserasseln in Trinkwasserversorgungssystemen ist in Abb. 8 dargestellt, es besteht

eine lineare Abhängigkeit von der Wasserassellanzahl und der Anzahl der abgelagerten Kotpellets, so dass Asselkot als Maß für die Besiedlung dienen kann. Die lange Haltbarkeit und die geringe Verfrachtung (s. Kap. 3.4) sind hierfür wichtige Voraussetzungen.

Der dargestellte Zusammenhang zwischen der Breite der Asselkotpellets und der Größe von *Asellus aquaticus* ermöglicht die Charakterisierung der Population in einem Rohrabschnitt.

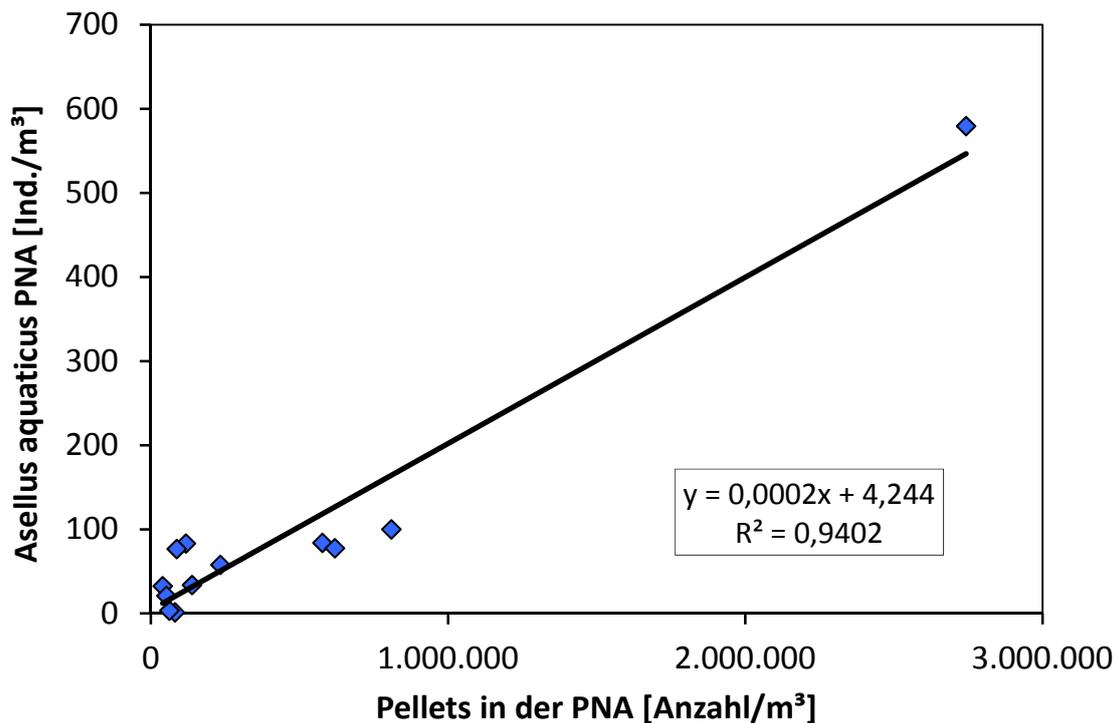


Abb. 8. Korrelation zwischen der Menge der ausgetragenen Asselkotpellets (Erfassung mit dem Probenahme- und Messsystem) und der Menge an *Asellus aquaticus* in Trinkwasserversorgungssystemen; der Gesamtaustrag von *Asellus aquaticus* wurde mit wiederholten CO<sub>2</sub>-Spülungen bestimmt. Die Pelletzahlen basieren nur aus dem Austrag des ersten Rohrinhalt bei der Hydrantenspülung.

### 3.6. Anwendung des Indikationsverfahrens 'Asselkot' zur Beschreibung des Vorkommens von Wasserasseln

Die Population von Wasserasseln in Rohrnetzen kann durch die Auswertung von Asselkot-Größenverteilungen zuverlässig charakterisiert werden; anhand von zwei Beispielen aus realen Trinkwasserverteilungssystemen wird dies im Folgenden dargestellt.

### 3.6.1. Norddeutsche Kleinstadt

Eine Untersuchung für die Anwendung von Asselkot als Indikator für die Besiedlung von Trinkwasser-Versorgungssystemen ist in einer norddeutschen Kleinstadt mit ca. 11.000 Einwohnern durchgeführt worden. Das Rohrnetz weist eine Nord-Süd-Ausdehnung von ca. 4 km und eine West-Ost-Ausdehnung von ca. 3 km auf. Die Einspeisung des Trinkwassers erfolgt durch ein relativ zentral gelegenes Grundwasserwerk. Ein signifikanter Befall mit *Asellus aquaticus* führte im Jahre 2009 zu umfangreichen Spülmaßnahmen mit dem neuartigen CO<sub>2</sub>-Spülverfahren.

Das Vorkommen der Wasserasseln wurde durch Vermessen der ausgespülten Tiere erfasst und quantifiziert. Das Minimum der jüngeren Kohorte liegt bei 1 mm Körperlänge, während das Maximum der älteren Kohorte bei 6 mm Körperlänge liegt (Abb. 9A). Auf Grundlage des eruierten Zusammenhangs zwischen der Größe von *Asellus aquaticus* und Breite der ausgeschiedenen Pellets wurde aus dem ausgetragenen Asselkot eine theoretische Größenverteilung der Wasserasseln berechnet (Abb. 9B). Die berechnete Größenverteilung stimmt gut mit den realen Werten überein. Lediglich die Kohorte mit 1 mm Körperlänge und das leicht verschobene Maximum von 6 – 6,5 auf 5 – 5,5 mm korrespondieren nicht vollständig mit der direkten Vermessung der Tiere. Als Ursache hierfür ist die Maschenweite des verwendeten Filters zu nennen, diese betrug nur 100 µm. Dadurch werden Partikel <100 µm nur unvollständig erfasst, was zu einem Minderbefund bei Tieren mit einer Körperlänge von 1 – 2 mm führt und in der Folge durch die zweistufige Filtereinheit in dem entwickelten Probenahme- und Messsystem berücksichtigt wurde.

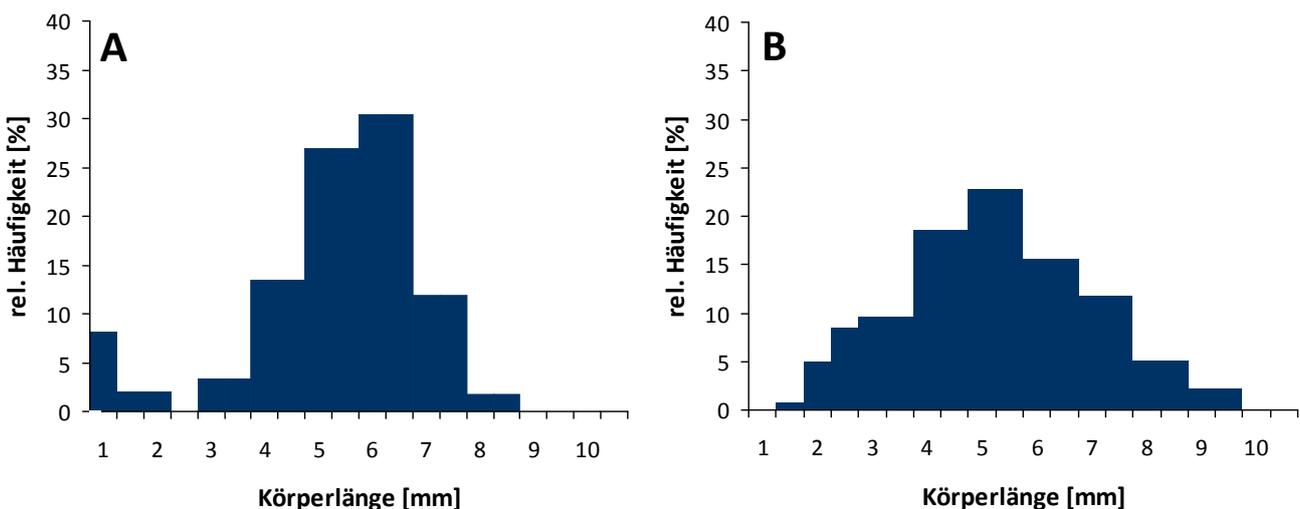


Abb. 9. Häufigkeitsverteilungskurven einer im Sommer 2009 beprobten Spülstrecke einer norddeutschen Kleinstadt. (A) Häufigkeitsverteilung der ausgetragenen Wasserasseln; (B) Häufigkeitsverteilung der über Asselkot berechneten Größe der ausgetragenen Wasserasseln.

### 3.6.2. Hausfilter in der TU Berlin

Ziel der Hausfilterbeprobungen war die Charakterisierung der Populationsdynamik von den in den Trinkwasserleitungen des Gebäudekomplexes KF Technikum der TU Berlin lebenden Wasserasseln über einen Zeitraum von einem Jahr.

In Abb. 10 sind die Größenverteilungen der beprobten Hausfilter für den Zeitraum März bis September dargestellt. Analog zu den Freilandbedingungen sind bei der Beprobung im März nur wenige Jungtiere beobachtet worden. Im Mai tritt dann, neben einer Kohorte älterer Tiere, eine Kohorte mit Jungtieren auf, die in den folgenden Monaten zu adulten Tieren heranwachsen. Die zweite Reproduktionsphase tritt im September/Oktober auf. In den Wintermonaten sind hauptsächlich adulte Tiere festzustellen. Insgesamt lässt sich die Populationsdynamik von im Rohrnetz lebenden Wasserasseln gut mit dem Asselkot als Parameter beschreiben. Da die

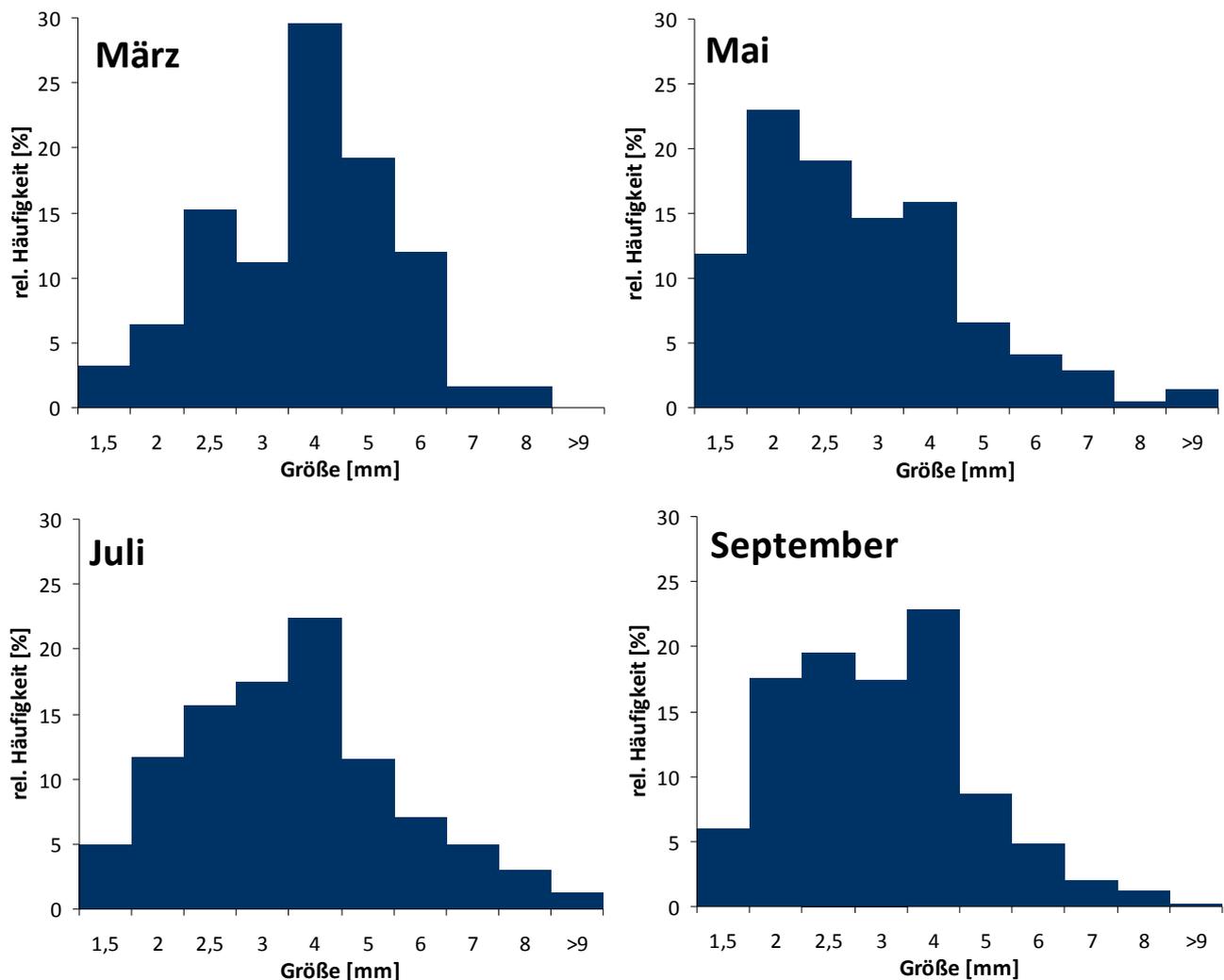


Abb. 10. Häufigkeitsverteilungskurven von kontinuierlich betriebenen Hausfiltern an der TU Berlin. Die Berechnung der Größenverteilungen erfolgte ausschließlich über den ausgetragenen Asselkot.

Größenverteilungen mit Hilfe der Größe-Breite-Korrelation berechnet wurden, ist eine Aussage über z. B. eiertragende Weibchen und damit das Reproduktionspotential der Population natürlich nicht möglich. Hierfür müssen ergänzende Rohrnetzspülungen durchgeführt werden.

### 3.7. Erfassung, Charakterisierung und Bewertung partikulärer Ablagerungen

Die fotografische Dokumentation der Spülproben ist ein fester Bestandteil der mikroskopischen Analyse, die neben der Bestimmung von Mikro- und Makroinvertebraten auch die Erfassung von Asselkotpellets beinhaltet. Ziel ist die Visualisierung wichtiger Bestandteile wie Organismen, anorganische Partikel, Kotpellets sowie deren Mengenverhältnisse gekoppelt mit einer digitalen Archivierung. Die digitale Archivierung ermöglicht den Wasserversorgern, auch über mehrere Spülmaßnahmen hinweg, eine schnelle und vergleichbare, optische Begutachtung der gespülten Leitungsabschnitte. Zugleich ist die fotografische Dokumentation ein zentrales Element für die Kontrolle und den Nachweis der Effektivität von Spülungen durch den Wassernetzbetreiber.

Die Abb. 11 und 12 zeigen die unterschiedliche Zusammensetzung der 100 µm und der 25 µm Fraktion aus Trinkwasserverteilungssystem-Spülungen unter Verwendung des entwickelten Probenahme- und Messsystems. In der 100 µm Fraktion sind zumeist Asselkotpellets zu erkennen, während in der 25 µm Fraktion der Feinanteil des Mulms dominiert. Auffälligkeiten wie beispielsweise das vermehrte Vorkommen von Organismen in Probe 12C sind erkennbar. Bei Wiederholungsspülungen bzw. Kontrollspülungen können so sofort Veränderungen festgestellt werden.



Abb. 11. Lichtmikroskopische Aufnahme von charakteristischen partikulären Ablagerungen des Filterrückstands einer Spülung, erkennbar sind Asselkot, gealterter Asselkot (gerundet) und Eiseninkrustierungen (links unten).

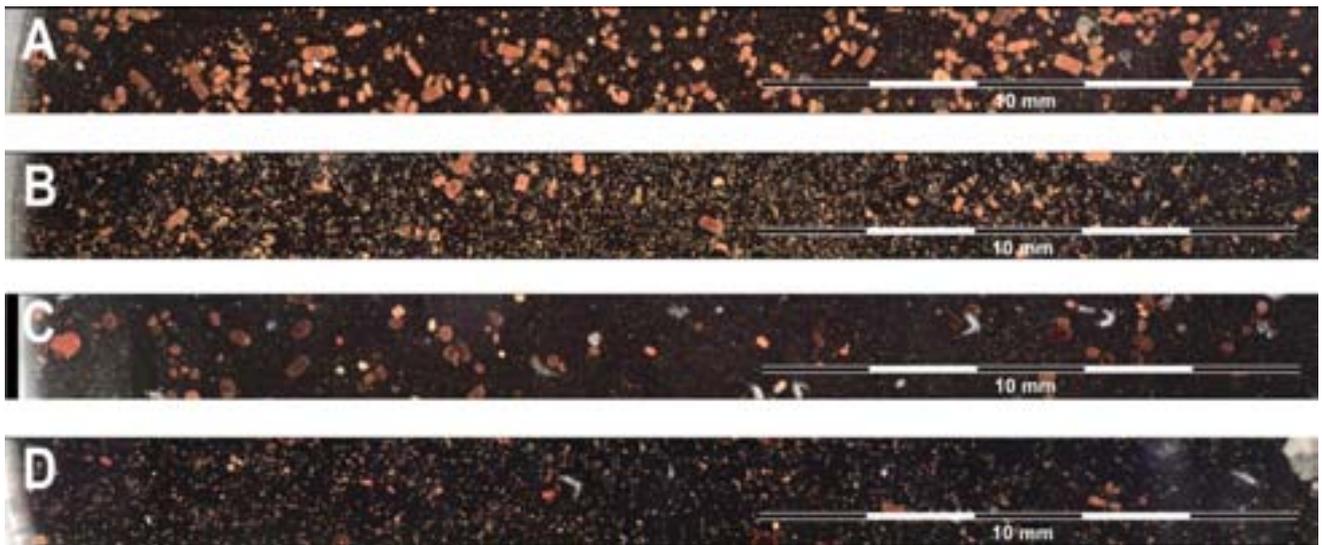


Abb. 12. Fotografische Dokumentation (35-fache Vergrößerung) von ausgewählten Spülproben. A und B: Verdünnungsfaktor 1:100, A = 100  $\mu\text{m}$  Filter, B = 25  $\mu\text{m}$  Filter  
C und D: Verdünnungsfaktor 1:10, C = 100  $\mu\text{m}$  Filter, D = 25  $\mu\text{m}$  Filter.

#### 4. Diskussion

Im Gegensatz zu zahlreichen Arbeiten, die sich mit der Populationsökologie von *Asellus aquaticus* im Freiland beschäftigt haben (Chambers, 1077; Adcock, 1979), gibt es zur Lebensweise der Tiere in Trinkwasserverteilungssystemen bisher kaum Angaben. So treten in den gemäßigten Breiten nördlich der Alpen zwei Generationen pro Jahr (Frühling und Spätsommer) auf. Die Fortpflanzung im Frühjahr wird dabei durch Wassertemperaturen von mehr als 7 °C induziert. Aufgrund der niedrigen Wassertemperaturen kommt es im Winter zu einer reproduktiven Diapause. In Trinkwasserleitungsnetzen treten die saisonalen Einflüsse nur in abgeschwächter Form auf. Insbesondere die gleichmäßigen Wassertemperaturen von mehr als 10 °C können zu einer ganzjährigen Vermehrung von *Asellus aquaticus* führen.

Wasserasseln stellen schwer nachweisbare Besiedler von Trinkwasserversorgungssystemen dar, da sie über einen ausgeprägten Festhaltereflex verfügen. Ein Austrag kann über das entwickelte CO<sub>2</sub> Spülverfahren erfolgen, hierbei werden Austragswerte von 95 % und mehr regelmäßig erreicht. Andere Spülverfahren (Luft/Wasser, Impulsspülverfahren) vermögen auch einen Teil der Wasserasseln austragen, ohne dass jedoch eine Kontrolle und Dokumentation des Spülerfolges möglich ist, im wesentlichen, da eine schonende Abtrennung der ausgespülten Partikel an einem nachgeschalteten Filter nicht möglich ist, wie dies bei dem CO<sub>2</sub> Spülverfahren erfolgt. Somit bekommt die Beprobung von Trinkwasserversorgungssystemen am Hydranten eine große Bedeutung, da es erst durch dieses

Verfahren möglich wird, kontaminierte Netzbereiche zu erkennen und die Höhe der Belastung mit Invertebraten zu ermitteln.

Das entwickelte Probenahme- und Messsystem ermöglicht es auch, Rohrnetzspülungen begleitend zu bewerten, d. h. festzustellen, ob die durchgeführten Rohrnetzspülungen den erhofften Austrag von Wasserasseln erbracht haben. Im Sinne eines Screening kann bei diesen Untersuchungen am Hydranten der Asselkot als Indikator verwendet werden und neben dem Vorkommen und der Besiedlungsdichte der Wasserasseln auch Informationen über deren Größenverteilung liefern. Der Aufwand des Verfahrens ist vergleichsweise gering. Mit der mikroskopischen Analyse und der quantitativen fotografischen Dokumentation der Netzablagerungen steht ein Verfahren zur Verfügung, das den Netzbetreibern die notwendigen Daten für die Netzpflege liefert und im Konfliktfall auch nachweist.

Aufgrund der vergleichsweise geringen Datendichte weist das hier dargestellte Verfahren noch eine signifikante Streuung auf, zur Präzisierung sollten weitere Rohrnetzspülungen durchgeführt werden. Diese sollten in Kombination mit dem CO<sub>2</sub>-Spülverfahren erfolgen, da ein quantitativer Austrag von *Asellus aquaticus* mit konventionellen Rohrnetzspülungen nicht gewährleistet ist. Anhand der hier dargestellten Ergebnisse lässt sich jedoch prognostizieren, dass, nach erfolgter Absicherung durch weitere Rohrnetzspülungen, Asselkot als Parameter zur Bestimmung von Populationsgröße und -dynamik herangezogen werden kann. Die zuverlässige und schonende Abtrennung der Pellets kann mit dem neuartigen Probenahme- und Messsystem durchgeführt werden.

Eine weitergehende Beurteilung der Besiedlung der Trinkwasserversorgungssysteme ist durch die Kombination der beiden Verfahren, der Probenahme am Hydranten und mit dem 2-stufigen NDHD Filtersystem und der Spülung mit CO<sub>2</sub> Wasser möglich. Hierbei erfolgt der Austrag der Wasserasseln direkt, ohne dass es notwendig wird, aus dem Asselkot die Besiedlung mit Wasserasseln abzuleiten. Dieses Verfahren ist z. Zt. noch aufwendiger, bietet sich aber z. B. in Kombination mit dem CO<sub>2</sub> Spülverfahren an.

## 5. Zusammenfassung

Wasserasseln (*Asellus aquaticus*) stellen zusammen mit anderen wirbellosen Kleinstorganismen (Invertebraten) häufige Bewohner unserer Trinkwasserversorgungssysteme dar; hierbei kommt den Wasserasseln eine Indikatorfunktion aufgrund ihrer Größe und leichten Erkennbarkeit zu.

Der Nachweis von Invertebraten, insbesondere der Wasserasseln, in Trinkwasserversorgungssystemen ist erschwert, da Wasserasseln sich an der Rohrwandung festklammern, und wieviele andere Invertebraten empfindliche Formen darstellen, die bei der Abtrennung am konventionellen Filter zerstört werden.

Es wurde ein 2-stufiges Niederdruck-Hochdurchsatz-Filtersystem entwickelt, das es erlaubt, am Hydranten Rohrnetzproben zerstörungsfrei zu entnehmen. Der Austrag und Nachweis der Invertebraten und von Asselkotpellets ist nahezu quantitativ; Wasserasseln können aber nur in Verbindung mit einer CO<sub>2</sub> Spülung am Hydranten quantitativ nachgewiesen werden.

Asselkot eignet sich als Indikator für Wasserasseln in Trinkwasserversorgungssystemen, da er langfristig stabil ist (> 6 Wochen) und unter den normalen Betriebsbedingungen nur gering im Trinkwassernetz verfrachtet wird; die Größe des Asselkots ist signifikant mit der Größe der Wasserasseln korreliert.

Bei Untersuchungen in einer norddeutschen Kleinstadt konnte gezeigt werden, dass aus den Größenverteilungen des Asselkots die Größe der im Trinkwasserversorgungssystem enthaltenen Wasserasseln errechnet werden kann.

An Hausfiltern der TU Berlin konnte die Entwicklung der Wasserasseln im Trinkwasserrohrnetz bezüglich Größe und Vermehrung mit zwei Zyklen pro Jahr gezeigt werden.

## Referenzen

- Adcock, J. A. (1979) Energetics of a population of the isopod *Asellus aquaticus*: Life history and production. *Freshwater Biology* 9, 343-355.
- Chambers, M. R. (1077) A comparison of the population ecology of *Asellus aquaticus* (L.) and *Asellus meridianus* RAC. In the reed beds of the Tjeukemeer. *Hydrobiol.* 53, 2, 147-154.
- Christensen, S. C. B., Arvin, E., Nissen, E. & Albrechtsen, H.-J. (2013) *Asellus aquaticus* as a potential carrier of *Escherichia coli* and other coliform bacteria into drinking water distribution systems. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 10, 845-855.
- Christensen, S. C. B., Nissen, E. & Albrechtsen, H.-J. (2011) Distribution of *Asellus aquaticus* in non-chlorinated drinking water supply system – effects of pipe material and sedimentation. *Wat. Res.* 45, 3215-3224.
- DIN 2000 (2000) Zentrale Trinkwasserversorgung - Leitsätze für Anforderungen an Trinkwasser, Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung der Versorgungsanlagen. Technische Regel des DVGW, Beuth Verlag, Berlin.
- DVGW (2010) Tierische Organismen in Wasserversorgungsanlagen. DVGW Regelwerk W 271. DVGW Bonn, 45 S.
- Evins, C. (2004) Safe piped water. Chap. 6. Small animals in drinking-water distribution systems. IWA Publ. 101-120.
- Graça, M. A. S., Maltby, L. & Calow, P. (1994) Comparative ecology of *Gammarus pulex* (L.) and *Asellus aquaticus* (L.) II: fungal preferences. *Hydrobiologia* 281, 163-170.
- Gunkel, G. & Scheideler, M. (2011) Wasserasseln in Trinkwasser-Verteilungssystemen - Eintrag, Vorkommen Bewertung und Bekämpfung der Wasserasseln. *gwf –Wasser | Abwasser* 152, 308-388.

Michels, U. (2008): Die Wasserassel (*Asellus aquaticus*) in Wasserversorgungsanlagen. AquaLytis, Königs-Wusterhausen. [www.s200380463.online.de/cms.media/downloads/Studie\\_Wasserassel\\_neu.pdf](http://www.s200380463.online.de/cms.media/downloads/Studie_Wasserassel_neu.pdf).

Michels, U., Polak, J., Scheideler, M. & Gunkel, G. (2013) Repräsentative Beprobung von Trinkwassersystemen. In: Michels, U., Gunkel, G., Scheideler, M. & Ripl, K. (Hrsg) Invertebraten im Trinkwasser – Probenahme, Analytik und Bewertung. Universitätsverlag der TU Berlin, ISBN 978-3-7983-2575-3 (online), 48 -62.

TrinkwV (2003) Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch. BGBl I 2001, 959, Änderung durch Art. 263 V v. 25.11.2003, I 2304.

UBA (2004) Stellungnahme der Trinkwasserkommission zum Vorkommen von Oligochaeten und anderen Kleintieren in Wasserversorgungsanlagen. Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz 3, 302.

van Lieverloo, J. H. M., Bosboom, D. W., Bakker, G. L., Brouwer, A. J., Voogt, R. & Roos, De J. E. M. (2004) Sampling and quantifying invertebrates from drinking water distribution mains. Wat. Res. 38, 1101 – 1112.

van Lieverloo, J. H. M., Hoogenboezem, W., Veenendaal, G. & van der Kooij, D. (2012) Variability of invertebrate abundance in drinking water distribution systems in the Netherlands in relation to biostability and sediment volumes. Wat. Res. 46, 4918-4932.

WHO (2004) Guideline for Drinking Water Quality. 3. ed. World Health Organisation, Geneva.

## **Danksagung**

Die Untersuchungen wurden dankenswerterweise durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie im Programmbereich AiF-ZIM gefördert. Unser ganz besonderer Dank gilt den nicht genannten Wasserversorgern, die Spülungen in ihren Netzen erlaubt haben, ohne diese Kooperationen wären die Forschungen nicht möglich gewesen. Unser Dank gilt auch Herrn B. Eng. Simon C. M. Zander für die Mitarbeit in dem Projekt und Herrn Dipl. Ing. Ulrich Gernert, Zentraleinrichtung Elektronenmikroskopie der TU Berlin, für die Unterstützung bei der Analytik.

## **Kontaktadresse**

Priv.Doz. Dr. Günter Gunkel,  
Technische Universität Berlin, Wasserreinigung, Sekr. KF 4, Strasse des 17. Juni  
135, 10623 Berlin.  
Fon: ++49 30 314 25847, Fax: ++49 30 314 23850,  
e-mail: [guenter.gunkel@tu-berlin.de](mailto:guenter.gunkel@tu-berlin.de)

## Multimetrischer Bewertungsindex für Invertebraten in Trinkwasserverteilungssystemen

Ute Michels<sup>1</sup> & Günter Gunkel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>AquaLytis, <sup>2</sup>Technische Universität Berlin

**Abstract:** Small invertebrate became more important for water distribution mains since few years, but until now there are low standard methods for sampling and analyzing these animals in drinking water distribution systems. Within an interdisciplinary research project of the Berlin University of Technology, the Technical University of Dresden and the companies Aqualytis and Scheideler Verfahrenstechnik a sampling and analyzing system has been developed, which enable a gentle and quantitative separation of water louses, their feces and of other invertebrates using flushing of a water hydrant. A further aim of the project was the development and the implementation of an assessment system (evaluation system) based on invertebrates living in water distribution mains. The evaluation system enables a classification of analytical results in a well-defined data-base. The system is composed of modules, which assess different aspects of invertebrates in pipeline systems such as aesthetics of drinking water, risk of microbial pollution and biomass of all invertebrate animals. The results of the modules are integrated into a final assessment result, a Multimetric Index.

**Schlüsselwörter:** Trinkwasserverteilungssystem, Invertebraten, Bewertung, Multimetrischer Index, Wasserassel, *Asellus aquaticus*

### 1. Ausgangspunkt und Zielstellung

Das Auftreten von Bewohnern der Trinkwasserversorgungssysteme aus der Gruppe der Invertebraten (wirbellose Kleinstlebewesen) steht in enger Verbindung mit dem wandseitigen Bewuchs, dem Biofilm, und dass diese sowohl zu ästhetischen als auch hygienischen Beeinträchtigungen der Trinkwasserqualität führen: die Rohrnetzbewohner sollten daher Gegenstand regelmäßiger Untersuchungen sein. Mit den in Rohrleitungssystemen erhobenen Daten zum Vorkommen von Invertebraten müssen i. d. R. Aussagen zum IST-Zustand, zu möglichen Auswirkungen und zur Notwendigkeit/Dringlichkeit von Maßnahmen zur Reduzierung des Vorkommens der Invertebraten getroffen werden. Vergleichbare Aussagen erfordern neben standardisierten Bedingungen für die Probeentnahme und Analyse auch standardisierte Verfahren zur Bewertung der Ergebnisse.

„Aus gesetzlicher Sicht ist der Gehalt des Trinkwassers an Invertebraten nicht direkt geregelt.“ Der Passus in der EG-Trinkwasserrichtlinie von 1980, nachdem im Trinkwasser keine geformten Elemente (Algen, Parasiten und "Animalcula") enthalten sein dürfen, wurde bei Neufassung der Richtlinie gestrichen und durch einen Hinweis auf die humanpathogene Protozoengattung *Cryptosporidium* ersetzt. Eine ähnlich lautende Formulierung der DIN 2000 (2000) in der Fassung von 1973 „Mit bloßem Auge sichtbaren Organismen, Tier- und Pflanzenreste [...] dürfen im Trinkwasser nicht enthalten sein“ wurde im Zuge der Neufassung der Norm gestrichen (Schreiber & Westphal, 2002 in Höll & Grohmann, 2002; Borchers 2013). Im Technischen Regelwerk W 271 (DVGW, 1997) wird auf zwei qualitätsrelevante Aspekte infolge des gehäuften Auftretens von Invertebraten verwiesen, die unerwünschte Bakterienvermehrung und die Zehrung von Desinfektionsmitteln. Das Umweltbundesamt weist in einer Stellungnahme darauf hin, dass ein „gehäuftes Auftreten [...] als Hinweis auf ein verstärktes Wiederverkeimungspotential zu bewerten ist.“ (UBA, 2004).

Im Gegensatz zu Schadstoffen oder pathogenen Keimen wurde für das Vorkommen von wirbellosen Tieren im Trinkwasser bislang kein akutes hygienisches Risiko nachgewiesen, dementsprechend beinhalten die gesetzlichen Regelungen zur Trinkwasserqualität keine Grenz-, Schwellen-, oder Richtwerte (Borchers, 2013). Die für Trinkwassersysteme als „Fremdorganismen“ (DVGW, 1997) bezeichneten wirbellosen Tiere sind jedoch „aus allgemeinhygienischer Sicht unerwünscht“ und können zur „unerwünschten Bakterienvermehrung“ (DVGW, 1997) beitragen. Die WHO (2004) erklärt „das Vorkommen von Tieren im Trinkwasser ... sollte kontrolliert werden“, es ist „überwiegend ein Problem, wo Rohwasser geringer Qualität gewonnen wird und über Schnellfiltertechniken aufbereitet wird“, ergänzend wird mitgeteilt „das Vorkommen kann die mikrobiologische Qualität des Wassers beeinträchtigen“ (Colins, 2004).

Aktuelle Untersuchungen aus Dänemark zeigen in Laborexperimenten, dass lebende *Asellus aquaticus* als Träger pathogener Mikroorganismen fungieren können ("Carrier"; Christensen et al., 2012, 2013). Auf Grund ihrer Mobilität in Trinkwasserverteilungssystemen können die Tiere so zu einer Verbreitung pathogener Keime führen; die Anwesenheit von *Asellus aquaticus* fördert jedoch nicht deren Überleben bzw. deren Vermehrung. Gleichwohl kann das Vorkommen von abgestorbenen Tieren und Asselkot die allgemeine mikrobiologische Qualität des Trinkwassers beeinflussen (Christensen et al., 2012, 2013; van Lieverloo et al., 2012), und es wurde eine signifikante Überschreitung der Grenzwerte unter Stagnationsbedingungen an Hausfiltern festgestellt (Gunkel et al., 2010).

Auf Grund des derzeitigen Fehlens von belastbaren Aussagen und Untersuchungen über die indirekte hygienische Relevanz wirbelloser Tiere in Trinkwassersystemen (z. B. über das Risiko einer Wiederverkeimung, die Verringerung der Effektivität der

Nachchlorung) ist keine absolute Bewertung im Sinne von Grenzwertüber- oder -unterschreitungen möglich.

Mit Hilfe eines Bewertungssystems wird jedoch eine vergleichende Einordnung erhobener Daten in eine definierte Datengrundlage mit daraus resultierenden Handlungsempfehlungen möglich. Im Gegensatz zu einer Risikobewertung (z. B. einer konzentrationsabhängigen Bewertung gesundheitlicher Risiken von chemischen Wasserinhaltsstoffen – als Grundlage für die Trinkwasserverordnung) geht es hier zunächst um eine Einordnung von Daten in eine definierte Datengrundlage zum Vorkommen der Invertebraten und um eine Betrachtung der Ergebnisse unter den Aspekten der Anzahl, der Biomasse, der Vermehrungsrate und der Funktion in der Gesellschaft der Rohrnetzbewohner.

## **2. Material and Methoden**

### **2.1. Datengrundlage**

Die zur Verfügung stehende Datengrundlage besteht aktuell aus 550 Datensätzen, d. h. Analysen von Proben aus Trinkwasserverteilungssystemen, die mittels Filtrierapparaturen gewonnen wurden. Die Anzahl der mit dem neu entwickelten Probeentnahmesystem (NDHD-S2, s.a. Scheideler et al. 2013) verfügbaren Daten konnten nicht für jedes Bewertungskriterium die notwendige statistische Sicherheit gewährleisten, so dass es erforderlich war, Daten aus früheren Untersuchungen einzubeziehen. Mit Hilfe statistischer Verfahren wurde vorab geprüft, ob die jeweils vorliegenden Analysen zu einer Grundgesamtheit zusammen geführt werden konnten oder nicht. Im Falle statistisch signifikanter Unterschiede zwischen den Datenreihen wurde auf eine Zusammenführung verzichtet; in diesen Fällen wurde für jede Datengrundlage eine spezifische Bewertungsmatrix erarbeitet. Die zur Verfügung stehende Datengrundlage besteht aktuell aus 35 bis 550 Datensätzen, in Abhängigkeit von der gewünschten Aussage bzw. des jeweiligen Bewertungskriteriums.

### **2.2. Auswahl und Testung einzelner Bewertungskriterien**

In einem ersten Schritt wurde geprüft, welche Detailinformationen (Aspekte) aus den erhobenen Daten gewonnen werden können und welche Informationen für Wasserversorger und Nutzer des Trinkwassers erforderlich bzw. relevant sind. Die folgende Übersicht enthält eine Zusammenstellung relevanter Themen bzw. Fragestellungen, die im Rahmen eines Bewertungssystems beschrieben bzw. beantwortet werden können (Tabelle 1).

In der Tabelle 2 sind wichtige, bezüglich Ihrer Relevanz für die oben benannten Fragestellungen und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit geprüften Bewertungskriterien zusammengestellt.

Tabelle 1. Für die wasserwirtschaftliche Praxis relevanter Informationsgehalt biologischer Daten aus Rohrleitungssystemen.

<b>Thema / Fragestellung</b>	<b>Relevanz</b>
Arten der Besiedlung	Ästhetik der Trinkwassers
Ausmaß (Quantität) der Besiedelung eines Rohrleitungsabschnittes mit Invertebraten	Bewertung der Trinkwasserqualität Entscheidung über Art und Dringlichkeit von Maßnahmen
Risiken der Besiedelung mit Invertebraten:	Risiko einer (Wieder)verkeimung Ästhetische Beurteilung des Trinkwassers Entscheidung über Art und Dringlichkeit von Maßnahmen
Herkunft der Invertebraten	Entscheidung über Art von Maßnahmen
Art- und Menge potentieller Nahrungsbestandteile in der Trinkwasserverteilung Eintrag in das Rohrnetz	Entscheidung über Art von Maßnahmen
Eigenschaften der vorhandenen Invertebraten	Entscheidung über Art von Maßnahmen

Tabelle 2. Mögliche Bewertungskriterien für biologische Daten aus Trinkwasserverteilungssystemen.

<b>Bewertungskriterium</b>	<b>Aussage / Bemerkungen</b>	<b>Relevanz</b>
Anzahl vorhandener Arten bzw. Tiergruppen		Ausmaß (Quantität) der Besiedelung
Individuendichte	Anzahl an Invertebraten pro Volumeneinheit	Ausmaß (Quantität) der Besiedelung
Biomasse	Masse an Invertebraten	Ausmaß (Quantität) der Besiedelung
Anzahl und Biomasse an Makroorganismen	Dichte / Masse an Makroorganismen je Volumeneinheit	Risiken der Besiedelung (Ästhetik)
Durchschnittliche Größe der Individuen bzw. der Makroorganismen	Größenverteilung; Stellung im Nahrungsnetz	Risiken der Besiedelung (Ästhetik)
Anzahl (mit bloßem Auge) sichtbarer Tiere	Vorhandensein großer, sichtbarer Tiere	Risiken der Besiedelung (Ästhetik)

<b>Bewertungskriterium</b>	<b>Aussage / Bemerkungen</b>	<b>Relevanz</b>
Anzahl Kotpellets	Dichte von Kotpellets je Volumeneinheit	Risiken der Besiedelung (Wiederverkeimung)
Masse Kotpellets	Masse von Kotpellets je Volumeneinheit	Risiken der Besiedelung (Wiederverkeimung)
Verhältnis Biomasse : Individuenzahl	mittlere Größenverteilung	-
Durchschnittliche Biomasse je Individuum einer Art	Größenverteilung	-
Anteile der verschiedenen Tiergruppen		Art- und Menge potentieller Nahrungsbestandteile
Anteil sog. "Weidegänger"	Anteil der Individuen, die bevorzugt Biofilme als Nahrungsgrundlage verwenden	Art- und Menge potentieller Nahrungsbestandteile
Anteil „Zerkleinerer“ Anteil "Allesfresser"	Anteil der Individuen, die bevorzugt partikuläre Ablagerungen als Nahrungsgrundlage verwenden	Art- und Menge potentieller Nahrungsbestandteile
Anteil epiphytisch und epilithisch lebender Individuen bzw. Taxa	Anteil der Individuen, die bevorzugt Biofilme als Nahrungsgrundlage verwenden	Art- und Menge potentieller Nahrungsbestandteile
Anteil "Mulmfauna"	Anteil der Individuen, die bevorzugt partikuläre Ablagerungen als Nahrungsgrundlage verwenden	Art- und Menge potentieller Nahrungsbestandteile
Anteil Oberflächenwassertiere	Anteil der Individuen, deren Lebensraum das Freiwasser der Oberflächengewässer ist	Herkunft der Invertebraten
Anteil Grundwassertiere	Anteil der Individuen, deren Lebensraum das Grundwasser ist	Herkunft der Invertebraten
Anteil Nematoden	Anteil von Nematoden an der Besiedelungsdichte	Risiken der Besiedelung (Ästhetik)
Durchschnittliche Größen bzw. Biomassen je Tiergruppe	Aussage über den Ernährungszustand der jeweiligen Tiergruppe	Art- und Menge potentieller Nahrungsbestandteile
Thigmotaxis der Lebensgemeinschaft	Grad des Festhaltevermögens / - reflexes der vorkommenden Tiere	Eigenschaften

Auf der Grundlage von Relevanz und Anwendbarkeit der einzelnen Bewertungskriterien wurde eine Auswahl von Parametern und Einzelkriterien in das Bewertungssystem integriert. Das sind derzeit Informationen

- zur Quantität des Vorkommens wirbelloser Tiere,
- zur ästhetischen Bewertung des Trinkwassers und
- zum Risiko einer Wiederverkeimung.

### **2.3. Bewertungsmethode**

Auf Grund der Vielzahl zu betrachtender Aspekte und der Möglichkeit eine Gesamtbewertung durchzuführen, wurde ein multimetrischer Bewertungsansatz gewählt. Multimetrische Bewertungsverfahren beschreiben eine Gemeinschaft (hier Invertebratengemeinschaft in Trinkwasserverteilungssystemen) unter verschiedenen Aspekten bzw. über verschiedene Attribute. Die Attribute sind jeweils skalierbar, so dass die Qualität / Quantität eines Attributes als Zahl wiedergegeben werden kann (Metric). Ein sog. Multimetrischer Index kombiniert mehrere Einzelmetric, deren Ergebnisse dann zu einem Gesamtindex aggregiert werden können. Mittlerweile gehören diese Indizes zu den allgemein gebräuchlichen Werkzeugen für die Bewertung bzw. Klassifizierung limnischer Ökosysteme bzw. Lebensgemeinschaften (siehe z. B. DIN CEN/TR 16151, 2011).

### **2.4. Skalierung der Bewertungskriterien**

Aus der Notwendigkeit heraus, ein relatives Bewertungssystem zu entwickeln, erfolgte die Skalierung der einzelnen Bewertungskriterien nicht über absolute Ankerpunkte sondern über Perzentile als (besondere) statistische Lagemaße. Im konkreten Fall wurden für eine 5-stufige Klassifizierung (3-stufig mit Zwischenstufen) die größegeordneten Daten für jedes Bewertungskriterium in 5 gleiche Abschnitte geteilt, die 20, 40, 60 und 80 % Perzentile.

Diese Perzentilwerte ergeben zugleich die jeweiligen Ober- bzw. Untergrenzen für eine Einordnung der zu bewertenden Daten (Tabelle 3).

## **3. Multimetrischer Bewertungsindex**

### **3.1. Bewertungsmodule**

Mit dem hier vorliegenden modular aufgebauten Bewertungssystem wird der Bearbeiter nunmehr in die Lage versetzt, verschiedene Detailinformationen aus den jeweils aktuell erhobenen Daten zu extrahieren, und diese innerhalb von thematischen Modulen einzuordnen. Im vorliegenden Bewertungssystem entsprechen die unter 2.2 vorgestellten Aspekte einzelnen Modulen, in welchen über verschiedene

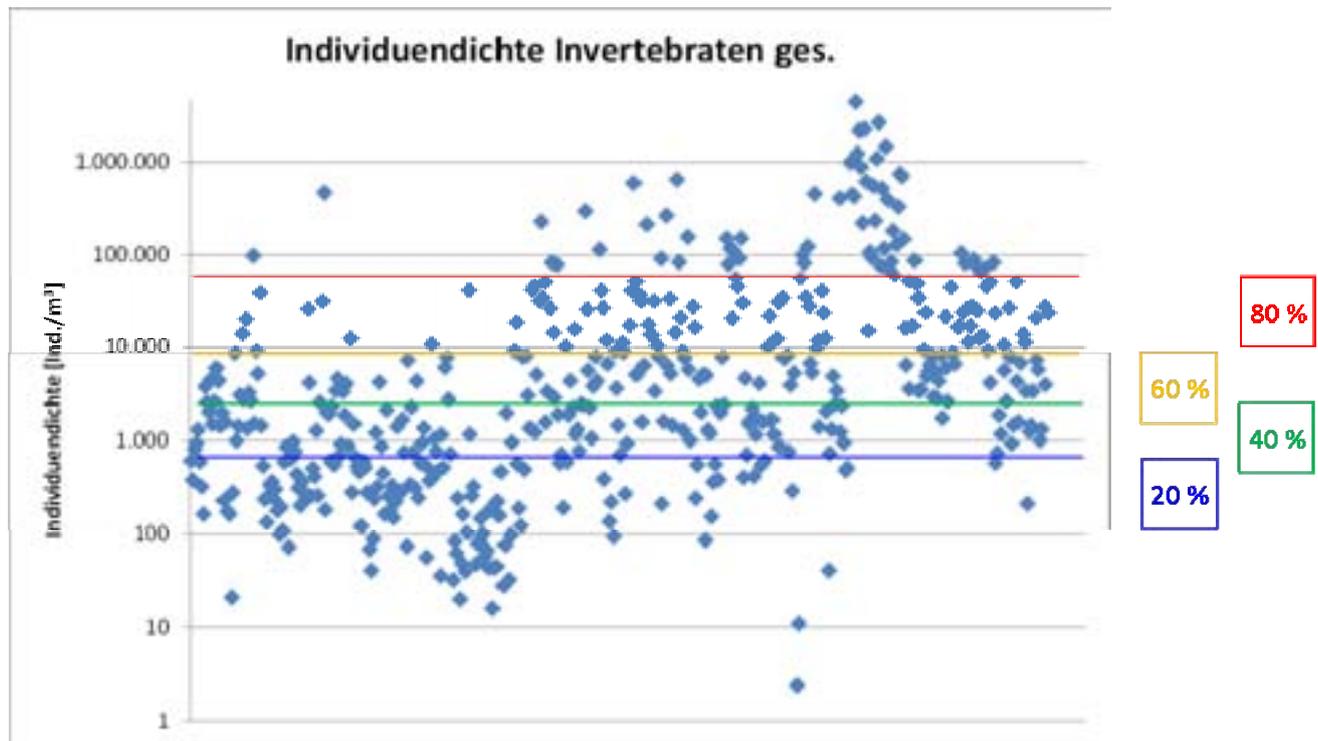


Abb. 1. Skalierung des Bewertungskriteriums “Individuendichte Invertebraten gesamt” über statistische Lagemaße (Perzentile). Datengrundlage: n = 480, Datenreihe: 55µm; logarithmische Darstellung der Individuendichten.

Tabelle 3. Ober- und Untergrenzen und Bewertung.

Index-ID	Einordnung	Index-Wert	verbale Bewertung
1	Wert <20 % Perzentil	1	wenig, gering, niedrig
2	Wert >= 20 % und < 40 % Perzentil	2	wenig bis durchschnittlich
3	Wert >= 40 % und < 60 % Perzentil	3	mäßig, durchschnittlich
4	Wert >= 60 % und < 80 % Perzentil	4	durchschnittlich bis hoch
5	Wert >80 % Perzentil	5	viel, hoch

Einzelindizes die gewünschten Informationen skalierbar gewonnen werden können. In einem ersten Schritt werden zunächst für jedes Modul die Einzelindizes ermittelt und zu einem Modul-Wert durch Mittelwertbildung verrechnet. Folgende Module und Einzelindizes werden berücksichtigt:

*a) Modul 1: Quantität / Diversität*

Beschreibung: Das Modul Quantität / Diversität beschreibt die Höhe der Besiedelung eines Rohrleitungsabschnittes mit wirbellosen Tieren. Hierbei wird sowohl der qualitative Aspekt (Anzahl vorhandener Tiergruppen und Einzeltaxa) als auch der quantitative Aspekt (Anzahl vorhandener Individuen, Biomasse) berücksichtigt.

Einzelindizes: Anzahl vorkommender Tiergruppen (Index Q1),  
Anzahl vorkommender Taxa (Index Q2),  
Individuendichte (Index Q3),  
Biomassekonzentration (Index Q4).

Skalierung: Je höher die Einzelindizes, umso mehr (dichter) ist der zu untersuchende Rohrleitungsabschnitt mit wirbellosen Tieren besiedelt.

Ermittlung des Modulwertes:

$$MW(Q) = \frac{IW(Q1)+IW(Q2)+IW(Q3)+IW(Q4)}{4} \quad (1)$$

MW(Q): Modulwert Quantität/Diversität

IW(Q1...4): Indexwerte Q1 bis Q4

*b) Modul 2: Ästhetische Bewertung*

Beschreibung: Das Modul beschreibt das Vorkommen von Makroorganismen, d. h. für das menschliche Auge ohne optische Hilfsmittel sichtbare wirbellose Tiere sowie das Vorhandensein von Kotpartikeln dieser Tiere.

Einzelindizes: Biomasse Makroorganismen (Index AE1),  
Biomasseanteil Makroorganismen (Index AE2),  
durchschnittliche Körpergröße der Makroorganismen (Index AE3),  
Anzahl sichtbarer Tiere (Tiere > 5mm) Index AE4),  
Anzahl sichtbarer Kotpellets (Indexierung in Vorbereitung).

Skalierung: Je höher die Einzelindizes umso höher ist das Risiko einer geringen ästhetischen Bewertung.

Ermittlung des Modulwertes:

$$MW(AE) = \frac{IW(AE1)+IW(AE2)+IW(AE3)+IW(AE4)}{4} \quad (2)$$

MW(AE): Modulwert Ästhetische Bewertung

IW(AE1...4): Indexwerte AE1 bis AE4

*c) Modul 3: Risiko einer Verkeimung*

Beschreibung: das Modul beschreibt das Risiko einer Wiederverkeimung des Trinkwassers auf der Grundlage der vorhandenen Biomasse, des darin vorhandenen

organischen Kohlenstoffs und der vorhandenen Konzentration sowie Masse an Kotpellets.

Einzelindizes: Biomasse gesamt (Index V1),  
Anzahl vorhandener Kotpellets (Index V2),  
Biomasse vorhandener Kotpellets (Index V3)

Skalierung: Je höher die Einzelindizes umso höher ist das Risiko einer Wiederverkeimung.

Ermittlung des Modulwertes:

$$MW(V) = \frac{IW(V1)+IW(V2)+IW(V3)}{3} \quad (3)$$

MW(V): Modulwert Verkeimung

IW(V1...4): Indexwerte V1 bis V4

### 3.2. Multimetrischer Index

Die Indizes der verschiedenen Module können nach einer Gewichtung der Modulwerte über einfache Mittelwertbildung zu einem multimetrischen Index verrechnet werden. Alternativ zur Mittelwertbildung ist auch eine Aggregation über einen worst case möglich. Die Gewichtung der Modulwerte erfolgt entsprechend ihrer derzeitigen Relevanz für Verbraucherbeschwerden infolge einer Besiedelung der Trinkwasserverteilung mit wirbellosen Tieren. In diesem Zusammenhang steht die optische Wahrnehmung von Tieren (ästhetische Bewertung) an erster Stelle gefolgt von der Gefahr einer Wiederverkeimung des Trinkwassers. Quantität und Diversität der tierischen Besiedelung spielen für Verbraucherbeschwerden eine untergeordnete Rolle. Die verwendeten Gewichtungsfaktoren sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4. Gewichtungsfaktoren für den Multimetrischen Index.

Modulwert	Gewichtung
Quantität/Diversität MW(Q)	0,8
Ästhetische Bewertung MW(AE)	1,2
Risiko einer Wiederverkeimung MW (V)	1,0

Dier Ermittlung des Multimetrischen Index (MMI) erfolgt entsprechend Gleichung 4,

$$MMI = \frac{(MW(Q)*0,8)+(MW(AE)*1,2)+(MW(V)*1,0)}{3} \quad (4)$$

Die Bewertung des Ergebnisses erfolgt entsprechend Tabelle 5.

Tabelle 5. Verbale Bewertung der Multimetrischen Indizes.

MMI	Bewertung
1,0-1,9	Sehr hohe biologische Trinkwasserqualität: sehr geringe bis geringe Nachweise wirbelloser Tiere, höchstens vereinzelt Makroinvertebraten vorhanden, wenige sichtbare Ablagerungen ohne oder mit sehr wenigen Kotpartikeln.
2,0-2,9	Hohe biologische Trinkwasserqualität: Wenig bis mäßig viele Nachweise wirbelloser Tiere, wenige gut sichtbare Makroinvertebraten vorhanden, geringe Mengen sichtbarer Ablagerungen mit wenigen Kotpellets.
3,0-3,9	Mäßige biologische Trinkwasserqualität: mittlere bis hohe Individuenzahlen aber nur durchschnittlich hohe Biomassen wirbelloser Tiere, durchschnittlich viele Makroorganismen, mäßig viele sichtbare Ablagerungen mit einem deutlich wahrnehmbaren Anteil an Kotpellets.
4,0-4,9	Geringe biologische Trinkwasserqualität: hohe bis sehr hohe Individuenzahlen und hohe Biomassen wirbelloser Tiere, viele Nachweise gut sichtbarer Makroorganismen, große Mengen sichtbarer Ablagerungen mit hohem Anteil an Kotpellets.
5,0-5,9	Sehr geringe biologische Trinkwasserqualität: sehr hohe Individuenzahlen und Biomassen wirbelloser Tiere, viele bis sehr viele Nachweise gut sichtbarer Makroinvertebraten, sehr viele sichtbare Ablagerungen mit einem sehr hohen Anteil an Kotpellets.

### 3.3. Anwendung des Multimetrischen Index

Am Beispiel einer Teststrecke wird im Folgenden das Bewertungsverfahren dargestellt. Die Untersuchungen erfolgten im Dezember 2012, die Probe wurde an einem Unterflurhydranten mittels der NDHD-S2 Probenahmeapparatur gewonnen (Maschenweiten der Filter 25µm und 100µm, parallele Filtration nach Stromteilung in 1:9; s. Scheideler et al. 2013). Auf der Grundlage der mikroskopischen Analyse ergeben sich folgende Indizes und Bewertungen (Tabelle 6).

Das Bewertungsbeispiel zeigt die Analyse eines Rohrleitungsabschnittes mit einem hohen qualitativen und quantitativen Vorkommen wirbelloser Tiere insgesamt und der damit verbundenen hohen Biomasse. Darüber hinaus wurde eine hohe Dichte von Kotpellets der Wasserassel (*Asellus aquaticus*) registriert. Daraus resultiert ein hohes Risiko einer Verkeimung des Rohrleitungsabschnittes und ein hoher Modulwert hinsichtlich Quantität und Diversität der Invertebratengemeinschaft. Demgegenüber ist ein nur geringer bis mäßiger Nachweis sichtbarer Organismen (>5 mm) und eine vergleichsweise geringe Größe der Makroorganismen festzustellen. Das damit

verbundene Risiko einer schlechten ästhetischen Bewertung ist somit nur gering bis mäßig. Die Problematik des Rohrleitungsabschnittes besteht somit vor allem im Risiko einer Verkeimung des Trinkwassers auf Grund der vorhandenen Biomasse und Kotpellets.

Tabelle 6. Bewertung einer Hydrantenuntersuchung mittels Multimetrischem Index.

Modul / Index	Wert	Einheit	Indexwert		Modulwert	
			numerisch	verbal	numerisch	verbal
<i>Quantität/Diversität</i>						
Anzahl der Tiergruppen	8	-	4	mäßig bis viel	4,8	viel
Anzahl der Taxa	17	-	5	viel		
Individuendichte Invertebraten ges.	2.654.779	Ind./m <sup>3</sup>	5	viel		
Biomasse Invertebraten ges.	36,2	mg/m <sup>3</sup>	5	viel		
<i>Ästhetische Bewertung (Risiko einer geringen ästhetischen Bewertung)</i>						
Biomasse der Makroorganismen	0,07	mg/m <sup>3</sup>	2	gering bis mäßig	2	gering bis mäßig
Biomasseanteil Makroorganismen	0,21	%	3	mäßig		
durchschnittliche Körpergröße der Makroorganismen	4,0	mm	1	gering		
Anzahl sichtbarer Tiere	1	Ind./m <sup>3</sup>	2	gering bis mäßig		
<i>Risiko einer Verkeimung</i>						
Biomasse	36,2	mg/m <sup>3</sup>	5	hoch	5	hoch
Anzahl vorhandener Kotpellets	809.104	Anzahl./m <sup>3</sup>	5	hoch		
Masse vorhandener Kotpellets	134	mg/m <sup>3</sup>	5	hoch		
<b>Multimetrischer Index</b>			<b>3,8</b>	<b>mäßige biologische Trinkwasserqualität</b>		

## 4. Ausblick

Mit dem vorliegenden Multimetrischen Index ist es nunmehr möglich, Ergebnisse aus Hydrantenuntersuchungen miteinander zu vergleichen und in eine größere Datenbasis einzuordnen. Darüber hinaus können verschiedene Detailinformationen zu den im Rohrleitungssystem aktuell vorhandenen wirbellosen Tieren gewonnen und beurteilt werden. Weitere Vorteile des Bewertungssystems liegen in der Stabilität der Bewertungsergebnisse und der Möglichkeit, das Bewertungssystem einer größeren Datengrundlage anzupassen und weiter zu entwickeln. In den nun folgenden Arbeitsschritten wird der Index getestet hinsichtlich

- seiner Anwendbarkeit in der wasserwirtschaftlichen Praxis,
- der Interpretierbarkeit seiner Ergebnisse und
- seiner Aussagefähigkeit zur Erfolgskontrolle bzw. als Monitoring-instrument.

Auf der Grundlage der dann vorliegenden Erfahrungen wird das System schließlich angepasst bzw. weiterentwickelt.

## 5. Zusammenfassung

Für den Betrieb von Trinkwasserverteilungssystemen gewinnt der Aspekt der biologischen Trinkwasserqualität immer mehr an Bedeutung. Insbesondere das Auftreten von wirbellosen Kleinstlebewesen kann sowohl zu ästhetischen als auch hygienischen Beeinträchtigungen der Trinkwasserqualität führen. Im Gegensatz zu Schadstoffen oder pathogenen Keimen wurde für das Vorkommen von wirbellosen Tieren im Trinkwasser bislang kein akutes hygienisches Risiko nachgewiesen, dementsprechend beinhalten die gesetzlichen Regelungen zur Trinkwasserqualität keine Grenz-, Schwellen-, oder Richtwerte. Vergleichbare Aussagen zu Invertebraten erfordern jedoch neben standardisierten Bedingungen für die Probeentnahme und Analyse auch standardisierte Verfahren zur Bewertung der Ergebnisse. Auf Grund des derzeitigen Fehlens von belastbaren Aussagen / Untersuchungen über die indirekte hygienische Relevanz wirbelloser Tiere in Trinkwassersystemen ist keine absolute Bewertung im Sinne von Grenzwertüber- oder Unterschreitungen möglich. Mit Hilfe eines Bewertungssystems kann jedoch eine vergleichende Einordnung erhobener Daten in eine definierte Datengrundlage und eine Betrachtung der Ergebnisse unter verschiedenen Aspekten mit daraus resultierenden Handlungsempfehlungen erfolgen.

Auf der Grundlage von Relevanz und Anwendbarkeit der einzelnen Bewertungskriterien (Aspekte) wurde eine entsprechende Auswahl in das Bewertungssystem integriert. Das sind derzeit Informationen zur Quantität des Vorkommens wirbelloser Tiere, zur ästhetischen Bewertung des Trinkwassers und zum Risiko einer Wiederverkeimung. Auf Grund der Vielzahl zu betrachtender

Aspekte und der Möglichkeit eine Gesamtbewertung durchzuführen wurde ein multimetrischer Bewertungsansatz gewählt.

Das vorliegende Bewertungssystem ist modular aufgebaut; jedes Modul wird seinerseits durch verschiedene Einzelindizes beschrieben. Zusammenfassende Bewertungen sind auf Basis der Module als auch als Gesamt-Index (Multimetrischer Index – MMI) möglich.

## Referenzen

- Borchers, U. (2013) Die Trinkwasserverordnung 2012, Erläuterungen – Änderungen – Rechtstexte. 2. Auflage, Beuth Verlag, Berlin, 292 S.
- Christensen, S. C. B., Arvin, E., Nissen, E. & Albrechtsen, H.-J. (2013) *Asellus aquaticus* as a Potential Carrier of *Escherichia coli* and Other Coliform Bacteria into Drinking Water Distribution Systems. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 3 (10), 845-855.
- Christensen, S. C. B., Nissen, E., Arvin, E. & Albrechtsen, H.-J. (2012) Influence of *Asellus aquaticus* on *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Campylobacter jejuni* and naturally occurring heterotrophic bacteria in drinking water. *Water Research* 46 (16), 5279–5286.
- Colins (2004) Small animals in drinking-water distribution systems. In: WHO, Safe piped water. Chap. 6. IWA Publ., 101-120.
- DIN 2000 (2000) Zentrale Trinkwasserversorgung; Leitsätze für Anforderungen an Trinkwasser, Planung, Bau und Betrieb der Anlagen. Ersatz für DIN 2000 (1973-11), Beuth Verlag, Berlin, 10 S.
- DIN CEN/TR 16151 (2011) Wasserbeschaffenheit - Anleitung zur Planung und Erstellung Multimetrischer Indices. Beuth Verlag, Berlin.
- DVGW W 271 (1997) Tierische Organismen in Wasserversorgungsanlagen. DVGW Regelwerk W 271. DVGW Bonn, 45 S.
- Gunkel, G., Michels, U., Scheideler, M. & Ripl, K. (2010) Vorkommen und Bedeutung von Kleintieren in Trinkwasserverteilungssystemen - Maßnahmen zu deren Regulierung. *3R* (12), 716–724.
- Höll, K. & Grohmann, A. (2002) Wasser. Nutzung im Kreislauf, Hygiene, Analyse und Bewertung. 8. Aufl., De Gruyter, Berlin, 955 S.
- UBA (2004) Stellungnahme der Trinkwasserkommission zum Vorkommen von Oligochaeten und anderen Kleintieren in Wasserversorgungsanlagen. *Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz* 3, 302.
- van Lieverloo, J. H. M., Hoogenboezem, W., Veenendaal, G. & van der Kooij, D. (2012) Variability of invertebrate abundance in drinking water distribution systems in the Netherlands in relation to biostability and sediment volumes. *Water Research* 46, 16, 4918–4932.
- WHO (2004) Guideline for Drinking water Quality. 3. ed., World Health Organisation, Geneva.

## **Danksagung**

Herzlicher Dank gilt den an den Untersuchungen beteiligten Wasser- und Abwasserzweckverbänden sowie deren Unternehmen zur Betriebsführung für die Möglichkeit der Durchführung verschiedener Untersuchungen und für die praktische, technische Unterstützung des Projektes. Der Technischen Universität Berlin, FB Wasserreinigung und der Technischen Universität Dresden, Professur Wasserversorgung danken wir für die Unterstützung durch Bereitstellung von Kapazitäten im Bereich Labor und Technikum. Das Projekt wurde gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, wir bedanken uns für die kompetente Projektbegleitung. Besonderer Dank gilt allen Projektpartnern und deren unmittelbar beteiligten Mitarbeitern für die vertrauensvolle Zusammenarbeit und konstruktiven Diskussionen.

## **Kontaktadresse**

Ute Michels  
AquaLytis, Karl-Marx-Straße 119, 15745 Wildau.  
Fon: ++49 3375 246366, Fax: ++49 3375 246367,  
e-mail: utemichels@aqualytis.com

Priv.Doz. Dr. Günter Gunkel  
Technische Universität Berlin, Wasserreinigung,  
Sekt. KF 4, Strasse des 17. Juni 135, 10623 Berlin.  
Fon: ++49 30 314 25847, Fax: ++49 30 314 23850,  
e-mail: guenter.gunkel@tu-berlin.de

## **Kurzpräsentation der Projektteilnehmer**

Bei **AquaLytis**, wie der Name des Unternehmens beschreibt, stehen Wassertiere im Fokus des Unternehmens. Auf Grund einer langjährigen Tätigkeit auf diesem Spezialgebiet sind umfangreiche Kenntnisse zur Ökologie wirbelloser Tiere in Gewässern vorhanden. Die Mitarbeiterinnen besitzen langjährige Erfahrungen mit der Beprobung von Rohrleitungssystemen und der mikroskopischen Analyse von Tieren aus Trinkwassersystemen.

Verantwortlich bearbeitetes Teilprojekt im Forschungsvorhaben: Erfassung, Analyse und Bewertung von Invertebraten in Systemen der Trinkwasserverteilung; Testung und Validierung des Probeentnahme- und Messsystems unter Praxisbedingungen, Erarbeitung eines Multimetrischen Bewertungsindex, Projektkoordination.

Die Fa. **Scheideler Verfahrenstechnik GmbH** besitzt langjährige Erfahrungen im wasserwirtschaftlichen Anlagenbau und Kenntnisse bezüglich des Vorkommens von Wasserasseln in Trinkwasserverteilungssystemen. Gemeinsam mit der TU Berlin wurde ein CO<sub>2</sub>-Spülverfahren entwickelt, das einen nahezu vollständigen Austrag von Wasserasseln aus Rohrleitungssystemen gewährleistet. Die Anwendung des Spülverfahrens war eine wesentliche methodische Grundlage für die Testung der zu entwickelnden Probenahmeapparatur und für die Beschreibung des Probenahmeverfahrens.

Verantwortlich bearbeitetes Teilprojekt im Forschungsvorhaben: Entwicklung und Konstruktion einer mobilen Gesamtapparatur einschließlich eines Prototypen. Durchführung von CO<sub>2</sub>-Spülungen zur Überprüfung des entwickelten Probenahme- und Messsystems.

An der **Technischen Universität Berlin, Fachgebiet Wasserreinhaltung** werden kleintechnische Versuchsanlagen verwendet, um u. a. grundlegende Wirkprinzipien und konkrete technische Parameter für das neu entwickelte Spülverfahren (CO<sub>2</sub>-Spülung) zu erforschen. Die Wissenschaftler befassen sich seit mehreren Jahren mit dem Vorkommen von Wasserasseln in Trinkwasserverteilungssystemen, deren Nahrungsgrundlagen und der hygienischen Bedeutung.

Verantwortlich bearbeitetes Teilprojekt im Forschungsvorhaben: Testung und Validierung des Probeentnahme- und Messsystems unter Praxisbedingungen, Erarbeitung eines Multimetrischen Bewertungsindex, Charakterisierung und Bewertung von Ablagerungen von Organismen, insbesondere deren Kot, in Trinkwasserverteilungssystemen, Überprüfung der Indikatorfunktion von Asselkot für das Vorkommen von Wasserasseln und Entwicklung eines Verfahrens zum quantitativen Nachweis der Besiedlung von Trinkwasser-Versorgungssystemen durch Probenahme am Hydranten.

Die Wissenschaftler des **Instituts für Siedungs- und Industrierwasserwirtschaft der Technischen Universität Dresden** forschen u. a. zu Transport- und Sedimentationsprozessen von Partikeln in Trinkwassernetzen. Rohrnetzbereiche mit hoher Ablagerungsbildung stellen ein hohes Risiko für die verstärkte Entwicklung wirbelloser Tiere im System dar. Die Kenntnis bzw. Modellierung von Partikelbildung und -ablagerung ist daher eine wesentliche Grundlage für die Erarbeitung eines Analyseverfahrens.

Verantwortlich bearbeitetes Teilprojekt im Forschungsvorhaben: Entnahme, Analyse, Modellierung und Bewertung von Ablagerungen in Trinkwasserverteilungssystemen.

