

## **Verbleib von fäkalen Indikatorkeimen aus Mischwasserentlastungen nach der Einleitung in Fließgewässer**

Evelyn Walters<sup>1)</sup>, Peter Rutschmann<sup>2)</sup>, Kordula Schwarzwälder<sup>2)</sup>,  
Elisabeth Müller<sup>3)</sup> Harald Horn<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Temple University, Department of Civil and Environmental Engineering,  
Philadelphia, PA 19122, USA

<sup>2)</sup> Technische Universität München, Lehrstuhl für Wasserbau  
und Wasserwirtschaft, München

<sup>3)</sup> Technische Universität München, Lehrstuhl für  
Siedlungswasserwirtschaft, Garching

<sup>4)</sup> Karlsruher Institut für Technologie, Engler-Bunte-Institut, Lehrstuhl für  
Wasserchemie und Wassertechnologie, Karlsruhe

### **Kurzfassung**

Durch Mischwasserentlastungen gelangen in Deutschland jedes Jahr große Mengen an fäkalen Indikatorkeimen (FIB) in die Oberflächengewässer. Der Verbleib ist weitestgehend ungeklärt, belastbare Vorhersagemodelle sind nicht verfügbar. Die hier präsentierten Projektergebnisse stammen zum großen Teil aus Versuchen, die in einer naturnahen Versuchsrinne an der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft in Oberrach (Oskar von Miller Institut) durchgeführt wurden. Untersucht wurde neben der Inaktivierung der FIB in der fließenden Welle auch deren Akkumulation an der Gewässersohle und im Sediment. Durch gezielte Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit in den Naturrinnen konnte das Resuspensionspotential der FIB von der Gewässersohle zurück in die fließende Welle abgebildet werden. Darüber hinaus wurde durch Laborversuche ermittelt, in wie weit die Partikelassoziation der FIB deren Inaktivierung beeinflusst. Mit den präsentierten Ergebnissen besteht die Möglichkeit, für oligotrophe Gewässern eine bessere Vorhersage zum Abbau bzw. zur Inaktivierung der FIB zu leisten. Das Vorhaben wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (HO 1910/9-1 und RU 1546/2-1) gefördert.

## 1 Einleitung

Fäkale Verunreinigungen in Fließgewässern treten hauptsächlich durch die Einleitung von Kläranlagenabläufen, bei Mischwasserentlastungen und durch diffuse Einträge von angrenzenden landwirtschaftlich genutzten Flächen auf. Seit mehr als 10 Jahren wird an der oberen Isar durch UV-Desinfektion der eingeleiteten biologisch behandelten Abwässer sichergestellt, dass in der Badesaison die Grenzwerte der EU-Badegewässerrichtlinie eingehalten werden können. Trotz dieser Maßnahmen verringern Mischwasserentlastungen die Wasserqualität urbaner Fließgewässer bei Starkregenereignissen. Der Transport und das Verhalten von eingeleiteten Fäkalien in Fließgewässer werden von diversen abiotischen und biotischen Einflüssen wie z.B. Strömung, Temperatur, Substratangebot oder Abweiden durch Protozoen an der Gewässersohle geprägt. Obwohl für die Beschreibung des Nährstoffhaushaltes in Fließgewässern sehr gute Erfahrungen vorliegen (Reichert et al. 2001), konnten die Auswirkungen von Mischwasserentlastungen bisher nur unzureichend eingeschätzt werden, denn konkrete Abbauraten für die relevanten fäkalen Indikatorkeime (FIB) lagen nicht vor.

Besonders die verschiedenen Assoziationsformen der FIB in Fließgewässern stellen im Hinblick auf die mathematische Modellierung eine Herausforderung dar. So liegen diese entweder frei suspendiert in der Wassersäule vor, können allerdings auch mit Partikel oder Schwebstoffen unterschiedlicher Größe und Dichte verbunden sein. Forschungsergebnisse haben gezeigt, dass in der Wassersäule bestimmte Assoziationsformen die Überlebenschancen von Fäkalkeimen erhöhen können (Droppo 2004). Im Flachgewässer wie z.B. der Isar ist Inaktivierung durch UV-Strahlen der dominierende Entfernungsmechanismus (Sinton et al. 2007; Schultz-Fademrecht et al. 2008). Partikel mit hoher Dichte spielen ebenfalls eine wichtige Rolle, weil sie den Transport der assoziierten Bakterien zur Gewässersohle beschleunigen können.

Ein Hauptaugenmerk des Vorhabens lag auf der Charakterisierung der Verteilung und des Transports der frei suspendierten und der an Feststoffen assoziierten Keime des Mischwassers im Flussverlauf. Ziel war es auch, aufzuklären, in wie weit das Sediment einen möglichen Rückzugsraum für die FIB bildet.

## **2 Material und Methoden**

Zur Charakterisierung des Verhaltens von FIB in der fließenden Welle und im Sediment wurden zwei Fließrinnensysteme im labor- und großtechnischen Maßstab verwendet. Die Labor-Rinne wurde aus PVC gefertigt und hatte eine Länge von 1,2 m, eine Breite von 10 cm und eine Wassertiefe von 4 cm. Das Gesamtvolumen der Rinne (18 L frisches Isarwasser) wurde auf 12°C temperiert und mittels einer Zahnradschleuse bei einem Volumenstrom von 18 L/min kontinuierlich zirkuliert. Als Substrat dienten keramisch unlackierte Fliesen.

Die Natur-Rinne wurde im Freigelände der Versuchsanstalt in Obernach (TU München, Lehrstuhl für Wasserbau) aus Beton angefertigt. Die Rinne war 12 m lang, 50 cm breit, hatte eine Wassertiefe von 50 cm und wurde mit originalem Isarkies ausgestattet. Während eines Versuchs wurde das Gesamtvolumen (ca. 13 m<sup>3</sup> frisches Isarwasser) mit Hilfe von vier Tauchpumpen kontinuierlich zirkuliert. Eine detaillierte Beschreibung der Fließrinnensysteme und der Versuchsbedingungen ist in Walters et al. 2015 zu finden. Die Autoren stellen diesen Artikel oder auch die entsprechende Promotion (in Englisch) von Frau Evelyn Walters gerne als pdf zur Verfügung.

## **3 Ergebnisse und Diskussion**

### **3.1 Assoziationsform der Fäkalbakterien und Elimination in der fließenden Welle**

Die Assoziationsform der FIB im Rohabwasser spielt bei der Elimination (Inaktivierung und auch Sedimentation) eine erhebliche Rolle. Um Transport und Verbleib vom FIB nach einer Mischwasserentlastung besser einschätzen zu können, ist eine präzise Charakterisierung des kommunalen Abwassers erforderlich.

In Abb. 1 sind vier Partikelgrößenfraktionen und deren Anteil im Abwasser und TS, *E. coli* und Enterokokken Beiträge dargestellt. Die Partikelgrößenverteilung zeigt, dass mehr als die Hälfte der vorkommenden Partikel kleiner 63 µm war. Die Fraktion ≥ 63 µm weist in der Regel einen höheren Anteil an organischer Trockensubstanz (oTS) auf und bietet mehr Schutz vor UV-Strahlung. Im Hinblick auf den Verbleib (Sedimentation, Inaktivierung) hat dies unstrittig Auswirkungen, da die kleineren Partikel geringe Neigung zur Sedimentation haben und weniger Schutz vor Sonnenstrahlungen bereitstellen. Unter anderem zeigen die Ergebnisse, dass der

Hauptanteil der FIB in der kleinsten Fraktion vorkam (90,6 bzw. 83,0 %). Dies bestätigt den Befund von Jeng et al. 2005, die demonstrieren konnten, dass mehr als 90 % der im Abwasser vorkommenden *E. coli* und intestinalen Enterokokken der Partikelfraktion 0,45 – 30 µm zuzuweisen sind.

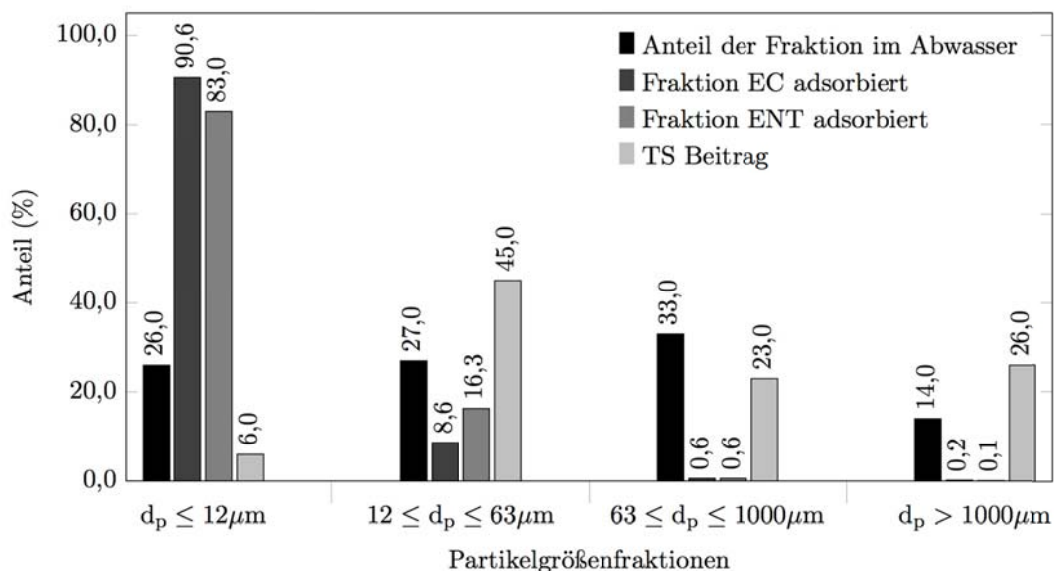


Abb. 1: *E. coli* (EC), Enterokokken (ENT) und TS Anteil in vier verschiedenen Partikelgrößenfraktionen im kommunalen Abwasser.

Der Einfluss der Partikelgröße auf die UV-Inaktivierung der FIB wurde exemplarisch an drei Fraktionen ( $d_p \leq 12 \mu\text{m}$ ,  $12 < d_p \leq 63 \mu\text{m}$ ,  $d_p > 1000 \mu\text{m}$ ) gezeigt. Dabei lag die Ausgangskonzentration der FIB (*E. coli* und intestinalen Enterokokken) zwischen  $10^3$  und  $10^4$  bzw.  $10^2$  und  $10^3$  MPN/mL.

In Abb. 2 sind die ermittelten Reaktionskonstanten eines Abbaus erster Ordnung in Abhängigkeit von Partikelgrößenfraktionen und TS-Gehalt dargestellt. Beides hat eine markante Wirkung auf die Elimination von FIB in der Wassersäule. Generell konnte gezeigt werden, dass mit zunehmendem TS-Gehalt die UV-Inaktivierung abgeschwächt wird. Darüber hinaus sind die an die kleine Partikelfraktion ( $d_p \leq 12 \mu\text{m}$ ) adsorbierten FIB schlechter gegen die UV-Strahlung geschützt als dies für die mittlere Fraktion ( $12 < d_p \leq 63 \mu\text{m}$ ) der Fall ist. Whitby & Palmateer (1993) haben nachgewiesen, dass für TS-Gehalte zwischen 10 und 65 mg/L ein direkter Zusammenhang zwischen TS und Fäkalkoliformen-Konzentration besteht. Bei einem

TS-Gehalt über 100 mg/L wurde in dieser Studie ein Verzögerungseffekt beobachtet, der auf einen kritischen TS-Gehalt hinweist. Sobald dieser Wert überschritten wird, ist eine UV-Inaktivierung der FIB nicht mehr möglich. Dieses Ergebnis ist für die Wassergütemodellierung entscheidend, da der TS-Gehalt in Fließgewässern während Starkregenereignissen durchaus über 100 mg/L liegen kann.

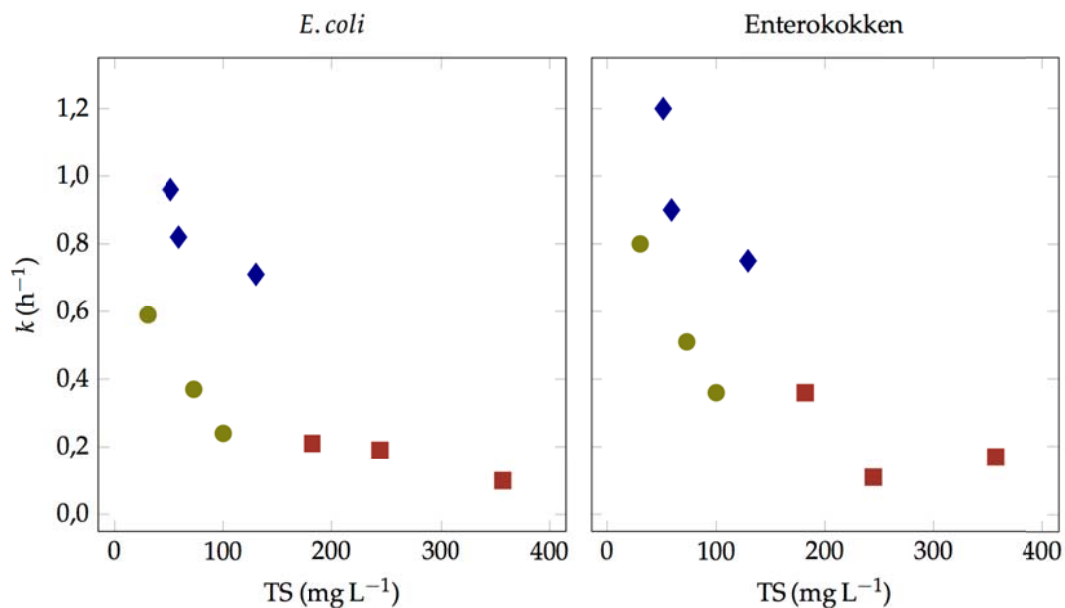


Abb. 2: Reaktionskonstanten für eine Reaktion erster Ordnung für  $d_p \leq 12 \mu m$  (blaue Raute),  $12 < d_p \leq 63 \mu m$  (grüner Kreis) und  $d_p > 1 mm$  (rotes Quadrat).

### 3.2 Elimination von Fäkalbakterien in der fließenden Welle

Die Versuche in der Natur-Rinne in Oberrach waren ein ganz entscheidender Schritt hin zum besseren Verständnis der Auswirkungen von Mischwassereinleitungen auf die Wasserqualität (also dem Verhalten der FIB) in Fließgewässern. Nachdem das Rohabwasser aus der Kläranlage Garching zugegeben wurde, stieg der TS-Gehalt von  $< 10$  mg/L auf ca. 25 mg/L und nahm während der ersten 20 h exponentiell ab, bis sich wiederum eine Konzentration von  $< 10$  mg/l eingestellt hatte (siehe auch Walters et al. 2014). Die CSB-Konzentration in der Natur-Rinne stieg nach der simulierten Mischwasserentlastung von 10 mg/L auf 16 mg/L bevor sie innerhalb 5 h wieder das Ausgangsniveau erreichte. In Abb. 3 sind die Ergebnisse für *E. coli* aus den ersten 30 h von zwei Versuchen in der Natur-Rinne dargestellt. Eine Halbwertszeit von 3,3 bzw. 3,9 h wurde für die kultivierbare *E. coli* errechnet. Für die intestinalen Enterokokken betrug die Halbwertszeit 3,3 bzw. 3,5 h.

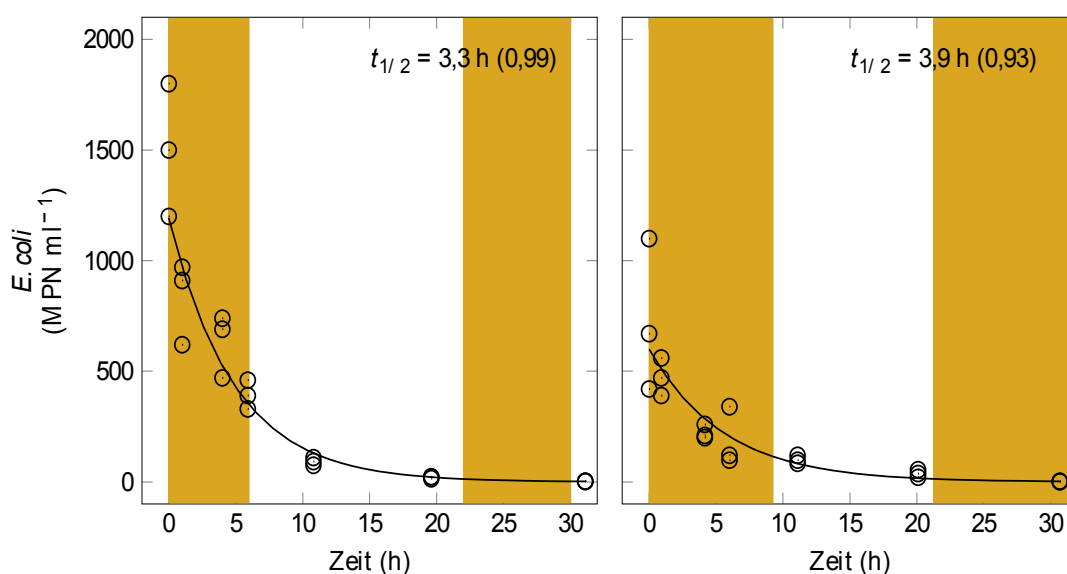


Abb. 3: Verhalten von *E. coli* in der Wassersäule (Natur-Rinne). Die gelb schattierten Bereiche stellen die Tagesphase dar. Die Halbwertszeiten für eine Reaktion erster Ordnung und das Bestimmtheitsmaß sind eingefügt.

In Tab. 1 sind einige Reaktionskonstanten zusammengestellt. Es ist sehr gut zu sehen, dass die Ergebnisse aus der Natur-Rinne sich nicht nur anhand der UV-Intensität herleiten lassen. Im Vergleich zu besser kontrollierbaren Versuchen im Labormaßstab wirken sich in der Natur-Rinne verschiedenste biotische und abiotische Faktoren (z.B. Abweiden, Tag/Nacht Temperatur, UV-Strahlung) auf den Verbleib der FIB aus.

Tab. 1: Reaktionskonstanten erster Ordnung für die FIB bei verschiedenen UV Lichtintensitäten

Lichtintensität (290-390 nm) (Wm <sup>-2</sup> )	Rinne	<i>E. coli</i> k (1/h)	Enterokokken k (1/h)	Temperatur (°C)
0,08	Labor	0,13	0,07	20
2,9	Natur	0,21	0,21	10
6,5	Natur	0,18	0,2	15,7
8,0	Labor	0,49	0,39	20
40,0	Labor	0,87	0,77	20

Bei den hier gezeigten Ergebnissen der Natur-Rinne liegen die Reaktionskonstanten bei ca.  $0,2 \text{ 1/h}$ . Interessant ist, dass ein Einfluss von Tag/Nacht nicht mehr nachweisbar ist. Schultz-Fademrecht et al. (2008) konnten in Laborrinnensystemen noch sehr deutlich den Einfluss der UV-Intensität zeigen. Hier ist die Wirkung auch auf Grund der Eindringtiefe des UV-Lichtes im sehr realen System nicht mehr so klar zu erkennen. Die Natur-Rinne war relativ schmal, so dass die Wassersäule nur der Sonnenstrahlung ausgesetzt war, wenn die Sonne direkt über der Rinne stand.

### **3.3 Sediment als möglicher Rückzugsraum für Fäkalbakterien**

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden Versuche sowohl in der Labor- als auch in der Natur-Rinne durchgeführt, um die Akkumulation der FIB im Sediment bzw. an der Sedimentoberfläche genauer untersuchen zu können. Während z.B. in der Labor-Rinne die intestinalen Enterokokken mit einer Reaktionskonstanten von  $0,3 \text{ 1/d}$  verschwanden, war die Inaktivierung in der Natur-Rinne zunächst in den ersten zwei Tagen deutlich schneller ( $0,7 \text{ 1/d}$ ). Mit Hilfe der qPCR wurde zusätzlich geschaut, wie sich die nicht kultivierbaren FIB in den entsprechenden Versuchen im Sediment verhalten. Hier war deutlich zu sehen, dass die Konzentration an Enterokokken in der Natur-Rinne über 27 Tage konstant blieb, während man in der Labor-Rinne eine exponentielle Abnahme innerhalb der ersten 5 Tage beobachtete (Walters et al. 2015).

Die Natur-Rinne wies eine Sohlschubspannung von  $9 \text{ N/m}^2$  auf, die den hydraulischen Eigenschaften der Isar entspricht. In der Labor-Rinne konnte lediglich eine Sohlschubspannung von  $0,3 \text{ N/m}^2$  eingestellt werden. Der Vergleich der Ergebnisse aus der Labor- und Natur-Rinne zeigt, dass zusätzlich zur Inaktivierung Faktoren wie z.B. Abweiden und Sohlschubspannung den Verbleib von E. coli und intestinale Enterokokken im Sediment eines oligotrophen, schnellströmenden Flusses prägen. Sicher konnte im Rahmen des Vorhabens gezeigt werden, dass die FIB im Sediment eine deutlich höhere Überlebenschance (5-fach) als in der Wassersäule eines oligotrophen Flusses haben. Die beiden Versuchsaufbauten demonstrieren, dass eine großtechnische Naturfließrinne zweifellos besser geeignet ist, Verbleib und Überlebensverhaltens von FIB im Flusssediment darzustellen.

## 4 Zusammenfassung

Zentrales Ziel der Studie war es, den Verbleib von FIB nach Mischwasserentlastungen in Fließgewässern besser zu verstehen und zu charakterisieren. Ergebnisse zeigen, dass die Konzentration an suspendierten Stoffen einen dominierenden Faktor bei der mathematischen Abbildung der FIB-Elimination darstellt. Darüber hinaus werden bei vergleichbaren TS-Konzentrationen Fäkalbakterien in der Fraktion  $d_p \leq 12 \mu\text{m}$  rund 1,5-mal schneller entfernt als die FIB, die mit der Fraktion  $12 < d_p \leq 63 \mu\text{m}$  assoziiert waren. Die großtechnischen Versuche zeigen für FIB vergleichbare Abbaugeschwindigkeiten in der fließenden Welle. Die Elimination ist hauptsächlich auf die wenig attraktiven Umweltbedingungen zurückzuführen. Schließlich wurde bestätigt, dass die Fäkalbakterien im Sediment eines oligotrophen Flusses bessere Überlebenschancen haben als dies in der Wassersäule der Fall ist. Ergebnisse des Vorhabens helfen mittelfristig, den Verbleib von FIB in Fließgewässern besser vorhersagen zu können.

## Literatur

- Droppo, I.G., 2004. Structural controls on floc strength and transport. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31, pp.569–578.
- Jeng, H., England, A. & Bradford, H., 2005. Indicator Organisms Associated with Stormwater Suspended Particles and Estuarine Sediment. *Journal of Environmental Science and Health*, 40(4), pp.779–791.
- Reichert, P. et al., 2001. River Water Quality Model no. 1. *Water Science & Technology*, 43(5), pp.11–30.
- Schultz-Fademrecht, C., Wichern, M. & Horn, H., 2008. The impact of sunlight on inactivation of indicator microorganisms both in river water and benthic biofilms. *Water Research*, 42, pp.4771–4779.
- Sinton, L., Hall, C. & Braithwaite, R., 2007. Sunlight inactivation of *Campylobacter jejuni* and *Salmonella enterica*, compared with *Escherichia coli*, in seawater and river water. *Journal of Water and Health*, 5, pp.357–365.
- Walters, E. et al., 2014. Influence of Resuspension on the Fate of Fecal Indicator Bacteria in Large-Scale Flumes Mimicking an Oligotrophic River. *Water Research*, 48, pp.466–477.



Walters, E. et al., 2015. Verbleib von fäkalen Indikatorkeimen aus Mischwasserentlastungen nach der Einleitung in Fließgewässer. *gwf-Wasser/Abwasser*, 156(1), pp.62–70.

Whitby, G.E. & Palmateer, G., 1993. The effect of UV transmission, suspended solids and photoreactivation on microorganisms in wastewater treated with UV light. *Water Science & Technology*, 27(3-4), pp.379–386.

Hinweis:

Der für die Tagung AQUA URBANICA 2015 hier präsentierte Artikel ist eine verkürzte Version des GWF- Artikels „Walters, E. et al., 2015. Verbleib von fäkalen Indikatorkeimen aus Mischwasserentlastungen nach der Einleitung in Fließgewässer. *gwf-Wasser/Abwasser*, 156(1), pp.62–70.“ Zum Teil sind auch wörtliche Zitate enthalten, die nicht alle einzeln markiert sind.

Anschrift der Verfasserin:

Dr. Evelyn Walters  
Temple University  
Department of Civil and Environmental Engineering  
1947 N. 12th Street  
Philadelphia, PA 19122  
USA  
e.walters@temple.edu