

Detektion von Häufigkeit und Dauer von Mischwasserüberläufen mit Temperatursensoren

Thomas Hofer¹⁾, Günter Gruber¹⁾, Valentin Gamerith²⁾, Albert Montserrat³⁾,
Lluís Corominas³⁾ und Dirk Muschalla¹⁾

¹⁾ Technische Universität Graz, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, Stremayrgasse 10/I, A-8010 Graz, Austria. (E-Mail: thomas.hofer@tugraz.at)

²⁾ Hydroconsult GmbH, Ingenieurbüro für Kulturtechnik und Wasserwirtschaft, St. Veiter Straße 11a, A-8045 Graz, Austria.

³⁾ Catalan Institute for Water Research, Scientific and Technological Park of the University of Girona, H2O Building, Emili Grahit 101, 17003 Girona, Spain.

Kurzfassung

Durch die Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie kommt der Charakterisierung von Mischwasserüberläufen in Zukunft mehr Bedeutung zu. Messmethoden zur Überwachung von Mischwasserüberläufen wie Wasserstand oder Durchfluss sind teuer in Anschaffung und Betrieb. Der Fokus dieses Beitrags liegt in der Anwendung einer alternativen, kostengünstigen Methode zur Detektion von Überlaufereignissen. Dabei kommen zwei Temperatursensoren zum Einsatz, die im Abwasserstrom einer Mischwasserkammer und an der Sohle eines Entlastungskanals installiert werden. Da während eines Überlaufereignisses die Temperatursignale innerhalb einer bestimmten Bandbreite konvergieren, kann diese Information zur Detektion von Überlaufereignissen verwendet werden. Die Methodik wurde an einem Mischwasserüberlaufbauwerk für einen Zeitraum von sieben Monaten getestet und zur Evaluierung mit einer parallel betriebenen Durchflussmessung verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass alle 20 aufgetretenen Überlaufereignisse mit der vorgestellten Methodik eindeutig detektiert werden konnten. Die Abweichung der mittels der Temperaturmessungen detektierten Überlaufdauern betrug dabei im Vergleich zu den Durchflussmessungen maximal sechs Minuten.

Einleitung

Mischwasserüberläufe (MÜ) können temporär hydraulischen Stress, Sauerstoffzehrung und den Konzentrationsanstieg von Schmutzstoffen im Gewässer verursachen. Die europäische Richtlinie über die Behandlung von kommunalem Abwasser 91/271/EEC (European-Commission, 1998) fordert, dass alle EU-Mitgliedsstaaten Maßnahmen zur Reduktion von Belastungen aus Mischwasserentlastungen treffen müssen. Spätestens seit der Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie (European-Commission, 2000) kommt daher auch der Charakterisierung von Mischwasserentlastungen immer größere Bedeutung zu.

Das dynamische Verhalten von MÜs kann messtechnisch mittels Online-Monitoring erfasst werden (Gruber et al., 2005; Caradot et al., 2013). Generell können dafür Sensoren zur Erfassung von Wasserstand oder Durchfluss verwendet werden, die teuer in Anschaffung, Installation, Betrieb und Wartung sind (US-EPA, 1999). Um das Online-Monitoring von MÜs kostengünstiger durchführen zu können, wurden in den letzten Jahren verschiedene alternative Methoden vorgestellt (Schroeder et al., 2011). Montserrat et al. (2013) schlagen eine Methodik unter Verwendung eines Temperatursensors vor, der dafür direkt auf der Schwelle eines Überlaufbauwerks installiert wird, um Häufigkeit und Dauer von Mischwasserüberläufen über die Änderung des Temperatursignals zu detektieren. Diese Methodik wurde an mehreren MÜs angewendet und zeigte für die meisten Ereignisse zufriedenstellende Ergebnisse, wobei Probleme bei nur geringen Temperaturänderungen auftraten.

In diesem Beitrag wird eine modifizierte Methodik zur Anwendung von Temperatursensoren zur Detektion der Häufigkeit und Dauer von Mischwasserüberläufen vorgestellt. Die Zielsetzungen dabei sind i) die Maximierung

der Detektionsraten, ii) die Minimierung von Falschdetektionen und iii) die Implementierung der Methodik für eine automatisierbare Detektion von Mischwasserüberläufen.

Methodik, verwendete Sensoren und Testumgebung

Methodik

Die angewandte Methodik basiert auf der parallelen Installation von zwei baugleichen Temperatursensoren in einem MÜ. Der erste Sensor (T_1) wird direkt im zulaufenden Abwasserstrom der Mischwasserkammer situiert, um dort kontinuierlich die Abwassertemperatur zu messen. Dabei hängt die Art der Installation stark von der lokalen baulichen Situation des Bauwerks ab. Der zweite Sensor (T_2) wird direkt an der Sohle des zugehörigen Entlastungskanals installiert, um dort alternierend entweder die Lufttemperatur bei Trockenwetter oder die Abwassertemperatur des Entlastungsabflusses während eines Überlaufereignisses zu messen. Um mögliche Messabweichungen zwischen den beiden Sensoren zu minimieren, sollten die Messbereiche, die Ansprechzeiten und die absoluten Zeitgeber der Sensoren zunächst unter Laborbedingungen abgeglichen und wenn notwendig und möglich, entsprechend kalibriert und justiert werden. Erst danach sollte der Einbau im Bauwerk erfolgen.

Die Methodik basiert auf zwei Annahmen:

- i) Bei Trockenwetter variieren die gemessenen Temperatursignale der Sensoren T_1 und T_2 . Dabei misst Sensor T_1 die Abwassertemperatur in der Mischwasserkammer und Sensor T_2 erfasst die Lufttemperatur im zugehörigen Entlastungskanal.
- ii) Bei einem Überlaufereignis konvergieren die gemessenen Temperatursignale der Sensoren T_1 und T_2 innerhalb einer bestimmten Temperaturbandbreite. In diesem Zeitraum messen beide Sensoren die Abwassertemperaturen in der Mischwasserkammer bzw. im zugehörigen Entlastungskanal.

Die Detektion eines Überlaufereignisses erfolgt in drei Schritten:

- 1) In Schritt 1 wird für jeden Zeitschritt die Temperaturdifferenz ΔT ($^{\circ}\text{C}$) zwischen den Temperatursignalen von Sensor T_1 und Sensor T_2 ermittelt.
- 2) In Schritt 2 wird die Detektionsbandbreite der Temperatursensoren ΔT_{limit} ($^{\circ}\text{C}$) bestimmt, die entscheidend für eine möglichst hohe Detektionsrate ist. Zur Kalibrierung der Detektionsrate wird ein Referenzmesssystem (z. B. Wasserstand, Durchfluss) benötigt. Die Qualität der Detektion wird im Anschluss mithilfe von drei Kriterien evaluiert:
 - i) Kriterium 1: Maximierung der korrekt detektierten Überlaufereignisse.
 - ii) Kriterium 2: Minimierung der falsch detektierten Überlaufereignisse.
 - iii) Kriterium 3: Minimierung der Abweichung der Gesamtdauer aller detektierten Überlaufereignisse.
- 3) In Schritt 3 wird für jeden Zeitschritt die Temperaturdifferenz ΔT (aus Schritt 1) mit der Detektionsbandbreite ΔT_{limit} (aus Schritt 2) verglichen. Eine positive Detektion eines Ereignisses erfolgt für jede kontinuierliche Periode, in der die Bedingung $|\Delta T| \leq \Delta T_{\text{limit}}$ erfüllt ist.

Verwendete Sensoren

In dieser Studie kamen zwei Temperatursensoren mit integriertem Datenlogger zum Einsatz. Es wurden Temperatursensoren vom Typ HOBO® Pendant UA-002-64 (Onset Computer Corporation) in einer wasserdichten Hülle aus Polypropylen verwendet (Abmessungen: 58 x 33 x 23 mm, Gewicht: 18 g). Die Energieversorgung erfolgt über eine 3V CR-2032 Batterie mit einer Lebensdauer von etwa einem Jahr. Der verbaute interne Speicher von 64 KB ermöglicht die Aufzeichnung von 52.000 10-bit Signalen, was in etwa eine kontinuierliche Datenaufzeichnung von 36 Tagen mit einer zeitlichen Auflösung von 1 min erlaubt.

Der Messbereich des Sensors beträgt nach Herstellerangaben zwischen -20 $^{\circ}\text{C}$ und $+50$ $^{\circ}\text{C}$ mit einer Genauigkeit von $\pm 0,53$ $^{\circ}\text{C}$ und einer Auflösung von $0,1$ $^{\circ}\text{C}$. Die Ansprechzeit des Sensors beträgt 5 min. Die Anschaffungskosten je Sensor betragen im Jahr 2012 50 €. Für den periodischen Datenexport wurde ein Auslesegerät vom Typ HOBO® Shuttle U-DTW-1 (Onset Computer Corporation) verwendet. Damit kann der Speicherinhalt von bis zu 63 Sensoren kabellos über eine Bluetooth-Schnittstelle ausgelesen werden. Ein Exportvorgang eines Sensors dauert etwa 30 s. Die Anschaffungskosten betragen im Jahr 2012 rund 240 €.

Testumgebung und Fallstudie

Als Testumgebung für die beschriebene Methodik wurde ein MÜ in Graz (Österreich) ausgewählt, der seit 2002 mit verschiedenen Online-Sensoren ausgestattet ist und wissenschaftlich bereits intensiv untersucht wurde (Gruber et al., 2005; Gamerith et al., 2011). Eine Übersicht des installierten Sensornetzwerks ist in Abbildung 1 dargestellt. Ein Temperatursensor T_1 sowie ein zusätzlicher Referenzsensor T wurden zur kontinuierlichen Messung der Abwassertemperatur am Heck eines schwimmenden Pontons im Abwasserstrom der Mischwasserkammer installiert. Ein zweiter Temperatursensor T_2 wurde an der Sohle des zugehörigen

Entlastungskanals installiert, um alternierend entweder die Lufttemperatur bei Trockenwetter oder im Entlastungsfall die Abwassertemperatur der abgeschlagenen Abwassermengen aufzuzeichnen. Zu Vergleichszwecken und zur Validierung der vorgestellten Methodik standen zusätzlich stationär installierte Durchflussmesssysteme im Zulaufkanal zur Mischwasserkammer und im Entlastungskanal zur Verfügung. Der Datenexport der verwendeten Temperatursensoren erfolgte monatlich.

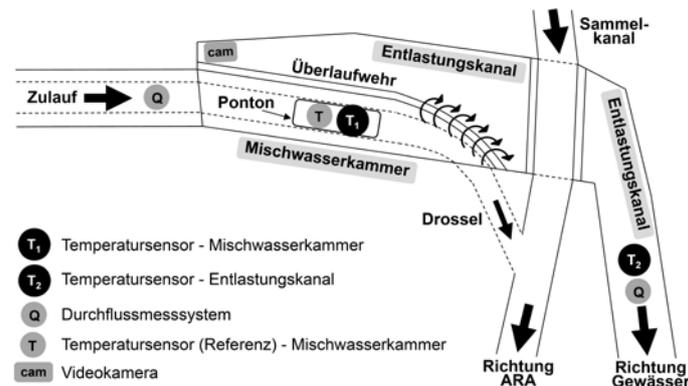


Abbildung 1: Versuchsaufbau zur Detektion von Überlaufereignissen an einem MÜ in Graz (Österreich).

Ergebnisse

Im Untersuchungszeitraum von sieben Monaten, von August 2012 bis März 2013, traten insgesamt 20 Überlaufereignisse am untersuchten MÜ auf. Die Häufigkeit und Dauer der Überlaufereignisse wurde mithilfe der Durchflussmessanlage im Entlastungskanal bestimmt und als Referenz zur Detektion mittels Temperatursensoren verwendet (siehe Tabelle 1). Die Dauer der Überlaufereignisse variierte abhängig von der Abflusssdynamik zwischen 13 min und 316 min.

Tabelle 1: Ergebnisse der Detektion von Überlaufereignissen mittels Durchflussmessung von 05.08.2012 bis 05.03.2013.

Detektion von Überlaufereignissen mittels Durchflussmessung als Referenz					
MÜ (#)	Start – Ende (Datum/Uhrzeit)	Dauer (min)	MÜ (#)	Start - Ende (Datum/Uhrzeit)	Dauer (min)
01	22.08.12 20:17 - 22.08.12 20:30	13	11	24.09.12 20:18 - 24.09.12 23:09	171
02	26.08.12 08:30 - 26.08.12 12:45	255	12	02.10.12 03:03 - 02.10.12 04:07	64
03	31.08.12 11:43 - 31.08.12 11:57	14	13	02.10.12 08:10 - 02.10.12 08:48	38
04	31.08.12 17:11 - 31.08.12 17:59	48	14	15.10.12 18:49 - 15.10.12 21:54	185
05	31.08.12 21:06 - 01.09.12 01:40	274	15	15.10.12 23:16 - 16.10.12 03:53	277
06	01.09.12 18:56 - 01.09.12 19:52	56	16	27.10.12 16:31 - 27.10.12 20:00	209
07	12.09.12 19:35 - 12.09.12 22:21	166	17	27.10.12 21:35 - 27.10.12 22:25	50
08	12.09.12 23:41 - 13.09.12 00:20	39	18	01.11.12 04:55 - 01.11.12 06:39	104
09	19.09.12 11:02 - 19.09.12 11:21	19	19	05.11.12 04:37 - 05.11.12 09:53	316
10	19.09.12 17:31 - 19.09.12 18:56	85	20	28.11.12 21:00 - 28.11.12 21:47	47

Beim Temperatur-Online-Monitoring konnten folgende Beobachtungen gemacht werden:

- Die gemessenen Abwassertemperaturen von Sensor T_1 im kontinuierlichen Abwasserstrom in der Mischwasserkammer bewegten sich in einem Bereich von 16 °C bis 22 °C.
- Die alternierend gemessene Luft- bzw. Abwassertemperatur T_2 im Entlastungskanal bewegte sich zwischen 4 °C und 19 °C und war dabei immer kleiner als die zum gleichen Zeitpunkt gemessene Abwassertemperatur T_1 in der Mischwasserkammer.
- Im gesamten Untersuchungszeitraum traten temporär mehrmals plötzliche Temperaturschwankungen in beiden Temperatursignalen auf, welche die Detektion beeinflussen können.

Repräsentativ für alle 20 detektierten Überlaufereignisse ist in Abbildung 2 das Überlaufereignis 07 vom 12.09.2012 dargestellt. Abbildung 2a zeigt den gemessenen Durchfluss im Entlastungskanal mit einem Maximum von rund 1.200 L/s. Start- und Endzeitpunkt des detektierten Überlaufereignisses mittels paralleler Durchflussmessungen sind durch eine vertikale, graue Strichlinie gekennzeichnet. Abbildung 2b zeigt die Temperaturverläufe der beiden Temperatursensoren T_1 und T_2 über die Dauer des Überlaufereignisses. In Abbildung 2c wird die Temperaturdifferenz ΔT (°C) mit der festgelegten Detektionsbandbreite ΔT_{limit} (°C) von $\pm 0,2$ °C gegenübergestellt. Start- und Endzeitpunkt der Detektion mittels Temperatursensoren sind durch eine vertikale, schwarze Strichlinie gekennzeichnet. Das detektierte Überlaufereignis mittels Temperatursensoren startet dabei im Vergleich zur Detektion mittels Durchflussmessung 7 min später und endet 1 min früher, was eine Differenz in der Detektionsdauer von 6 min ergibt. Die zeitliche Verzögerung des Detektionsstarts lässt sich

durch die Trägheit in der Ansprechzeit des Temperatursensors erklären, welche laut Hersteller 5 min beträgt. Die Verzögerung ist annähernd linear und abhängig vom absoluten Temperaturunterschied zwischen T_1 und T_2 am Beginn des Überlaufereignisses. Die Verzögerung des Startzeitpunkts ist daher umso größer, je größer der Temperaturunterschied zwischen T_1 und T_2 ist. Die Verzögerung am Ende des Überlaufereignisses ist abhängig von der gewählten Detektionsbandbreite ΔT_{limit} und ist grundsätzlich kürzer als die Verzögerung am Start.

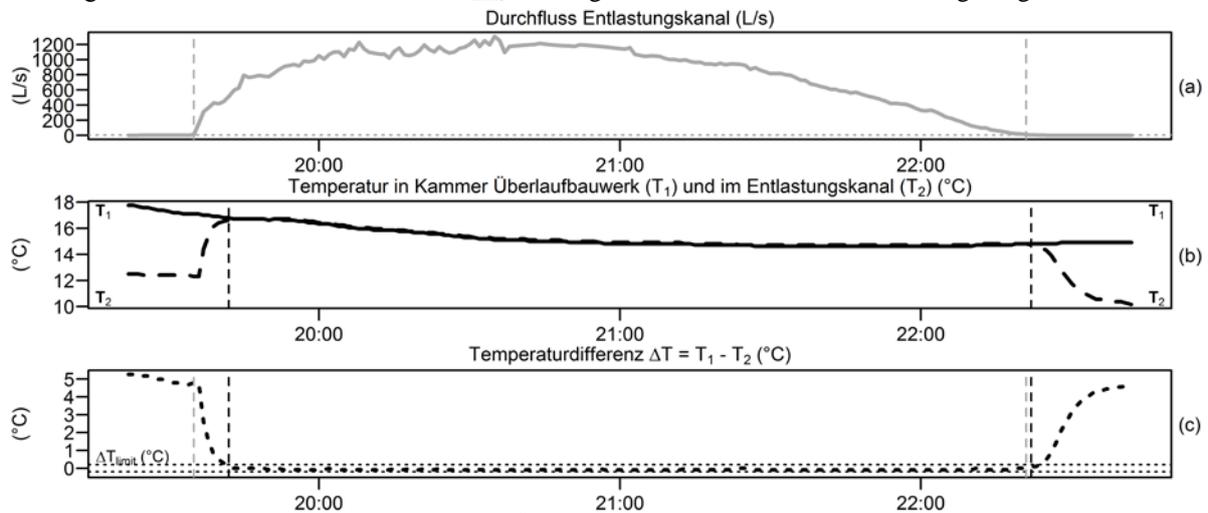


Abbildung 2: Grafische Darstellung des detektierten Überlaufereignisses 07 vom 12.09.2012.

Zur Bestimmung der Detektionsbandbreite der Temperatursensoren ΔT_{limit} (°C) wurde die Detektion mit 15 Testwerten zwischen 0,1 °C und 1,5 °C in einem Intervall von 0,1 °C (entspricht maximaler Messauflösung des Sensors) untersucht und mit den detektierten Ereignissen mittels Durchflussmessung als Referenz gegenübergestellt (siehe Tabelle 1). Die Evaluierung wurde mit Hilfe von drei definierten Evaluierungskriterien durchgeführt, deren Ergebnisse in Abbildung 3 dargestellt sind. Mit Ausnahme von $\Delta T_{\text{limit}} = 0,1$ °C konnte für alle untersuchten Werte die maximal mögliche Detektionsrate von 20 Überlaufereignissen erreicht werden. Die Anzahl der Falschdetektionen stieg bei Detektionsbandbreiten $\Delta T_{\text{limit}} > 0,2$ °C kontinuierlich an. Die absolute Abweichung der Gesamtdauern aller detektierten Überlaufereignisse wird bei einem Wert von $\Delta T_{\text{limit}} = 0,3$ °C minimal. Bei höheren Werten konnte ebenfalls ein kontinuierlicher Anstieg festgestellt werden. Unter Berücksichtigung der drei Evaluierungskriterien, wurde die optimale Detektionsbandbreite der Temperatursensoren mit $\Delta T_{\text{limit}} = 0,2$ °C festgelegt. Mit diesem Wert konnten einerseits alle auftretenden Überlaufereignisse detektiert werden und andererseits traten damit keine Falschdetektionen auf.

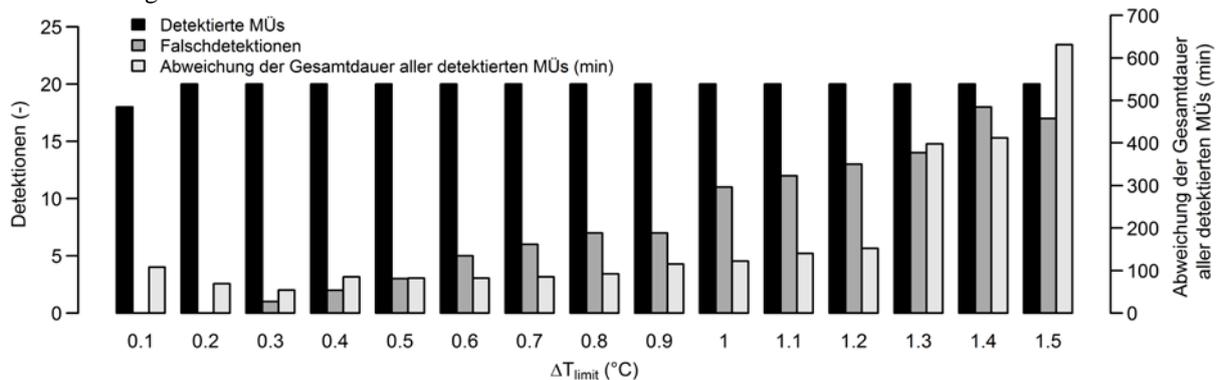


Abbildung 3: Vergleich der Evaluierungskriterien zur Bestimmung des optimalen Temperatur-Konvergenzbereichs ΔT_{limit} .

Diskussion

Die verwendeten Temperatursensoren weisen eine Ansprechzeit von 5 min auf, was zwangsweise zu entsprechenden zeitlichen Verzögerungen bei der Detektion von Überlaufereignissen führt. Diese Verzögerung verhält sich annähernd linear zum Temperaturunterschied der beiden Sensoren zu Beginn eines Überlaufereignisses. Dadurch trat eine maximale Abweichung der detektierten Überlaufdauern von 6 min auf. Der Temperaturunterschied zu Beginn des Ereignisses betrug dabei 6 °C.

Der Datenexport wurde für diese Studie manuell mithilfe eines mobilen Auslesegeräts durchgeführt. Dadurch war es notwendig einmal monatlich in das Mischwasserüberlaufbauwerk einzusteigen, um die Daten auszulesen. Dies ist zum einen personal- und kostenintensiv und zum anderen immer mit einem gewissen Risiko hinsichtlich des Arbeitnehmerschutzes verbunden.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Verwendung von zwei Temperatursensoren erwies sich als eine zuverlässige und kostengünstige Methode zur automatischen Detektion der Häufigkeit und Dauer von Überlaufereignissen an Mischwasserüberlaufbauwerken. An einem MÜ in Graz konnten innerhalb eines Zeitraums von sieben Monaten alle 20 aufgetretenen Überlaufereignisse mit einer Abweichung von maximal 6 min detektiert werden. Temperatursensoren mit einer schnelleren Ansprechzeit könnten diese Abweichungen noch weiter verkürzen. Durch die sehr kompakten Sensorabmessungen wurden praktisch keine Verzopfungen im Betrieb festgestellt, wodurch die Sensoren vollkommen ausfallsicher betrieben werden konnten.

Zur Kalibrierung einer optimalen Detektionsbandbreite der Temperatursensoren ΔT_{limit} (°C) ist die parallele Verwendung eines Referenzmesssystems in der Anfangsphase des Temperatur-Online-Monitorings erforderlich. Um eine optimale Temperaturkonvergenz der verwendeten Sensoren sicherzustellen, sollten diese unter Laborbedingungen getestet und gegebenenfalls kalibriert bzw. justiert werden.

Die Anschaffungskosten pro Sensor beliefen sich im Jahr 2012 nur auf rund 50 €. Spezielle Anforderungen können die Gesamtkosten entsprechend erhöhen, wobei vor allem auf notwendige Vorarbeiten bei der Installation und der Datenübertragung hinzuweisen ist. Zusätzlich können gesetzliche Vorgaben (z. B. Explosionsschutz) zu einem Anstieg der Gesamtkosten führen. Als Alternative zum manuellen Datenexport wäre eine automatisierbare Datenübertragung mittels Bluetooth, WLAN oder GSM sehr wünschenswert, wodurch auch das Einsteigen in die Kanalisation entfallen könnte.

Die Methodik kann generell auf andere MÜs übertragen werden, wobei von einem zusätzlichen Kalibrierungsaufwand je MÜ auszugehen ist. Dadurch könnten z. B. im Rahmen von Kalibrierungsmesskampagnen mehrere MÜs eines Systems parallel beobachtet werden, wodurch eine signifikante Kostenreduktion im Vergleich zu konventionellen Messsystemen gegeben wäre. Diese könnten aber auch zur kontinuierlichen Überwachung von MÜs oder zur Erfolgskontrolle von im Einzugsgebiet gesetzten Maßnahmen verwendet werden. Darüber hinaus wäre eine Anwendung der vorgestellten Methodik unter unterschiedlichen klimatischen Bedingungen ein Thema für weiterführende Untersuchungen.

Danksagungen

Die Autoren möchten dem Kanalnetzbetreiber der Stadt Graz „Holding Graz Services – Wasserwirtschaft“ für die Möglichkeit danken, ein Mischwasserüberlaufbauwerk für diese Studie untersuchen zu dürfen. Ein weiterer Dank geht an Roland Fuchs, der für die Installation und den Betrieb des Sensornetzwerks zuständig war. Lluís Corominas dankt dem Marie Curie Stipendium (PCIG9-GA-2011-293535). Albert Montserrat wurde durch ein Stipendium des spanischen Wissenschaftsministerium (FPI BES-2010-039247) finanziert.

Literatur

- Caradot N., Sonnenberg H., Riechel M., Matzinger A. and Rouault P. (2013). The influence of local calibration on the quality of UV-VIS spectrometer measurements in urban stormwater monitoring. *Water Practice and Technology* **8**(3-4), 417-24.
- European-Commission (1998). Implementation of Council Directive 91/271/EEC of 21 May 1991 concerning urban waste water treatment, as amended by Commission Directive 91/15/EC of 27 February 1998: Summary of the measures implemented by the Member States and assessment. In, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- European-Commission (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities* **43**(L327), 1- 71.
- Gamerith V., Gruber G. and Muschalla D. (2011). Single and Multievent Optimization in Combined Sewer Flow and Water Quality Model Calibration. *ASCE Journal of Environmental Engineering* **137**(7), 551-8.
- Gruber G., Winkler S. and Pressl A. (2005). Continuous monitoring in sewer networks an approach for quantification of pollution loads from CSOs into surface water bodies. *Water Science and Technology* **52**(12), 215-23.
- Montserrat A., Gutierrez O., Poch M. and Corominas L. (2013). Field validation of a new low-cost method for determining occurrence and duration of combined sewer overflows. *Science of the Total Environment* **463-464**, 904-12.
- Schroeder K., Riechel M., Matzinger A., Rouault P., Sonnenberg H., Pawlowsky-Reusing E. and Gnirss R. (2011). Evaluation of effectiveness of combined sewer overflow control measures by operational data. *Water Science and Technology* **63**(2), 325-30.
- US-EPA (1999). Combined Sewer Overflows - Guidance for Monitoring and Modeling. In: *Report EPA No. 832B99002*, Office of Wastewater Management, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., USA.