

## **Langzeitüberwachung der Raum-Zeit-Dynamik in Entwässerungssystemen mittels Niedrigenergiefunk – ein Feldexperiment im Grossmassstab**

Frank Blumensaat<sup>1,2</sup>, Christian Ebi<sup>2</sup>, Simon Dicht<sup>2</sup>, Alex Hunziker<sup>2</sup>,  
Jörg Rieckermann<sup>2</sup> und Max Maurer<sup>1,2</sup>

<sup>1)</sup> Institut für Umweltingenieurwissenschaften, Professuren für  
Siedlungswasserwirtschaft, ETH Zürich, Schweiz

<sup>2)</sup> Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und  
Gewässerschutz (Eawag), Dübendorf, Schweiz

**Kurzfassung:** Obgleich heute mittels Regenradar und hochauflösender Fernerkundung zunehmend effizienter Niederschlags- und Landnutzungsdaten akquiriert werden, ist es immer noch schwierig, eine hydrologische Überwachung für Entwässerungssysteme mit hinreichender Informationsdichte und -konsistenz zu realisieren. Ob und inwieweit die Technologie des Niedrigenergiefunks (LPWAN) – als Kommunikationsgrundlage aus dem Internet-der-Dinge (IoT) bekannt - das Potenzial hat, diese Lücke zu schliessen, diskutieren wir in diesem Beitrag. Grundlage dafür sind unsere Erfahrungen beim Aufbau und dem bisher einjährigen Betrieb eines drahtlosen Sensornetzes (WSN) in einem mittelgrossen Schweizer Entwässerungsnetz mit einer Sensordichte von weniger als 1 Sensor pro Hektar angeschlossener Siedlungsfläche und einer Überwachungsfrequenz von 5 Minuten. Im Einzelnen diskutieren wir i) das Monitoringkonzept, ii) die technische Spezifikation der Sensorik und der drahtlosen Datenübertragungstechnologie LoRaWAN<sup>TM</sup> und iii) verschiedene Methoden für eine effiziente Datenverarbeitung. Wesentliche Herausforderungen ergeben sich hinsichtlich der Funknetzarchitektur, z. B. um eine bessere und belastbarere Kommunikation zu unterirdischen Bauwerken zu erreichen, sowie einer effizienten Qualitätskontrolle der aufgenommenen Daten in Echtzeit.

**Keywords:** Niedrigenergiefunk, Siedlungsentwässerung, Raum-Zeit-Dynamik, LoRaWAN, Internet-of-Things, Langzeitüberwachung

## 1 Einleitung

Die Raum-Zeit-differenzierte Überwachung von Abflussprozessen im Kanal stellt naturgemäss hohe Anforderungen an Sensor- und Kommunikationstechnologien. Der Netzcharakter der Entwässerungssysteme, der eingeschränkte Zugang zu unterirdischer Infrastruktur, die teils gefährlichen und unwirtlichen Milieubedingungen, sowie die schnell und zufällig wechselnde Belastungssituation (Regen-/Trockenwetter) stellen wesentliche Herausforderungen beim Messen von Volumen- und Stoffströmen dar. In Bezug auf eine differenzierte Erfassung von Niederschlag und Landnutzung im urbanen Raum sind technologische Neuerungen wie Regenradar und eine hochauflösende Fernerkundung sehr vielversprechend. Die aktuellen Entwicklungen im Zusammenhang mit der sogenannten vierten industriellen Revolution (IoT, Cloud Computing, Machine Learning) suggerieren ein enormes Potenzial hinsichtlich einer drahtlosen Kommunikation mit bis zu vielen hundert Sensoren. Während erste Versuche in den USA mit speziell entwickelten Kommunikationssystemen bereits in den frühen 2000er Jahren erfolgreich getestet wurden (Montestruque und Lemmon 2015; Ruggaber *et al.*, 2007), ist derzeit unklar, welche der mittlerweile standardisierten Niedrigenergiefunktechnologien die rasante Entwicklung in diesem Bereich überlebt. Technische Aspekte wie Übertragungsperformance (Quality of Service - QoS), gerichtete Kommunikation, Signalarouting, Zeitsynchronisation, Durchsatzbeschränkungen, Funkreichweite und Energieverbrauch müssen den speziellen Anforderungen einer Anwendung in Siedlungsentwässerungssystemen gerecht werden. Ziel des Beitrags ist es i) die erfolgreiche Etablierung eines autarken Drahtlossensornetzes zu veranschaulichen, ohne dabei die Herausforderungen im Zusammenhang mit einer solch umfassenden Implementierung zu verschweigen und ii) geeignete Methoden für die Verarbeitung erhöhter Datenmengen zu diskutieren (Abb. 1).

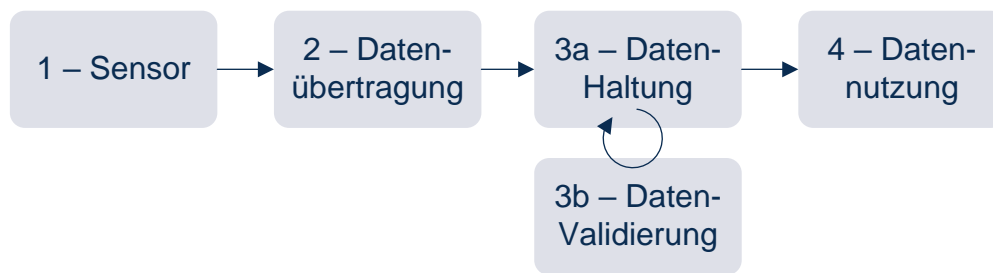


Abbildung 1: “Vom Sensorsignal zum konsistenten Datensatz” – Konzeptionelles Grundverständnis zum Informationsfluss als Grundlage zu diesem Beitrag.

## 2 Methodik

### 2.1 Drahtlossensornetzwerk

Das Drahtlossensornetzwerk kann grundsätzlich anhand der Elemente Funksystem, Sensorik und Netzwerkmanagement beschrieben werden.

*Funksystem:* Die Datenfernübertragung erfolgt mittels Niedrigenergiefunk im SubGigahertz-Bereich nach dem LoRaWAN™ - Standard (LoRa®Alliance 2015). Dieser Standard ermöglicht eine bidirektionale Funkverbindung zwischen batteriebetriebenen Sensorknoten über eine mittlere Reichweite von bis zu 20km (oberirdisch). Unsere Entscheidung den Datentransfer mittels LoRaWAN zu realisieren, ist im Wesentlichen durch vier Aspekte motiviert: i) Datenübertragung im Niedrigenergiebereich auf einem lizenzfreien Frequenzband (~868 MHz), ii) ein Standard mit Open Source-Charakter, der durch eine breite Community von Entwicklern und Anwendern unterstützt wird, iii) eine adäquate Verschlüsselung der Daten bei der Fernübertragung (AES-128), sowie iv) die Verfügbarkeit des Standards gegen Ende 2015. Die LoRaWAN-Netzwerkarchitektur ist standardmässig als sternförmige Topologie aufgebaut, d.h. Sensor-Knoten kommunizieren mit dem am besten verfügbaren Koordinator (Gateway).

*Netzwerkmanagement:* Das Netzwerkmanagement steuert via Gateway die funkanalspezifischen Datenraten der Sensorknoten und organisiert den Transfer der Datenpakete an einen hausinternen Datenserver. Im vorliegenden Fall setzen wir Software und Infrastruktur der Firma *loriot.io*

(Thalwil, Schweiz) ein. Der Datendurchsatz wird individuell für jeden Sensorknoten durch das ADR-Verfahren (Adaptive Data Rate) gesteuert. Dies reduziert die Energiekosten (Batterielebensdauer) und minimiert die Auslastung der *per se* beschränkten Funknetzkapazität. Die Gateways synchronisieren die Zeit über Internet mit einem Zeitserver. Je nach Ausführung verfügen die Sensorknoten über eine eingebaute Echtzeituhr und übertragen den Zeitstempel zum Messzeitpunkt mit den Messwerten als Datenpaar. Bei den einfacher realisierten Funkknoten wird der Zeitstempel des Gateways, resp. des Netzwerkservers bei jedem empfangenen Messdatenpaket verwendet.

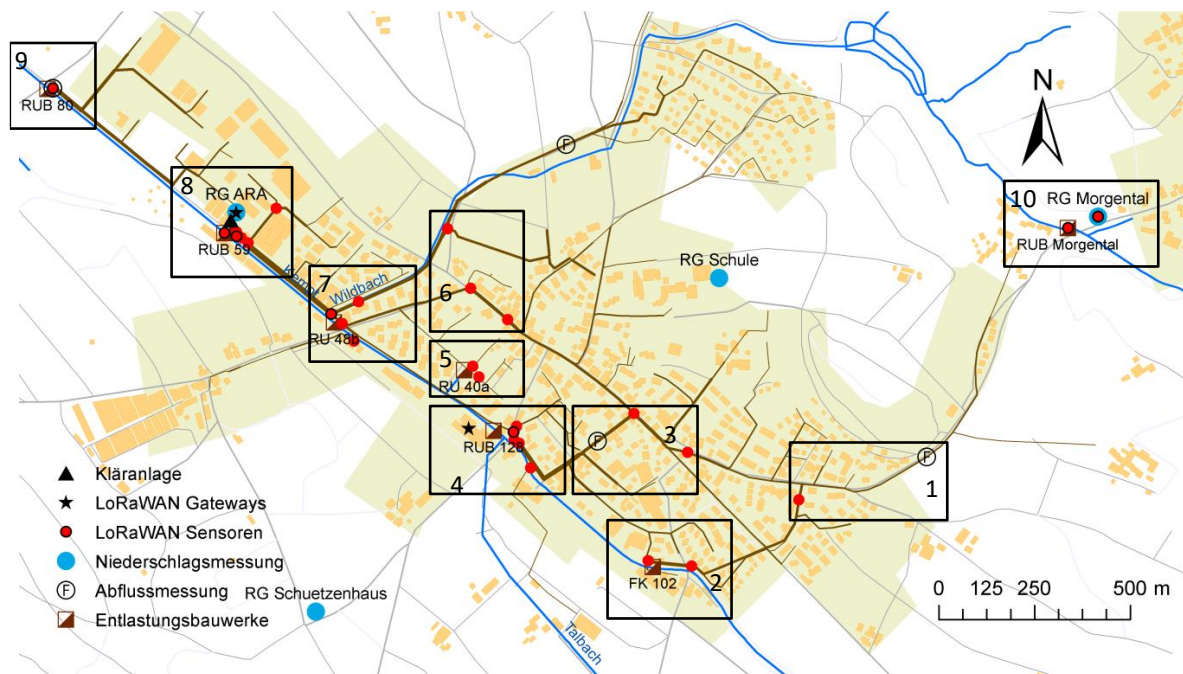


Abbildung 2: Verteilung der Elemente des LoRaWAN-Sensornetzes (Sensorknoten, Gateways) im Entwässerungssystem der Gemeinde Fehrltorf. Weitere, konventionell betriebene (Referenz-)Messstellen (Regenmesser, Abflussmessung) sind gesondert gekennzeichnet. Rahmen indizieren Sensorcluster, die einzelnen Sonderbauwerken zugeordnet sind.

**Sensorik:** Gegenwärtig betreiben wir zwei Basisstationen, resp. Gateways (Kerlink Wirnet Station 868), die die Signale der über das gesamte Gemeindegebiet verteilten Sensorknoten, empfangen (siehe Abb. 2). Die batteriebetriebenen Sensorknoten (eine Einheit aus Funkmodul und Sensor) sind teilweise als eigene Prototypen ausgeführt, teils nutzerdefiniert durch einen externen Dienstleister hergestellt. Derzeit sind 35 Sen-

sorknoten implementiert, die mit einer zeitlichen Auflösung von 5 min Systemzustände aufzeichnen und diese in Echtzeit übertragen: 24 Ultraschall-Füllstand (*MaxBotix MC7389*), 6 dielektrische Leitfähigkeitssensoren (*Decagon 5TM*), 2 Drucksonden (*Keller 36 XKY*), 2 Multiparametersonden zur Überwachung von Grundwasserstand und –qualität (*STS DL/N 70*) und 1 *Davis*-Pluviometer als Ergänzung zu 4 konventionellen Regenmessern (*OTT Pluvio<sup>2</sup> L*).

## 2.2 Datenvalidierung

Derartig räumlich verteilte Messungen erzeugen Datenmengen, die bisher gewohnte Dimensionen um ein Vielfaches übersteigt. Die erhöhte Quantität erfordert demnach eine rigorose Datenvalidierung (möglichst in Echtzeit) sowie eine systematische, automatisierte Datenverwaltung. Während in zahlreichen Untersuchungen zur Datenvalidierung von Einzelsignalen eine Vielzahl von nützlichen Konzepten erarbeitet wurde (Alferes und Vanrolleghem 2016; Branisavljevic et al. 2010), gehen nur wenige Studien auf die Validierung von ganzen Signalbündeln, resultierend aus räumlich verteilten Beobachtungen in einem Fließpfadnetz, ein. Diesen Umstand adressierend, schlagen wir eine vierstufige Vorgehensweise zur Signal- und Datenverwaltung vor: 1. skriptbasierter Datentransfer von externen Datenservern via API, 2. Echtzeitbearbeitung von Einzelsignalen (Gültigkeitsbereich, Ausreisserdetektion, Rauschfilter), 3. Anomalieerkennung durch kollektive Analyse verschiedener Signale (z. B. durch Korrelationsanalyse), 4. systematische Archivierung in einer Datenbankanwendung. Dabei stehen zwei Hauptziele im Fokus der Bemühungen: i) eine quasi-Echtzeit-Wartung der Sensor-Hardware durch eine automatisierte Anomalieerkennung und ii) die Bereitstellung vorab validierter Datensätze mit hoher Konsistenz. Gegenwärtig untersuchen wir verschiedene Methoden, z. B. die Korrelationsanalyse, Kohonenkarten (auch bekannt als self-organized map (SOM) – Verfahren) und die Hauptkomponentenanalyse (PCA) hinsichtlich ihrer Eignung für eine semi-automatisierte Datenvalidierung, bzw. Plausibilisierung der gesammelten Messdaten.

## 2.3 Untersuchungsgebiet

Das städtische Einzugsgebiet der Gemeinde Fehraltorf (Abb. 2) wird durch ein modifiziertes Mischsystem entwässert (13 km Mischwasserhaltungen, 4,6 km Schmutzwasserkanäle, 10,9 km Regenwasserkanäle). Das gesamte Siedlungsgebiet umfasst 127,3 ha, während davon etwa 40 ha versiegelte Fläche an das Kanalnetz angeschlossen sind. Eine nicht unerhebliche Anzahl der Kanalhaltungen liegt unterhalb eines saisonal schwankenden Grundwasserspiegels. Somit ist der Fremdwasseranfall, der zum Kläranlagenzufluss beiträgt, mit einer geschätzten Rate von durchschnittlich 40 % beträchtlich. Insgesamt vier Speicherbecken ( $36,1 \text{ m}^3 \text{ha}_{\text{red}}^{-1}$ ) werden zur Retention im Regenwetterfall bewirtschaftet. Über fünf Entlastungsbauwerke wird Mischwasser in ein basisabflussreguliertes Fließgewässer abgeschlagen, wobei das Verdünnungsverhältnis am Einleitzpunkt der Kläranlage 3:1 beträgt.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Netzwerkperformance

Die vorliegende Evaluierung basiert auf einem zehnmonatigen Netzbetrieb (Mai 2016 – März 2017) mit insgesamt 102'240 Betriebsstunden (9 Sensorknoten mit 10 Monaten, 26 Sensorknoten mit 2 bis 3 Monaten Betrieb).

*Übertragungsqualität, Netzabdeckung:* der andauernde Betrieb sowie standortspezifische Reichweitentests zur Prüfung der Signalstärke ergaben, dass nur zwei Gateways ausreichen, um das gesamte Stadtgebiet (Ausdehnung ca. 3 km x 3 km) grundsätzlich mit LoRaWAN zu versorgen. Jedoch ist der Empfang an einzelnen Standorten im Untergrund stark eingeschränkt. In unserer Studie sinkt die Verlässlichkeit, dass ein Datenpaket übertragen wird (QoS) im Mittel auf 83 %, wobei 70 % aller implementierten Sensorknoten direkt aus dem Untergrund senden. Die Erfahrungen über den andauernden Betrieb zeigen, dass sich der QoS mit zunehmender Betriebsdauer verbessert. Individuelle Anpassungen,

z. B. eine optimierte Funkknotenpositionierung, führen zu einer verbesserten Übertragung.

Während Engpässe bei der oberirdischen Netzabdeckung durch eine höhere Gatewaydichte kompensiert werden können, stellt der begrenzte Empfang im Kanal eine gesonderte Herausforderung dar. Aktuelle Forschung untersucht den Einsatz von Repeater-Knoten, welche oberirdisch platziert, die Signale mehrerer unterirdischer Sensorknoten empfangen und dann an einen Gateway weiterleiten. Erste Ergebnisse lassen eine Verbesserung der Übertragungsraten erwarten. Eine zusätzliche, hardwaretechnische Absicherung bietet die Integration eines Ringspeichers im Sensorknoten, sodass die Messdaten während temporär fehlender Netzabdeckung zwischengespeichert werden können.

*Funknetzkapazität:* Die regulatorische Beschränkung der Funknetzkapazität (Duty Cycle Restriction: 1 %) ermöglicht einerseits eine lizenzkostenfreie Übertragung, kann jedoch andererseits die Anwendung schnell limitieren. Dies ist z. B. der Fall, wenn eine Vielzahl von Sensorknoten grössere Datenmengen in hoher Frequenz übertragen. Mit der gegenwärtigen Konfiguration des Sensornetzes - 35 Sensorknoten, 2 Gateways, Übertragungsfrequenz 1- 5 Minuten, kleine Datenpakete von wenigen Bytes – erreichen wir die Kapazitätsgrenzen nicht. Ob und inwieweit v. a. eine Erhöhung der Übertragungsfrequenz (quasi-Echtzeit) die erlaubte Kapazität ausschöpft, ist von Qualität des Funksignals, der Anzahl der eingesetzten Gateways, sowie der zu übertragenden Datenmenge abhängig und daher im Einzelfall zu prüfen.

*Energieverbrauch:* Die Standzeit der batteriebetriebenen Sensorknoten wurde, je nach Sensor variierend, mit etwa zwei Jahren abgeschätzt. Nach 12 Monaten Betrieb (Mai 2016 – Mai 2017) konnten wir keine Ausfälle aufgrund von Spannungsabfällen beobachten.

### **3.2 Datenvalidierung**

Die detaillierten Ergebnisse der Untersuchungen zu den verschiedenen Analysemethoden werden im Konferenzbeitrag vorgestellt und diskutiert. Beispielhaft ist in Abb. 3 das Ergebnis einer Korrelationsanalyse dargestellt. Hier wurden die Signale von insgesamt sieben, im Entwässe-

rungsnetz verteilten Füllstandmessungen untersucht. Für den willkürlich ausgewählten Beobachtungszeitraum vom 13.05. bis zum 12.09.2016 ergeben sich bei einem Aufzeichnungsintervall von 5 Minuten insgesamt 204140 zu evaluierende Datenpunkte (ausfallbereinigt). Die Histogramme in der Diagonale der untenstehenden Multi-Plot Darstellung illustrieren die Verschiedenartigkeit der einzelnen Signale: Füllstandsmessungen in Entlastungsbauwerken (z. B. n256, n258) zeigen typische Bimodalverteilungen, wohingegen Messungen in Drosselstrecken (z. B. n257, B60) entsprechend schiefe, unimodale Verteilungen ergeben.

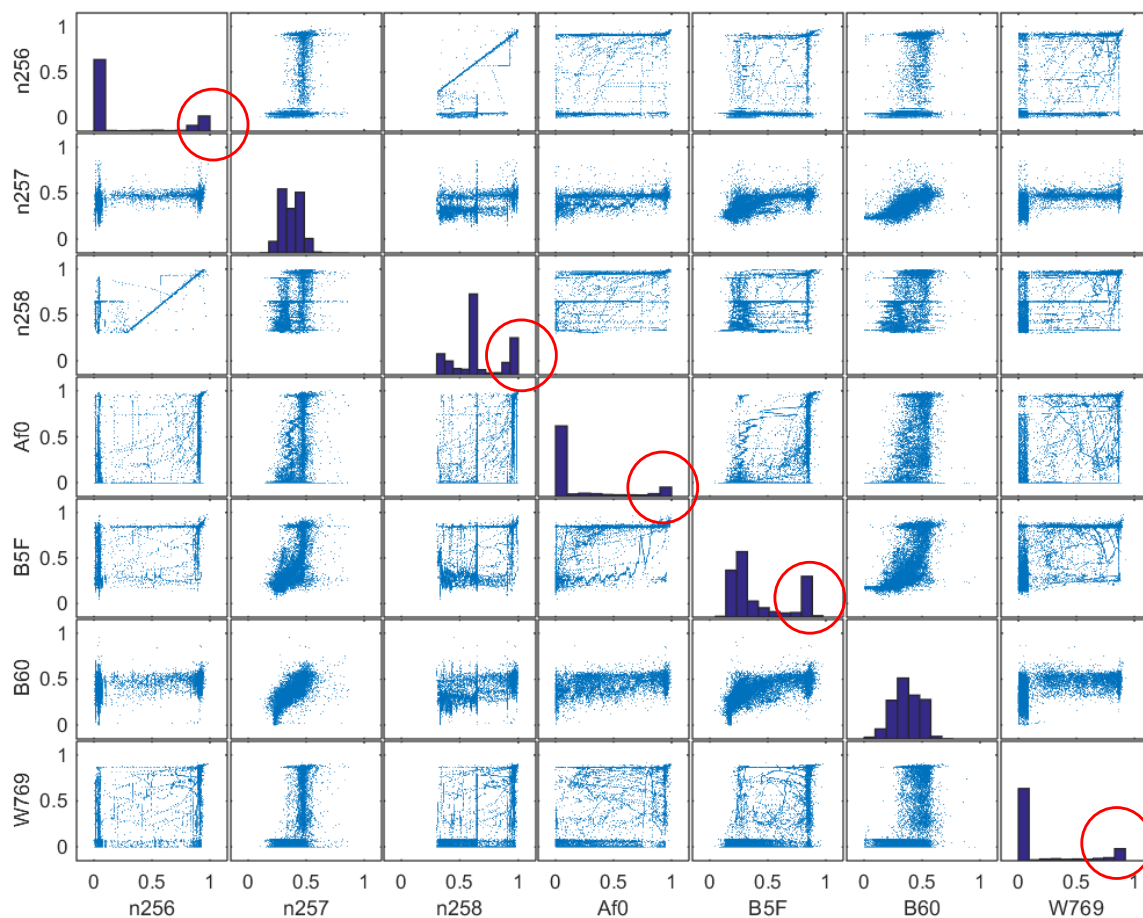


Abbildung 3: Korrelationsmatrix für gefilterte, normalisierte Füllstände (Daten: 13.05. - 12.09.2016). Rote Kreise zeigen Überlaufaktivität. Korrelationsdiagramme ermöglichen die Identifizierung von offensichtlichen Korrelationen oder Anomalien (vgl. n256 und n258, sowie n257 und B60).

Korrespondierende Scatterplots (hier dargestellt für den o.g. Gesamtzeitraum) bieten die Möglichkeit einer Signalprüfung im Kontext mit ,be-



nachbarten' Messsignalen. Nutzt man eine zeitlich differenzierte Analyse (sliding window analysis - SWAN) für eine quasi Echtzeitplausibilisierung, können sensorspezifische Anomalien *ad hoc* detektiert werden. Durch Hinzufügen einer Regen-/Trockenwetterinformation (durch parallel und zeitlich synchron gemessenen Niederschlag) kann diese Analyse über eine Mustererkennung weiter verfeinert werden.

## 4 Schlussfolgerung

Die vorliegende Studie zeigt i) einen bis dato zwölf Monate andauernden stabilen Betrieb eines Drahtlossensornetzes unter Nutzung von Niedrigenergiefunk und Low-Tech-Sensorik, und ii) einen Mehrwert durch intelligentes Kombinieren von Signalredundanz und Signalvielfalt in einem Sensornetzwerk.

Klare Vorteile der hier vorgestellten Anwendung gegenüber konventionell ausgebildeten Sensornetzwerken ergeben sich durch die nahezu unbegrenzte Skalierbarkeit und den extrem niedrigen Energiebedarf. Ein weiterer, entscheidender Vorteil hinsichtlich der Etablierung der Methode in der siedlungswasserwirtschaftlichen Praxis ergibt sich durch die Implementierungsmöglichkeit unter Nutzung einer zukünftig öffentlich verfügbaren Funkinfrastruktur, d.h. nicht wie hier aufgezeigt, basierend auf einem autarken, privaten Funknetz. Die Verfügbarkeit solcher öffentlichen Netze ist bereits in einigen europäischen Städten gegeben (u.a. Rotterdam, Genf, Zürich) und wird weiter zunehmen. Entwicklungs- bzw. Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Übertragungsqualität (QoS), der Optimierung der Funknetzarchitektur hin zu einem vermaschten System und der Bidirektionalität, d.h. der Möglichkeit auch Steuersignale an einzelne Sensorkonten zu senden (Downlink-Funktionalität).

Ungeachtet der rapiden technologischen Entwicklung (ähnliche LPWAN-Standards, wie zum Beispiel NB-IoT, sind in Entwicklung) sind die hier diskutierten technischen Aspekte für die Siedlungsentwässerung im Zeitalter der Wasserwirtschaft 4.0 relevant. Das hier beschriebene und weiter andauernde Feldexperiment ermöglicht es uns überhaupt erst einmal Erfahrung im Umgang mit grossen Sensornetzwerken in der Siedlungsentwässerung zu sammeln, um das unbestritten grosse Poten-

zial weiter auszuloten. Mit den aufgezeigten Erfahrungen, hoffen wir einen Beitrag zur nächsten Generation des Kanal- und Entlastungsmonitorings und der Funktionsüberwachung, v.a. dezentraler Anlagen, leisten zu können, nicht zuletzt um Hürden weiter abzubauen, die von einer evidenzbasierten Bewirtschaftung von Entwässerungssystemen abhalten.

## 5 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Gemeinde Fehraltorf und insbesondere bei der lokalen Gemeindeverwaltung für die grosse Unterstützung bei der Umsetzung der Initiative. Im Weiteren danken wir der Firma *Hunziker Betatech* (Winterthur, ZH) für die freundliche Bereitstellung von Daten und Informationen zum Entwässerungssystem, bei der Firma *Decentlab* (Dübendorf, ZH) für den Austausch und die Anfertigung der Sensorknoten nach unseren Wünschen, bei der Firma *Ioriot.io* (Thalwil, ZH) für die Unterstützung in der Startphase des Projekts. Dem *Institute of Embedded Systems* der Zürcher Hochschulen für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) in Winterthur danken wir für den ideenreichen Austausch auf wissenschaftlicher Ebene. *Last but not least* möchten wir uns bei allen beteiligten Doktoranden, Praktikanten, Zivildienstleistenden und Studierenden für ihren grossartigen Einsatz im Zusammenhang mit dem Sensor-Deployment bedanken.

## 6 Literatur

- Alferes, J., and Vanrolleghem, P. A. (2016). "Efficient automated quality assessment: Dealing with faulty on-line water quality sensors." *AI Communications*, 29(6), pp. 701-709.
- Branisavljevic, N., Prodanovic, D., and Pavlovic, D. (2010). "Automatic, semi-automatic and manual validation of urban drainage data." *Water Science and Technology*, 62(5), 1013-1021.
- LoRa®Alliance. (2015). "LoRaWAN™ What is it? - A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™." LoRa® Alliance.
- Montestruque, L., and Lemmon, M. (2015). "Globally Coordinated Distributed Storm Water Management System." *CySWater'15*, ACM Press, Seattle, USA.

Ruggaber, T. P., Talley, J. W., and Montestruque, L. A. (2007). "Using embedded sensor networks to monitor, control, and reduce CSO events: A pilot study." Environmental Engineering Science, 24(2), 172-182.

**Korrespondenz an:**

Frank Blumensaat  
Eawag  
Überlandstrasse 133, Dübendorf, Schweiz  
Tel.: +41 58 765 5626  
Email: [frank.blumensaat@eawag.ch](mailto:frank.blumensaat@eawag.ch)

