

Erfassung und Interpretation des Abflussgeschehens in einem bewirtschafteten Mischwasserhauptsammler mittels Durchflussmessungen und Videoaufnahmen

E. Ristenpart^{1,*}, Y. Lund-Weiß² und B. Strauch²

¹ifs Ingenieurgesellschaft für Stadthydrologie mbH, Stiftstr. 12, D-30159 Hannover

²Stadtentwässerung Hannover, Sachgebiet Generalplanung (OE 68.11), Sorststraße 16, D-30165 Hannover

*Email des korrespondierenden Autors: ristenpart@ifs-hannover.de

Kurzfassung In dieser Fallstudie wird das komplexe Abflussverhalten des zentralen Mischwassersammlers im Kanalnetz der Stadt Hannover mittels der Ergebnisse einer aufwändigen Niederschlag-Abfluss-Messkampagne einschließlich Videoaufzeichnungen eingehend untersucht und umfassend beurteilt. Die Methoden zur Erzielung qualitativ hochwertiger Messdaten unter schwierigen hydrometrischen Randbedingungen werden erläutert. Angesichts der Bewirtschaftung des Sammlers wird das Abflussgeschehen erwartungsgemäß maßgeblich durch das am Ende des Zentralsammlers angeordnete und als Regelorgan fungierende Einlaufpumpwerk am Klärwerk beeinflusst. Das Abflussregime zeigt sensible Reaktionen auf die Pumpensteuerung, die mit den Messdaten detailliert nachgewiesen und analysiert werden. Weitere Verwendungszwecke der Daten sind die Kalibrierung eines hydraulischen Kanalnetzmodells und die Planung von Sanierungsmaßnahmen im Einzugsgebiet.

Schlagwörter: Niederschlag-Abfluss-Messkampagne, Videoaufnahmen, Messdatenverarbeitung, Bewirtschaftung, Abflussregime, Kanalnetz

1 EINLEITUNG

In der hier beschriebenen praktischen Fallstudie wurde das komplexe Abflussverhalten des zentralen Mischwassersammlers in Hannover im Rahmen einer Messkampagne mittels Durchfluss-, Wasserstand- und Niederschlagsmessungen sowie Videoaufzeichnungen an mehreren Stellen für die Dauer von rund 1¼ Jahren näher untersucht und eingehend beurteilt.

Zu den Zielen des Messprojekts als Grundlage für spätere Planungen gehörten die Gewinnung von Erkenntnissen und die Ableitung von Maßnahmen (i) für eine Ertüchtigung des Zentralsammlers bei Starkregenereignissen (Analyse der stattfindenden hochdynamischen Abflussprozesse vor dem Hintergrund von Entlüftungsschwierigkeiten) sowie (ii) für eine eventuelle Nachrüstung des dortigen Regenüberlaufs in Bezug auf eine weitergehende Mischwasserbehandlung (genaue Erfassung der Entlastungsmengen in den Vorfluter und Untersuchung des hydraulischen Geschehens vor und nach der Entlastungsschwelle in Bezug auf eventuell einzusetzende maschinelle Siebanlagen).

2 UNTERSUCHUNGSGEGENSTAND UND -METHODEN

2.1 Messgebiet

Das Kanalnetz der Stadt Hannover mit einer Länge von insgesamt etwa 2.500 km entwässert im Kerngebiet im Misch- und in den umliegenden Gebieten im Trennsystem. Durchzogen ist das Netz von 5 großen Hauptsammlern, von denen einer Mischwasser abführt.

Das Messgebiet beschränkt sich auf den unteren Bereich des zentralen Mischwasserhauptsammlers mit einer Länge von rund 4 km bis zur Kläranlage. Das beträchtliche Stauvolumen dieses Zentralsammlers (28.000 m³) mit seinen großen Kanalquerschnitten (Messprofile DN 2200 bis DN 3400) wird mittels Steuerung des Eingangspumpwerks des Klärwerks bewirtschaftet. Zweiter wesentlicher Einflussfaktor für die Hydraulik ist ein großer Regenüberlauf (RÜ) mit einem Streichwehr (Schwellenlänge 42 m) eingangs des Messgebiets, der die letzte Entlastungsstelle vor der Kläranlage darstellt.

2.2 Messprogramm

Es wurden an 5 Messstellen in den vorgenannten Großprofilen temporäre Durchflussmessungen sowie an 1 Station temporäre Niederschlagsmessungen mittels mobilen Geräten sowie an 4 Stellen in Sonderbauwerken (RÜ, Schieberschacht) Videoaufzeichnungen durchgeführt. Des weiteren wurden auch von im Messgebiet vorhandenen stationären Betriebsmeseinrichtungen der Stadtentwässerung Hannover erfasste Messdaten verwendet (21 Messgrößen zu Durchflüssen, Wasserständen und Niederschlägen sowie Schieberstellungen in 4 ausgewählten Sonderbauwerken).

Am RÜ wurden alle Abwasserströme (Zuläufe Q_{Zu1} und Q_{Zu2} , Ablauf Q_{Ab} , Überlauf $Q_{Ü}$) vollständig erfasst - sowohl durch kontinuierliche kombinierte Messung von Fließgeschwindigkeiten und redundanten Wasserständen mittels Großsensoren höherer Reichweite zur Durchflussberechnung als auch durch kontinuierliche Filmaufzeichnungen in der RÜ-Kammer mittels Videokameras zum weitergehenden „Sichtbarmachen“ der Strömungsvorgänge (s. Abb. 1). Die fünfte Durchflussmessstelle befand sich in einem Schieberbauwerk 1.580 m unterhalb des RÜ im Zentralsammler.

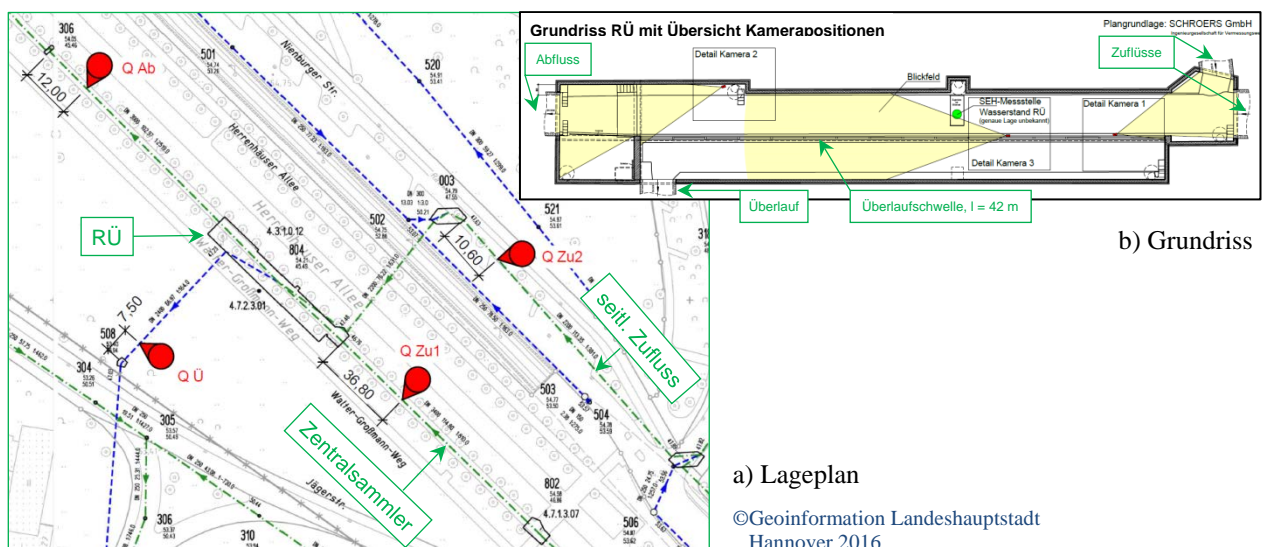


Abbildung 1: a) Lageplan temporäre Durchflussmessstellen und b) Grundriss RÜ mit Videokameras

Bei Planung der Ausrüstung und insbesondere Auswahl der Verfahren zur Durchflussmessung sowie des Messbetriebs war zu berücksichtigen, dass es an allen Messstellen bei selteneren Starkregenereignissen zu Rückstau und zu einer Vollenfüllung der Kanäle bis hin zum Überstau der Schächte kommen kann. An Messwertaufnahme und ihren Einbau wurden aus hydrometrischer und betrieblicher Sicht entsprechend hohe Anforderungen gestellt. Zum Einsatz kamen Geräte des Fabrikats Nivus PCM Pro mit Sensoren des Typs CS2 Vektor Profiler (Reichweite bis zu 5 m für Großprofile), die nach dem Verfahren der Ultraschall-Echobild-Mustererkennung mittels Kreuzkorrelation arbeiten. Dabei werden in bis zu 16 höhen-gestaffelten Messfenstern Einzelgeschwindigkeiten v_i (vgl. Abb. 2 und 4b) ermittelt und aus diesen vertikalen Geschwindigkeitsprofilen dann zunächst die mittlere Geschwindigkeit v_m und schließlich unter Berücksichtigung der Fließquerschnittsfläche (abgeleitet aus 2 redundant gemessenen Wasserständen h_{Dr} und h_{US}) der Durchfluss Q berechnet.

Im Standardmessmodus läuft diese Art der Durchflussmessung geräteintern ab und es werden lediglich die Ergebnisse für die Messgrößen h , v_m und Q im gewählten Messtakt (Minimum 1 Minute) vom Datenlogger gespeichert. Um die wertvollen Detailinformationen zu den Einzelgeschwindigkeiten v_i nicht zu verlieren und für die spätere Datenprüfung und ggf. -korrektur nutzen zu können, wurden sie in diesem Vorhaben in einem speziellen Modus als zusätzliche Rohdaten für jeden Messzeitschritt abgelegt.

2.3 Datenverarbeitung, -prüfung und -korrektur

Im Rahmen der Datenverarbeitung wird bei der Erzeugung von Sekundärdaten aus den erfassten Rohdaten (s.a. DWA, 2011 und Uhl et al., 2016) nicht der messgeräteintern ermittelte Durchfluss verwendet, sondern es erfolgt für jeden Zeitschritt eine nachträgliche Neuberechnung des Durchflusses aus der mitt-

leren Geschwindigkeit v_m und dem maßgeblichen Wasserstand h unter Berücksichtigung von Zusatzinformationen wie ggf. vorhandenen detaillierten Sonderprofilabmessungen und zeitlich veränderlichen Sohlablagerungen, die im Messumformer nicht geräteintern zur Verfügung gestellt werden können.

Die nachfolgende Datenprüfung beinhaltet umfangreiche Einzelprüfungen für das vollständige Kontinuum der Zeitreihen der temporären Durchflussmessungen. Es kommen dabei sowohl automatisierte EDV-gestützte Verfahren gemäß den numerischen Kriterien aus dem DWA-Merkblatt 181 (DWA, 2011) als auch individuelle visuelle und manuelle tabellarische Überprüfungsmethoden zum Einsatz. Werden Datenlücken oder -fehler gefunden, erfolgt eine Kennzeichnung in den Sekundärdaten und ggf. eine Datenkorrektur - auch unter Zuhilfenahme der kontinuierlich erfassten Geschwindigkeitsprofile -, die ebenfalls je nach Korrekturart unterschiedlich gekennzeichnet wird.

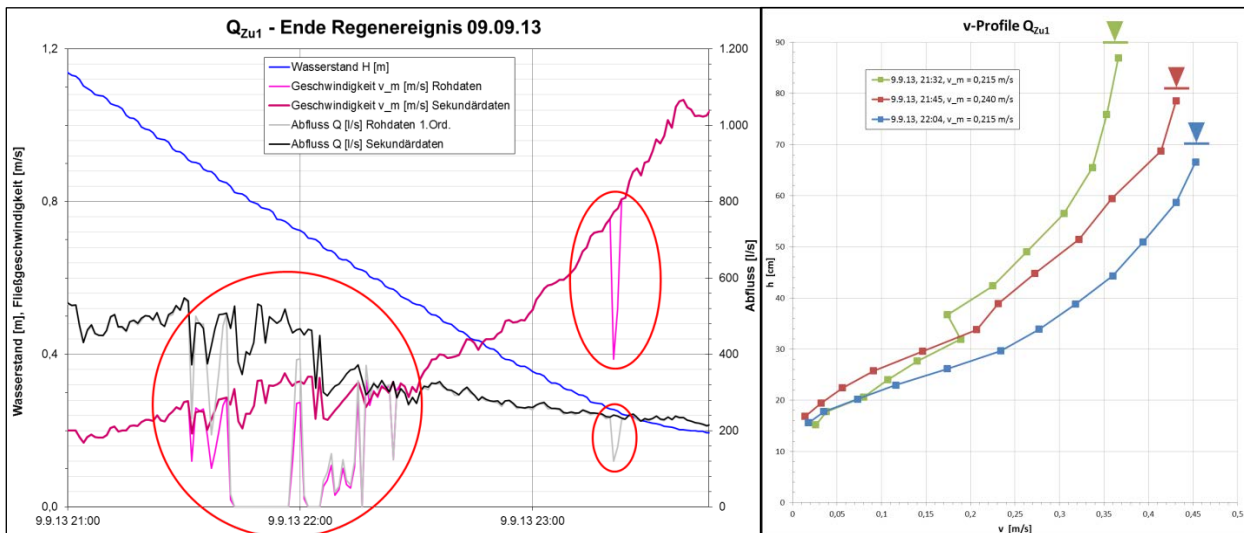


Abbildung 2:

a) Ganglinien Durchflussmessstelle mit Datenlücken und -korrektur und b) zugehörige Geschwindigkeitsprofile

Das aufwändige manuelle Verfahren der Datenkorrektur ist in Abb. 2 anhand eines beispielhaften Regenereignisses illustriert, in dessen Endphase der Rückstau gerade abklingt (siehe a): fallender Wasserstand, deutlich wieder ansteigende Fließgeschwindigkeit). Die fehlenden und fehlerhaften Messwerte von Geschwindigkeit und entsprechend auch Abfluss zwischen 21:32 Uhr und 22:24 Uhr wurden mit Hilfe der Einzelwerte aus den Geschwindigkeitsprofilen (siehe b) rekonstruiert und die Datenlücke so geschlossen.

3 ABFLUSSGESCHEHEN BEI TROCKENWETTER

Die teilautomatisierte Trockenwetterauswertung lieferte Kenndaten und Statistiken des Trockenwetter-Abflussgeschehens für jede einzelne Messstelle (Tagesganglinien und Stundenmittelwerte mit Maxima und Minima der Trockenwetterabflüsse, mittlere Trockenwetter- und Fremdwasser-Tagesabflüsse sowie Jahresganglinien der Trockenwetter- und Fremdwasserabflüsse mit Monatsmittelwerten ebenfalls einschließlich Maxima und Minima). Im räumlichen Zusammenhang des Entwässerungssystems waren die Werte entsprechend der Netzverknüpfung plausibel und wiesen bei direkt vergleichbaren Messstellen (z.B. Zu- und Abflüsse des RÜ) nur sehr geringe Abweichungen auf.

Bei der eingehenden Untersuchung der Trockenwetter-Tagesganglinien wurde an zwei Messstellen festgestellt, dass deren Verlauf maßgeblich von betrieblichen Einflussfaktoren geprägt ist (Rückstau-einfluss durch unterhalb vorgenommene Bewirtschaftung der Abflüsse, starke Abflussschwankungen infolge Pumpwerkstätigkeit). Die Analyse der jeweils voneinander abhängigen hydraulischen Kenngrößen Wasserstand und Fließgeschwindigkeit bzw. Abfluss an den Messstellen bestätigte, dass bereits bei Trockenwetter eine Bewirtschaftung des Zentralsammlers erfolgt.

In dem in Abbildung 3 dargestellten fünftägigen Trockenwetterzeitraums zeigt der Abfluss an der am weitesten unterstrom liegenden Kanalmessstelle Q_{ZS8} am ersten und schwächer ausgeprägt auch noch am zweiten Tag einen untypischen Verlauf infolge besagter Bewirtschaftung. Noch deutlicher wird dies an der zugehörigen Wasserstandganglinie, die am 02.10. und auch noch am 03.10.14 erhöhte Werte aufweist

sowie an der dortigen Fließgeschwindigkeitsganglinie, die korrespondierend mit dem Wasserstand einen Rückgang sichtbar macht. Beides zusammen belegt die Rückstauvorgänge. Zur Beseitigung dieses Rückstaus wird offensichtlich die Förderleistung des Pumpwerks am 02.10. auf rund 750 l/s erhöht und am 03.10. länger auf 500 l/s eingestellt. An den weiter oberhalb liegenden Messstellen ist kein Rückstau erkennbar. In der zweiten Hälfte des Zeitraums ab dem 04.10.14 weisen dann alle Ganglinien einen nahezu ungestörten Trockenwetterverlauf ohne Bewirtschaftungseinfluss auf. Dies lässt sich auch an dem gut übereinstimmenden Verlauf der Abflussganglinien des Einlaufpumpwerks am Klärwerk und der unteren Kanalmessstellen ablesen.

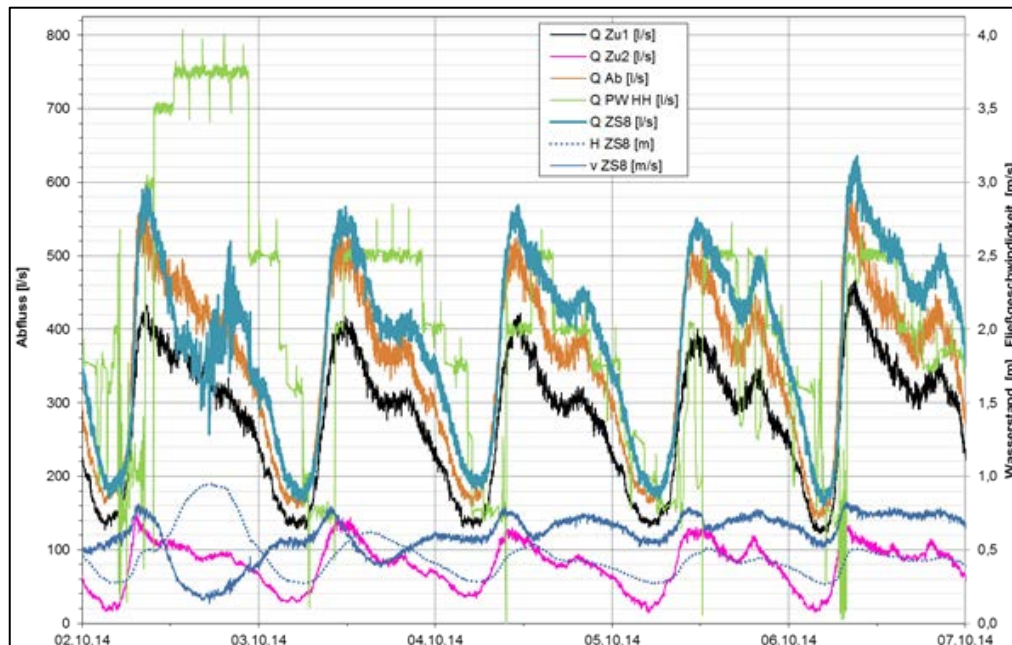


Abbildung 3: Beispielhafte Ganglinien Trockenwetterabfluss vom 02.-06.10.14 (Donnerstag bis Montag)

4 ABFLUSSGESCHEHEN BEI REGENWETTER

Das Niederschlag-Abflussgeschehen im Zentralsammler konnte mit Hilfe des gewonnenen Messdatenpools umfassend beurteilt werden. Das Abflussregime zeigt über einen großen Einflussbereich bis hinauf zu den Zuflüssen des RÜ sensible Reaktionen auf die Bewirtschaftung mittels des Einlaufpumpwerks am Klärwerk. Ausgewählte besondere Auswirkungen werden nachfolgend näher erläutert.

4.1 Regenereignis mit Fließumkehr im Nachlauf

Zur Erläuterung des Niederschlag-Abflussgeschehens im Zentralsammler wird das Regenereignis vom 24.05.14 beispielhaft herangezogen, bei dem keine Entlastung am RÜ stattfand. Es handelt sich hierbei um ein kompaktes, kurzzeitiges Ereignis eher geringerer Stärke, mit dem jedoch die Abflussvorgänge gerade deshalb grundlegend gezeigt werden können.

Der Vergleich der hier nicht dargestellten Ober- und Unterlieger-Wasserstände am RÜ (Zuflüsse 1 und 2 sowie RÜ-Kammer gegenüber Ablauf, ZS8 und PW HH) verdeutlicht die hydraulische Entkopplung für diesen Lastfall durch den Sohlabsturz am Ende des RÜ mit einer Höhendifferenz von rd. 1,2 m. Das zum unteren Teil des Zentralsammlers gelangende Abflussvolumen wird dort zunächst zwischengespeichert und über einen längeren Zeitraum bis zum nächsten Tag gegen 9 Uhr langsam dem Klärwerk zugeführt.

Die Maxima der Durchflussganglinien wurden gemäß Abbildung 4a) ca. 1 Stunde nach Niederschlagsbeginn bzw. rund eine $\frac{3}{4}$ Stunde nach dem Niederschlagsmaximum erreicht. Das Pumpwerk förderte während der Maximalabflüsse an den Kanalmessstellen ($Q_{Ab,max} = 4,5 \text{ m}^3/\text{s}$) höchstens $Q_{PW, HH} \cong 0,65 \text{ m}^3/\text{s}$. Kurz vorher und hinterher wurde es sogar für 3 – 10 Minuten ganz abgeschaltet. Bei fallenden Kanalabflüssen kehrte es nach einigen Schwankungen ab etwa 19 Uhr wieder in einen Dauerbetrieb mit abgestuften Förderraten zwischen ca. $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ und $1 \text{ m}^3/\text{s}$ zurück.

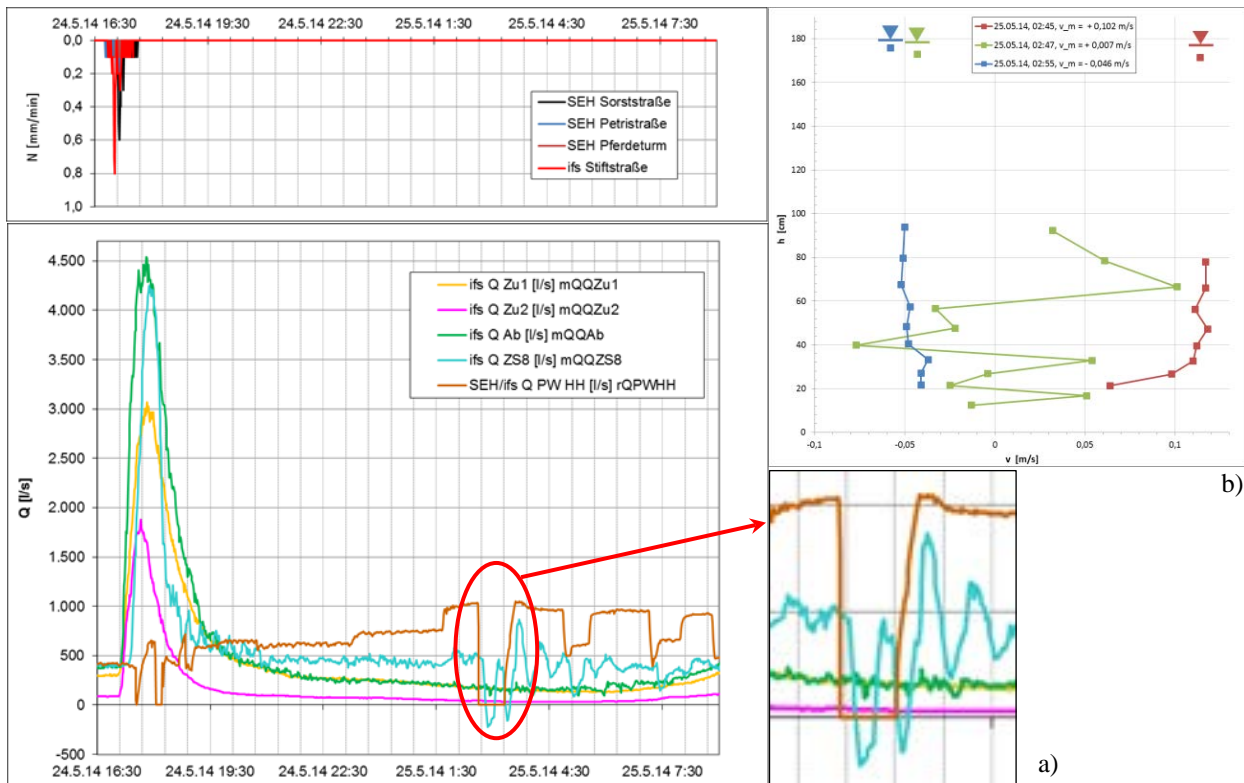


Abbildung 4: a) Niederschlag- und Abflussganglinien und b) Fließgeschwindigkeitsprofile Q_{ZS8} während eines Regenereignisses mit Fließumkehr

Abrupte Änderungen der Pumpenförderleistung am Klärwerk erzeugten am ZS8 ab ca. 18:20 Uhr nach Abklingen der Scheitelabflüsse kurzperiodische und ab 2:38 Uhr im Ereignisnachlauf langperiodische Schwingungen des Durchflusses mit Maxima von bis zu knapp $1 \text{ m}^3/\text{s}$ und Minima bis $-0,2 \text{ m}^3/\text{s}$. In zwei Perioden wurde der Abfluss somit sogar negativ, d.h. es kam in diesen Zeiträumen für 13 min bzw. 7 min zu einer Fließumkehr, die sowohl in der Ganglinie (s. Ausschnittvergrößerung Abbildung 4a) als auch in den schrittweise ins Negative umschlagenden Geschwindigkeitsprofilen (s. Abbildung 4b) deutlich wird. Im übrigen wird sie auch durch die zeitgleichen Videoaufzeichnungen bestätigt. Am Ablauf des RÜ sind ebenfalls noch geringe Rückgänge des Durchflusses in diesen Zeiträumen feststellbar.

4.2 Wasserstand- und Durchflussschwingungen bei Starkregen zu Ereignisbeginn

An den Messstellen Q_{ZS8} und Q_{Ab} konnten Wasserstand- und Durchflussschwingungen beobachtet werden, die während des Wasserspiegelanstiegs im Verlauf von Regenereignissen besonders stark auftraten. Insbesondere am 18.08.2013 ist dieses Phänomen in Abbildung 5 gut erkennbar. Die über längere Zeit sehr hohen Wasserstände (Q_{ZS8} war z.B. ab 20:01 Uhr für knapp $\frac{3}{4}$ Stunden eingestaut) bei geringsten Fließgeschwindigkeiten von im Mittel $0,13 \text{ m/s}$ zeigen, dass es zu Rückstau im Zentralsammler kam, der durch stark ansteigende Niederschlagabflüsse aus den Einzugsgebieten oberhalb und ihre nicht ausreichende Weiterleitung verursacht wurde.

Die Schwingungen wurden offensichtlich durch die sehr stark zwischen rd. $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ und $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ schwankende Pumpleistung am Eingangspumpwerk II hervorgerufen. An allen Messstellen traten diese Schwingungen im gleichen Zeitraum und mit der gleichen Frequenz auf. Nach Vergleichmäßigung der Pumpleistung auf konstant rund $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ab 20:52 Uhr verringerten sich zwar auch die Schwingungen im Kanalnetz oberstrom - bis sie ganz abgeklungen waren, verging aber noch mehr als eine Stunde.

Bei Starkregenereignissen läuft der untere Abschnitt des Sammlers demnach aufgrund der vorgesehenen begrenzten Förderung am Pumpwerk voll und es kann zu sehr schnellen Wasserspiegelanstiegen kommen, die zuerst das noch im Kanal über dem Wasserkörper vorhandenen Luftpolster und dann das Mischwasser abrupt an die Geländeoberfläche befördern. Dies kann sich in hochdynamischen Überstauvorgängen mit vorherigem abruptem Austritt eines Luft-Wasser-Gemisches äußern.

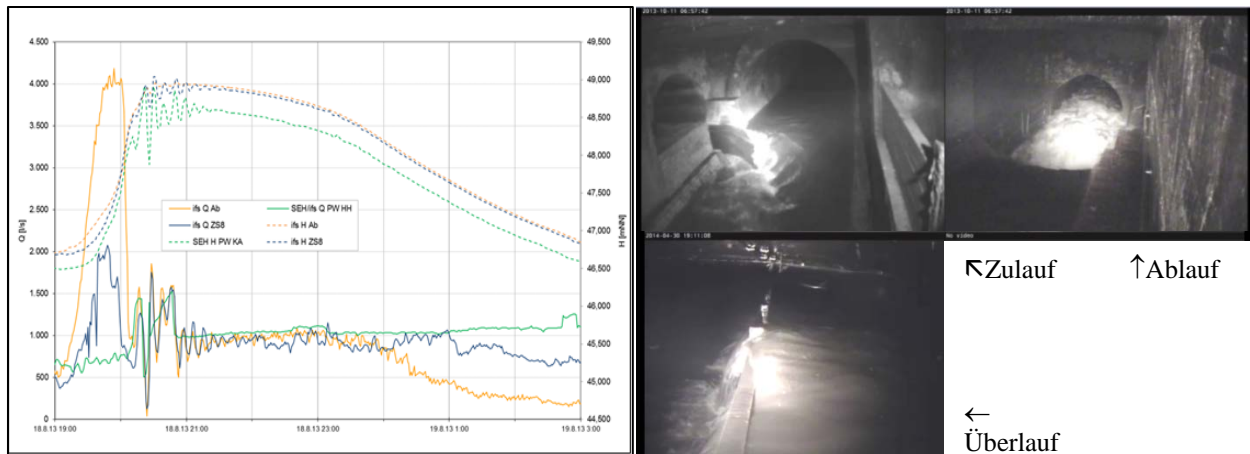


Abbildung 5: a) Wasserstand- und Durchflussschwingungen zu Ereignisbeginn an RÜ-Ablauf und Klärwerk
 b) zeitgleiche Videoaufzeichnung Abflussgeschehen am RÜ

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Das Niederschlag-Abflussgeschehen im Zentralsammler kann mit Hilfe des gewonnenen Messdatenpools umfassend beurteilt werden. Dabei ist gerade auch der Rückgriff auf zusätzlich gespeicherte, umfassende Detailinformationen aus den Rohdaten hilfreich. Mit den ergänzenden Videoaufzeichnungen konnten bisher unerklärliche und nicht messbare Zustände erfasst und das Verständnis für die komplexen hydraulischen Vorgänge im Bereich von Regenüberlauf und Schieberbauwerk ZS8 erweitert werden.

Angesichts der Bewirtschaftung des Zentralsammlers wird das Abflussgeschehen erwartungsgemäß maßgeblich durch das an dessen Ende angeordnete und als Regelorgan fungierende Einlaufpumpwerk II am Klärwerk beeinflusst. Das Abflussregime des Zentralsammlers zeigt sensible Reaktionen auf die Pumpensteuerung. Angesichts seines großen Einflussbereichs bis hinauf zu den Zuflüssen des RÜ sollte bei der Regelung der Pumpen „mit ruhiger Hand“ vorgegangen werden, um eine unnötige Induzierung starker künstlicher Schwingungen zu vermeiden. Sollte darüberhinaus im Hinblick auf die Optimierung der Pumpenregelung näherer Untersuchungsbedarf bestehen, so lassen sich die vorhandenen Daten dahingehend noch weiter auswerten.

Zudem kann mit den erhobenen Messdaten das vorliegende hydraulische Kanalnetzmodell kalibriert werden, um auch mittels hydrodynamischer Simulation mit größerer Genauigkeit Entlastungsmengen in den Vorfluter Leine und Schmutzfrachten bei Überlaufereignissen zu bestimmen. Auf Grundlage belastbarer Bestandsdaten können damit abgesicherte Berechnungsergebnisse für nachfolgende Planungsvorhaben erzielt werden.

Aufbauend auf der Analyse des Niederschlag-Abflussgeschehens können auch Sanierungsmaßnahmen für problematische Abwasseranlagen besser abgeleitet werden. Insbesondere die Lösung der Entlüftungsschwierigkeiten im unteren Bereich des Zentralsammlers, die Sanierung des seitlich zufließenden Sammlers (Einzugsgebiet Zu2), eine eventuelle Nachrüstung des Regenüberlaufs in Bezug auf eine weitergehende Mischwasserbehandlung und auch der Ersatzneubau des Einlaufpumpwerks am Klärwerk Herrenhausen (s.o.) sind konkrete Aufgaben, für die die neuen Erkenntnisse über das Systemverhalten vorteilhaft genutzt werden können.

6 REFERENZEN

- DWA (2011). Messung von Wasserstand und Durchfluss in Entwässerungssystemen. Merkblatt DWA-M 181, DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef (Hrsg.).
- LANUV (2008). Arbeitshilfe für die Durchführung von Messungen im Kanalnetz zur Ermittlung des abflusswirksamen Anteils der befestigten Flächen in Nordrhein-Westfalen. LANUV-Arbeitsblatt 4, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen.
- ifs (2015). Messkampagne Zentralsammler. Erläuterungsbericht mit Schlussdokumentation, unveröffentlicht, im Auftrag der Stadtentwässerung Hannover.
- Uhl, M., Sitzmann, D., Ristenpart, E., Weiß, G. (2016). Qualitätssicherung von Messungen in Entwässerungssystemen. Konf. Aqua Urbanica, Zürich/Rigi.