

# Ein hierarchischer Regelungsalgorithmus zur praxistauglichen Abflussregelung von Entwässerungsnetzen

Lorenzo Garbani Marcantini<sup>1</sup>, Simon Schegg<sup>3,1</sup>, Benjamin Mischler<sup>2</sup>, Kilian Hesse<sup>2</sup>, Markus Gresch<sup>4</sup>, Jörg Rieckermann<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Eidgen. Anstalt für Wasservers., Abwasserreinigung und Gewässerschutz (Eawag), Überlandstrasse 133, CH-8600 Dübendorf

<sup>2</sup> STEBATEC AG | Mattenstrasse 6a | CH-2555 Brugg

<sup>3</sup> ETH Zürich, Institut für Umweltingenieurwesen (IfU), Stefano-Francini-Platz 5, 8093 Zurich

<sup>4</sup> Hunziker-Betatech AG, Pflanzschulstrasse 17, 8411 Winterthur

\*Email des korrespondierenden Autors: lorenzo.garbanimarcantini@eawag.ch

**Kurzfassung** Für einen effektiven Betrieb eines Abwassersystems bietet sich vielerorts eine Abflussregelung an. Wir schlagen dazu einen Regel-basierten selbst-adaptiven und hierarchischen Regelungsalgorithmus vor, der allgemein anwendbar ist. Er steigert die Leistung des Entwässerungsnetztes der ARA Wohlen im Mittel um 10-20% und kann ca. 25% der Entlastungsereignisse verhindern. Wir diskutieren ausserdem die Möglichkeit, die Leistungsbeurteilung mittels Regenkategorisierung zu differenzieren und schlagen einen probabilistischen Ansatz vor, um nicht nur die Grösse der prognostizierten Veränderung zu betrachten, sondern gleichzeitig auch die Datengrundlage.

**Schlagwörter:** Gewässerschutz bei Regenwetter, Abflussregelung, Regelungsalgorithmus, Erfolgskontrolle

## 1 BEZAHLT ABER NICHT GENUTZT– PLANUNGSUNSICHERHEITEN FÜHREN ZU EINER SYSTEMATISCHEN ÜBERDIMENSIONIERUNG DER INFRASTRUKTUR

Obwohl die Abflussregelung von Abwassersystemen schon seit mehr als 20 Jahren auch für kleine und mittlere Netze Erfolg versprechend scheint (Krejci et al., 1994), werden die meisten Aktuatoren, wie Pumpen oder Drosselorgane, immer noch mit fixen Weiterleitmengen und Sollwerten betrieben. Diese sind in vielen Fällen wenig bis gar nicht aufeinander abgestimmt, so dass das Speichervolumen nicht optimal ausgenutzt wird (Dittmer et al., 2015; Gresch, 2015; Rüdüsüli et al., 2013).

Die Gründe dafür sind vielschichtig und ergeben sich durch technische, finanzielle und organisatorische Randbedingungen, aber auch einfach durch Unsicherheiten i) in der langfristigen Entwicklung der Einzugsgebiete und Schmutzfrachten, und ii) in den Simulationsmodellen, Eingangs- und Messdaten. Erstens werden Entwässerungsnetze auf lange Zeiträume von beispielsweise 30-40 Jahren geplant, was Prognosen für solch lange Zeiträume unsicher macht und dazu führt, dass Infrastrukturen mit Reserven geplant werden. Überall dort, wo der Betrieb nicht an die reale Entwicklung angepasst wird, z.B. durch Aufdatierung der Weiterleitmengen, ergeben sich deshalb zwangsläufig Leistungseinbussen (Dittmer et al., 2015; Layer et al., 2015). Zweitens werden die Bauwerke mit Simulationsmodellen geplant, die die Realität nur näherungsweise abbilden können.

Erfreulicherweise hat sich in den letzten Jahren jedoch die Ausrüstung der Systeme mit Messtechnik und Datenfernübertragung erheblich verbessert und Entwässerungssysteme mit mehreren Dutzend Wasserstands- und Abflussmessungen sind heute keine Seltenheit mehr. Kontinuierliche Qualitätsmessungen sind dahingegen noch sehr selten. Obwohl Betreiber erkannt haben, dass Messungen vor allem die Betriebssicherheit der Systeme erheblich verbessern, werden diese Messungen noch zu wenig gezielt zur Abflussregelung eingesetzt. Dies könnte zum einen damit zusammenhängen, dass oft optimale Regelungen angestrebt werden, die einen hohen Kenntnisstand und aufwändige Planungen bedingen (Pabst et al., 2010; Seggelke et al., 2013; Vezzaro and Grum, 2014). Zum anderen werden die Regelungen wiederum mit Simulationswerkzeugen geplant, was dazu führt, dass i) die tatsächliche Leistungsfähigkeit oft unbekannt ist und ii) die Bewilligung einer Regelung oft nicht trivial ist. Eine Lösung könnten einfach verständliche, allgemein anwendbare Regelungen sein, deren Leistungsfähigkeit man einfach messen und nachweisen kann.

In diesem Beitrag stellen wir deshalb einen einfachen generischen Regelungsalgorithmus vor, der das Potenzial hat allgemein anwendbar zu sein. Wir schlagen auch eine selbst-adaptive Variante vor, die auch langfristige Änderungen im Einzugsgebiet oder Entwässerungssystem berücksichtigen kann. Ausserdem diskutieren wir einen Ansatz, mit dem die tatsächliche Leistungsfähigkeit anhand einer einfachen Regen-Klassifizierung in Zukunft transparenter gemacht werden könnte.

## 2 EIN EINFACHER HIERARCHISCHER REGELUNGsalGORITHMUS ERMÖGLICHT PRAXISTAUGLICHE ABFLUSSREGELUNGEN

Für den generischen Regelungsalgorithmus haben wir uns für einen regelbasierten Ansatz entschieden (Lacour and Schütze, 2011; Pabst et al., 2010; Seggelke et al., 2013), da er in der Regel einfacher zu kommunizieren und implementieren ist. Modellprädikative Regelungsansätze (Fiorelli et al., 2013) sind zwar oft performanter, haben aber oft höhere Einstiegshürden. Ausserdem ist die Diagnose des Systemverhaltens bei vergangenen Ereignissen komplex.

Im Gegensatz zu herkömmlichen Regelungsproblemen, ist in der Siedlungsentwässerung die Zielfunktion (z.B. “guter Gewässerzustand”) nicht eindeutig zu beschreiben oder zu messen. Deshalb benutzen wir ebenfalls nicht absolute, sondern sekundäre Ziele, um die Sollwerte für Aktuatoren, wie Pumpen oder Drosseln, zu bestimmen. Erstens wird die Kapazität der ARA so schnell wie möglich erreicht, zweitens wird die gespeicherte Wassermenge gleichmässig über alle Bauwerke verteilt und drittens werden Entlastungen in den Vorfluter minimiert. So sind während Trockenwetter und am Anfang eines Regenereignisses (Abb. 1, Phase 1) die Weiterleitmengen maximal. Sobald die Kapazität der ARA erreicht ist (Abb. 1, Phase 2), wird für jedes Becken ein Sollwert vorgegeben, der sich aus dem verfügbaren Gesamtvolumen derjenigen Becken ergibt, die eine kürzere Fließzeit zur ARA aufweisen als das betrachtete Becken (Abb. 1, rechts). Die Regelgrösse eines Beckens erreicht den Sollwert dabei durch einen P-Regler.

Beim einfachen Regler handelt es sich dabei im Wesentlichen um eine Weiterentwicklung des von Pabst et al. (2010) vorgeschlagenen modularen Reglers durch i) eine globale Optimierung der im System verfügbaren Speicherkapazität und ii) einer selbst-adaptiven Komponente, die die statischen Weiterleitmengen anpasst. Dazu wird das Entlastungsverhalten analysiert und die Weiterleitmenge eines Bauwerkes so angepasst, dass dessen Anzahl an Entlastungen langfristig in einem sinnvollen Bereich liegen. Diese Anpassung kann langfristige Änderungen im EZG kompensieren, wie z.B. Änderungen im Abflussverhalten, oder der Bau von zusätzlichen Speichervolumina in Wachstumsphasen. Die Anpassung erfolgt mit Hilfe eines I-Reglers mit geringer Zeitkonstante auf der Anzahl Entlastungsereignisse des Bauwerks. Sinnvolle Sollwerte für die Anzahl Entlastungen könnten idealerweise auf der Empfindlichkeit des Vorfluters basieren, aber vereinfacht auch auf Dimensionierungsgrundlagen, d.h. auf wie viele Entlastungen pro Jahr die Behandlungsanlage ausgelegt wurde. Sie werden üblicherweise vom Betreiber gemäss seinen Betriebszielen vorgegeben.

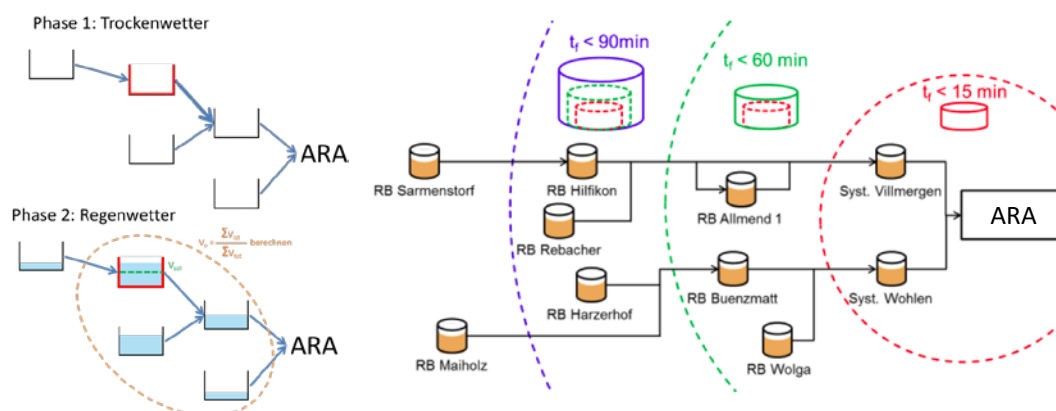


Abb 1: Funktionsskizze des hierarchischen Regelungsalgorithmus. Links: Rechts: Bildung von Sub-Gruppen mit gleichen Fließzeiten  $t_f$ , hier dargestellt für das Fallbeispiel der ARA Wohlen (s. unten)

Die Leistungsbeurteilung einer Regelung sollte in der Schweiz gemäss STORM-Richtlinie Gewässerbezogen sein. Da diese zur Zeit noch nicht mit Sensoren messbar ist, werden Ersatzweise Attribute wie i) die Anzahl Entlastungen, ii) Entlastungsdauer [h], iii) Entlastungsvolumen [m<sup>3</sup>] und die Entlastungsfracht [kg] pro Jahr zur Beurteilung herangezogen.

Darüber hinaus ist in der Schweizer Entwässerungsplanung explizit die Erfolgskontrolle von Massnahmen vorgesehen. Wie kann man aber die tatsächliche Leistungsfähigkeit einer Regelung im Betrieb beurteilen, wenn diese stark von der natürlichen Regenvariabilität, z.B. eines “trockenen” oder “nassen” Jahres, oder dem Auftreten eines extremen Starkregenereignisses in einer Kontroll-Periode abhängen kann? Wir schlagen dazu, erstens, eine probabilistische Betrachtung anhand einer einfachen Kategorisierung der Regenereignisse vor und, zweitens, äussere Einflüsse durch Kovariate mit einem intermittierenden Betrieb zu minimieren. Die grundlegende Idee der Kategorisierung ist, dass ein kleines Regenereignis ohne Entlastung abgeleitet werden können und grosse Ereignisse die Kapazität von Behandlungsanlagen überschreiten. Dazwischen gibt es eine Bandbreite von Ereignissen, die “gerade noch” ohne Entlastung abgeleitet werden können. Bei performanten Strategien werden diese im Mittel grösser sein. Im Vergleich zur Betrachtung von Entlastungsmengen, ist diese Analyse erstens spezifischer, zweitens weniger anfällig für Fehler in den Messdaten und, drittens, wegen der Wahrscheinlichkeitsbetrachtung, verlässlicher (Abb. 4). Zweitens können störende Einflussgrössen, z.B. durch Veränderungen im EZG oder an Messtechnik, durch einen intermittierend geregelten und unregelmässigen Betrieb, der z.B. nach jedem Regenereignis wechselt, minimiert werden. Im folgenden Fallbeispiel der ARA Wohlen können wir so schon nach ca. 1-2 Jahren verlässlich Unterschiede in der Leistungsfähigkeit von zwei verschiedenen Strategien aufzeigen.

### 3 FALLBEISPIEL ARA WOHLLEN

Das Einzugsgebiet der Kläranlage Wohlen hat eine reduzierte Fläche von rund 315 ha. Der grösste Teil des eher flachen Gebietes wird im Mischsystem entwässert und umfasst insgesamt 42 Entlastungs- oder Speicherbauwerke. Im hydrologischen Schmutzfrachtmodell, wurde das Gebiet in 40 Teileinzugsgebiete aufgeteilt, von denen die wichtigsten in Abb. 2 und Tab. 1 beschrieben sind. Die wichtigsten Aussenbauwerke sind seit kurzem an das Prozessleitsystem der ARA angeschlossen und verfügen über eine lokale Regelung per PID Regler. Im Regenwetterfall kann die ARA seit 2016 450 l/s (vorher: 400 l/s) aufnehmen. Das Gebiet wird im wesentlichen von der Bünz entwässert, die später in die Aare mündet, wobei viele Anlagen vorher in kleine und empfindlichere Bäche entlasten.

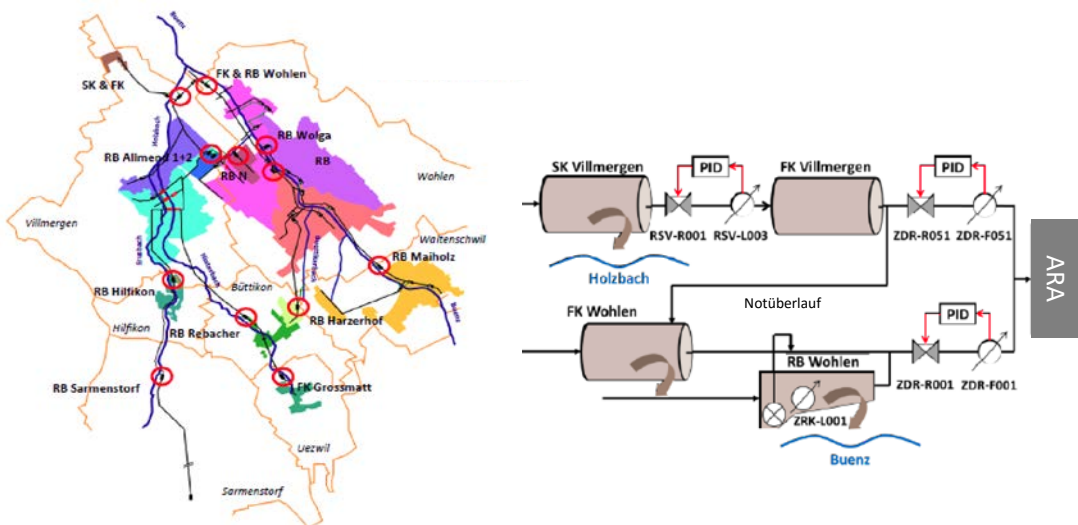


Abb. 2, links: Skizze des Entwässerungssystems der ARA Wohlen. Die hier betrachteten Behandlungsanlagen sind rot markiert. Rechts: Detailskizze der Zulaufsituation der ARA mit den Stauraumkanälen (SK), Fangkanälen (FK) und Regenbecken (RB).

Wie in vielen anderen Systemen in der Schweiz auch, werden die Aussenbauwerke sehr unterschiedlich bewirtschaftet. So konzentriert sich ein Grossteil der Entlastungsaktivität und -volumen auf einige Bauwerke, wohingegen andere eher Anlagen sehr selten und kurz genutzt werden (Tab. 1).

## 4 HYDROLOGISCHES SCHMUTZFRACHTMODELL, REGEN-RADAR ANPASSUNG UND SCHMUTZFRACHT-AUFTEILUNG

Die Regelung wurde mit einem konzeptuellen hydrologischen Modell entwickelt, wobei das Kanalnetz in CityDrain II implementiert wurde. CityDrain II ist eine quell-offene Software zur Simulation von integrierten Stadtentwässerungssysteme in Matlab/Simulink (Achleitner et al., 2007). Zeitreihen von Regen-Eingangsdaten wurden konstruiert, indem Radar-Daten von MeteoSchweiz mittels linearer inverser Distanzwichtung an drei lokale Regenmesser angepasst wurden. Trockenwetter-Tagesgänge, Schmutzfrachten (als kg CSB/d) und Fremdwasseranteile wurden aus Messdaten geschätzt und anhand der angeschlossenen Einwohnergleichwerte anteilmässig im Simulationsmodell implementiert (Schegg, 2016).

Die Plausibilisierung des kalibrierten Modells (hier: CSM400) anhand von Messdaten des Jahres 2015 zeigt insgesamt eine vernünftige Übereinstimmung mit Abweichungen von im Mittel 14% in Bezug auf die Anzahl Entlastungen (Dauer: -19%, Menge: -24%) (Tab. 1). Unsere Erfahrung zeigt dabei, dass vor allem aufgezeichnete Entlastungsmengen mit grösseren Unsicherheiten behaftet sind und zwingend geprüft werden muss, ob sie überhaupt als Grundlage für eine Regelung geeignet sind (Dittmer et al., 2015).

### 4.1 Regelungsstrategien

Aufgrund der Umstellung des ARA Zulaufs von 400 auf 450 l/s wurden im Vergleich zum Istzustand (CSM400) drei verschiedene Bewirtschaftungsstrategien getestet.

**Anpassung an neue Zulaufmenge von 450 l/s (CSM450):** Um zu bestimmen, ob das Verhältnis der beiden Zulaufstränge (Abb. 2, rechts) angepasst werden muss, wurde das Modell für verschiedene Gewichtungsfaktoren berechnet und zusätzlich die Pumpenleistung des RB Wohlen erhöht. Diese Variante ist interessant, um die Vorteile der integrierten Betrachtung von Netz und ARA aufzuzeigen. Optimale Sollwerte für die Weiterleitmengen wurden mittels Optimierungs-Rechnungen gefunden.

**Quasi-dynamische Regelung des Gesamtsystems mit selbst-adaptiven statischen Weiterleitmengen (CSM450\_SA):** Da Optimierungen oft aufwendig sind, schlagen wir als pragmatische Alternative eine selbst-adaptive Anpassung eines Entwässerungssystems vor. Hier passt der Regelungsalgorithmus die Weiterleitmengen mit sehr kleinen Zeitkonstanten sukzessive so an, dass die Anzahl Entlastungen nach einem oder mehreren Jahren in einem sinnvollen Bereich liegen. Konzeptuell kann diese Strategie auch mit einer dynamischen Regelung verknüpft werden, um gute Werte für den Gleichgewichtszustand (hier: Anfang eines Ereignisses) zu finden.

Tab. 1: Leistung des System im Jahr 2015 und Plausibilisierung eines konzeptuellen hydrologischen Schmutzfrachtmodells, welches in CityDrain II implementiert wurde. Einige Bauwerke entlasten unverhältnismässig oft und viel.

Anlage	Anz. Entlastungen [#]			Entlastungsdauer [h]			Entlastungsmenge [m3]		
	CSM400	Daten	Diff.	CSM400	Data	Diff.	CSM400	Data	Diff.
SK Villmergen	42	28	50%	209.9	260.4	-19%	152'110	193'050	-21%
RB Wohlen	53	45	18%	335.5	481.7	-30%	347'850	372'720	-7%
RB Sarmenstorf	30	31	-3%	158.4	261.4	-39%	57'749	35'469	63%
RB Hilfikon	23	21	10%	85.0	114.1	-25%	4'801	7'438	-35%
RB Rebacher	32	23	39%	157.4	165.2	-5%	17'898	36'974	-52%
RB Maiholz	25	26	-4%	74.5	63.6	17%	29'259	152'160	-81%
RB Buenzmatt	34	25	36%	119.4	137.1	-13%	96'121	203'620	-53%
RB Wolga	17	18	-6%	52.9	79.7	-34%	66'052	72'616	-9%

**Dynamische Regelung des Gesamtsystems (RTC450):** Wie oben beschrieben wird die Ausnutzung des vorhandenen Speichervolumen anhand von Füllständen maximiert, indem die Weiterleitmengen der in Abb. 1 rechts abgebildeten Anlagen in Echtzeit gesteuert werden. Dazu wurde das Gesamtsystem anhand massgeblicher Fleisszeiten (hier: 90 min, 60 min und 15 min) in 3 Subsysteme unterteilt. Für die Speichervolumina der Untersysteme wird der prozentuale Füllgrad in jedem Zeitschritt berechnet. Jede Anlage verwendet den Füllgrad der unterstrom liegenden Anlagen als Sollwert und die eigene Volumenausnutzung als Zustandsvariable. Die dynamische Anpassung der Weiterleitmengen wird unter Verwendung eines Proportional-Reglers implementiert.

## 4.2 Leistungsbeurteilung und Erfolgskontrolle

Die Leistung aller Strategien beurteilen wir wie nach den oben beschriebenen Metriken Entlastungsanzahl, -dauer, etc. Zur Erfolgskontrolle haben wir für alle Regenereignisse die Quartile von Volumen und Dauer berechnet, so dass jedes Ereignis in einer 4x4 Matrix mit 16 Kategorien eingeordnet werden kann (Abb. 1). Für die Regenserie haben wir anschliessend die Leistung von zwei unterschiedlich parameterierten selbst-adaptiven Reglern simuliert. In der Matrix werden dann zuerst die Anzahl Ereignisse mit Entlastung in der Beurteilungs-Periode sowie der Referenz-Periode eingetragen. Aufgrund der binomialen Verteilung lässt sich abschätzen, ob die Regelungs-Leistung in den zwei Stichproben gleich sind (Abb. 4, rechts). So geht nicht nur alleine die Grösse der beobachteten Entlastungs-Reduktion in die Bewertung ein, sondern auch die Grösse der zugrundeliegenden Stichproben.

## 5 RESULTATE: EINE DYNAMISCHE REGELUNG BRINGT EINE DEUTLICHE LEISTUNGSSTEIGERUNG UND EINE DIFFERENZIERTE ERFOLGSKONTROLLE SCHAFFT TRANSPARENZ

### 5.1 Leistungsbeurteilung der Regelungsstrategien

Abb. 3, links, zeigt die relative Verbesserung der Leistung des Entwässerungssystems in Bezug auf die Anzahl, die Dauer, das Entlastungsvolumen und die Entlastungsfracht. Alleine die Erhöhung des ARA Zulaufs reduziert Entlastungsvolumen und -frachten bereits deutlich (ca. 10-15%). Die dynamische Regelung zeigt insgesamt das grösste Verbesserungspotenzial mit bis zu ca. 20% geschätzter Reduktion für abwasserbürtige Schmutzstoffe. Interessant ist (Abb. 3, rechts), dass die dynamische Bewirtschaftung (RTC450) Entlastungen bei ca. 25% der kleinsten Ereignisse komplett vermeiden kann (rote Linie, 100%). Bei Ereignissen mit grossen Entlastungsvolumina ist die Leistung erwartungsgemäss sehr gering.

Tab. 2: Leistung der drei Regelstrategien relativ zu CSM 400

	CSM400	CSM450	Diff.	CSM450_SA	Diff.	RTC450	Diff.
Anz. Entlastungen [#]	432	421	-3%	450	+4%	416	-4%
Entlastungsdauer [h]	1'318	1'229	-7%	1'219	-8%	1'204	-9%
Entlastungsmenge [m3]	785'906	722'930	-8%	718'404	-9%	673'337	-14%
Entlastungsfracht [kg CSB]	21'352	18'400	-14%	18'378	-14%	16'722	-22%
Mittel			-8%		-10%		-12%

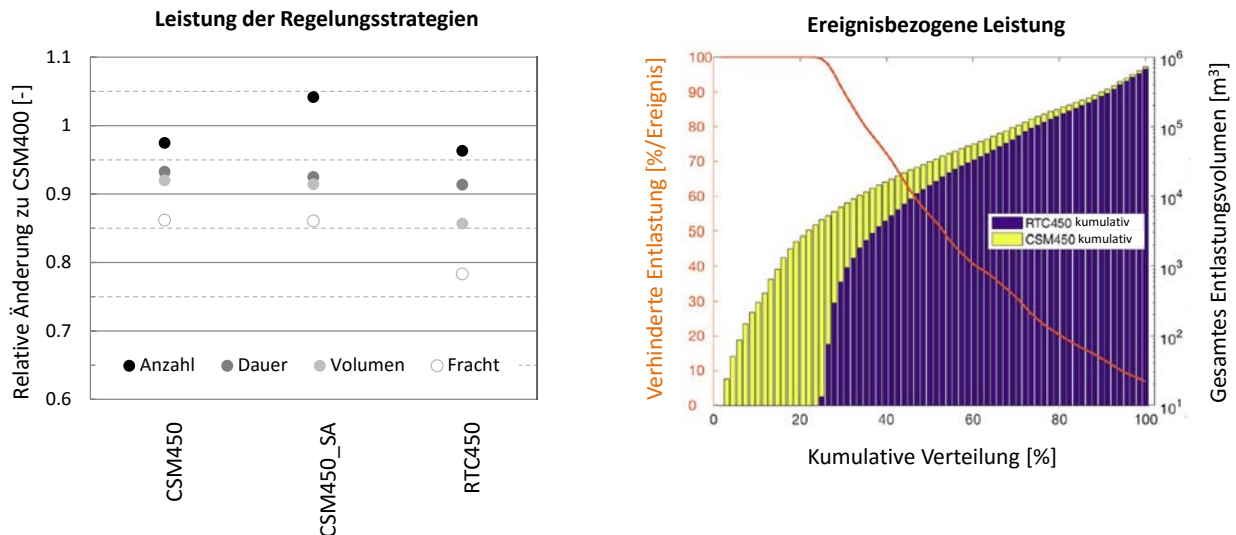


Abb. 3, links: Leistung der drei Regelstrategien in Bezug auf Entlastungsanzahl, -dauer, -volumen und -fracht (CSB). Die Verbesserung bewegt sich je nach Attribut im Bereich von ca. 5-20%. Es wird deutlich, dass eine integrierte Betrachtung von Netz und ARA in diesem Fall ähnlich effektiv ist, wie eine dynamische Regelung. Rechts: Die Analyse der ereignisbezogenen Leistung zeigt auf, dass eine dynamische Regelung (RTC450) im Vergleich zu der Variante mit erhöhtem ARA Zufluss (CSM450) bei ca. 25% der kleinsten Ereignisse Entlastungen komplett vermeiden kann (100% verhinderte Entlastungsmenge, rote Linie). Bei Ereignissen mit grossen Entlastungsvolumina ist die Leistung erwartungsgemäss sehr gering (<15% verhinderte Entlastungsmenge).

## 5.2 Erfolgskontrolle

Ein differenzierteres Bild ergibt die Erfolgskontrolle basierend auf Regen-Kategorien. Zum einen lässt sich klar erkennen, dass die Regelung CSM450\_SA2 für ganz kurze (Kategorie „Dauer 1“) und kurze („Dauer 2“) Ereignisse mit ganz kleinen („Volumen 1“) und kleinen Volumen eine eindeutige Verbesserung erzielt (kleine Werte zeigen an, dass die Leistungen nicht gleich sind). Für die grossen Ereignisse im oberen Quadranten ist kein Effekt erkennbar. Für die Ereignisse mit mittlerer Dauer und kleinen Volumen lässt sich aufgrund der geringen Anzahl Ereignisse nicht ausschliessen, dass es sich bei der Verbesserung um einen zufälligen Effekt handelt. Die Unterschiedliche Bewertung der Veränderung von 20/24 auf 12/24 (blau) zu 1/2 auf 0/2 (hellrot), zeigt, dass die Grösse der Veränderung relativ zur Stichprobengrösse beurteilt wird. Dieses lässt verlässlichere Aussagen zu.

In einem ersten Versuch haben wir für diese Analyse einen Fisher-test gewählt (Agresti, 2012, p. 57), wobei die Annahme der Unabhängigkeit nicht voll erfüllt ist. In zukünftigen Arbeiten sollte daher ein Verfahren gewählt werden, was Annahmen über die Verteilungen der Regen-Ereignisse vermeidet, z.B. mittels bootstrap-resampling. Dieses konnte aus Zeitgründen leider nicht implementiert werden. Unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass ein intermittierender Betrieb schneller zu belastbaren Ergebnissen führt, als wenn man das System permanent mit dem zu evaluierenden Regler betreibt und dann erst mit dem Zeitraum der Planung vergleicht. Wie oben beschrieben können so vor allem störende Einflüsse in Daten und System-Veränderungen kompensiert werden. Erste Schätzungen gehen davon aus, dass 2-3 Jahre intermittierender Betrieb ausreichend sein können. In jedem Fall sollte eine Erfolgskontrolle durch begleitende Simulationsstudien unterstützt werden.

## 6 SCHLUSSFOLGERUNGEN

In diesem Beitrag stellen wir einen praxistauglichen regelbasierten hierarchischen Algorithmus vor, der eine gute Bewirtschaftung von Abwassersystemen ermöglicht. Innovationen betreffen i) eine selbst-adaptive Komponente, die dafür sorgt, dass statische Weiterleitmengen automatisch langfristig an sinnvolle Werte angepasst werden, ii) eine hierarchische dynamische Regelung, die eine gleichmässige Auslastung des vorhandenen Speichervolumens erzielen kann, und iii) ein intermittierender Betrieb zur effizienten Leistungsbeurteilung. Am Beispiel einer integrierte Echtzeitsteuerung im Einzugsgebiet



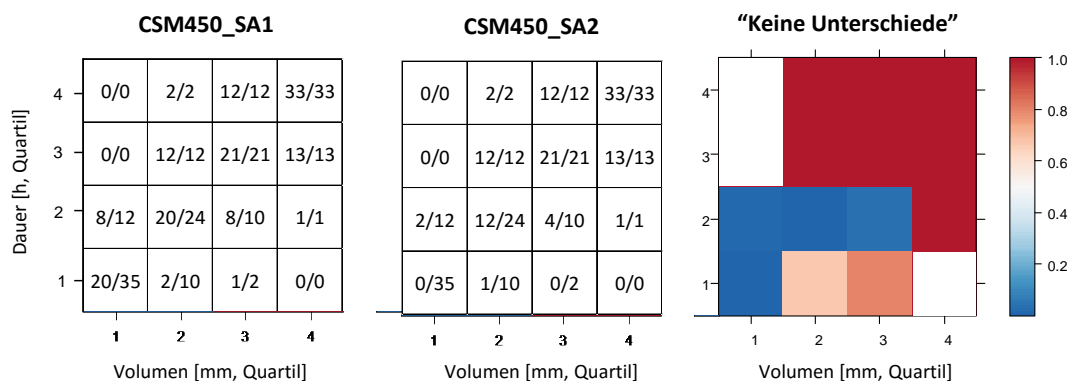


Abb. 4: Erfolgskontrolle der Reglers Anhang einer Regen-Kategorisierung und statistischen Analyse. Links: Anzahl von Ereignissen mit Entlastung pro Anzahl Ereignisse in einer bestimmten Kategorie (jeweils aufsteigend von 1-4) für die Variante CSM450. Mitte: Ereignisse mit Entlastung pro Ereignisse für die Variante CSM450\_SA. Rechts: Bewertung, ob keine Leistungsunterschiede zwischen den beiden Varianten vorliegen. Bei grösseren Werten (z.B. >0.2) kann man nicht ausschliessen, dass die Anzahl der Ereignisse mit Entlastung in beiden Reglern gleich sind. Bei sehr kleinen Werten <0.05 ist es wahrscheinlich, dass der beobachtete Effekt nicht zufällig ist. Im Gegensatz zu der herkömmlichen Beurteilung (Abb. 3, links) wird hier nicht nur die Grösse der Veränderung berücksichtigt, sondern auch die Anzahl der Ereignisse, resp. die Datengrundlage.

Wohlen-Villmergen, Schweiz, wird die Leistungsfähigkeit des Ansatzes anhand von Simulationen mit einem konzeptuellen Schmutzfrachtsimulationen gezeigt und ein Ansatz zur Erfolgskontrolle diskutiert. Unsere Resultate deuten darauf hin, dass eine dynamisch Regelung ca. 25% der Entlastungsereignisse verhindern kann. Die geschätzte Leistungssteigerung für Entlastungsmengen und -frachten wird zu ca. 10% geschätzt. Abschliessend lässt sich sagen, dass solche einfachen regelbasierten Algorithmen nicht die Leistungsfähigkeit von modellprädikativen Ansätzen erreichen. Sie können aber relativ einfach umgesetzt und unterhalten werden. Das macht sie auch für Betreiber mit wenig spezialisiertem Personal interessant.

## 7 DANKSAGUNG

Wir möchten uns ausdrücklich bei Michael Brögli und Rahel Waldvogel der Holinger AG für ihren Einsatz in diesem Projekt bedanken. Ausserdem bei Geri Heusi und Reto Bader der Chestonag Automation AG für grosse Unterstützung in Bezug auf die Steuerung des System und für die wertvollen Routinedaten. Danke auch an Stefan Irniger von der ARA Wohlen, der während dieses Projektes sein profundes Fachwissen mit uns geteilt hat. Weiterhin Danke an Michael Fuchs bei Monitron AG und Felix Frei vom AFU des Kantons Aargau für die Bereitstellung der wertvollen Informationen über Regendaten und die Einzugsgebiete Wohlen-Villmergen. Das Projekt wurde von der Umwelttechnologieförderung im Rahmen des INKA-Projektes zur integralen Regelung von Kanalnetz und ARA unterstützt (Ref-Nr.: REF-1011-05300, Vertr. Nr.: UTF 492.22.14/ IDM 2006.2423.488).

## 8 REFERENZEN

- Achleitner, S., Möderl, M., Rauch, W., 2007. CITY DRAIN © – An open source approach for simulation of integrated urban drainage systems. Environ. Model. Softw. 22, 1184–1195. doi:10.1016/j.envsoft.2006.06.013
- Agresti, A., 2012. Categorical Data Analysis, 3 edition. ed. Wiley, Hoboken, NJ.
- Dittmer, U., Alber, P., Seller, C., Lieb, W., 2015. Kenngrössen für die Bewertung des Betriebes von Regenüberlaufbecken. Presented at the Jahrestagung der Lehrer und Obleute der Kläranlagen- und Kanal-Nachbarschaften des DWA-Landesverbands Baden-Württemberg am 25./26. März 2015.
- Fiorelli, D., Schutz, G., Klepizewski, K., Regneri, M., Seiffert, S., 2013. Optimised real time operation of a sewer network using a multi-goal objective function. Urban Water J. 10, 342–353. doi:10.1080/1573062X.2013.806560
- Gresch, M., 2015. Das virtuelle Regenbecken - bezahlt aber nicht genutzt. Messpunkt - Kundenmagazin Hunziker Betatech 10/2015, 8–9.

- Krejci, V., Fankhauser, R., Gammeter, S., Grottker, M., Harmuth, B., Merz, P., Schilling, W., 1994. Integrierte Siedlungsentwässerung Fallstudie Fehraltorf. Dübendorf Eawag 1994 303 P Schriftenreihe Eawag Vol 8 ISBN 3-906484-09-2.
- Lacour, C., Schütze, M., 2011. Real-time control of sewer systems using turbidity measurements. Water Sci. Technol. J. Int. Assoc. Water Pollut. Res. 63, 2628–2632.
- Layer, M., Dittmer, U., Lieb, W., 2015. Emissionsorientierte Erfolgskontrolle basierend auf dem Betriebsverhalten von Behandlungsanlagen. Presented at the Aqua Urbanica, Stuttgart.
- Pabst, M., Beier, M., Rosenwinkel, K.-H., Schütze, M., Alex, J., Peikert, N., Niclas, C., 2010. Adaption und Entwicklung einer vorkonfigurierten Steuerungsbox zur Abflusssteuerung von Kanalnetzen. Korresp. Abwasser 57, 551–557.
- Rüdisüli, M., Gresch, M., Tinner, B., Rüdisüli, M., 2013. Gewässerschutz Imissionsorientiert - Erfahrungen aus Sicht Ingenieur. Aqua Gas.
- Schegg, S., 2016. Modern Receiving Water Protection Using an Integrated Control System. ETH, Zürich.
- Seggelke, K., Löwe, R., Beeneken, T., Fuchs, L., 2013. Implementation of an integrated real-time control system of sewer system and waste water treatment plant in the city of Wilhelmshaven. Urban Water J. 10, 330–341. doi:10.1080/1573062X.2013.820331
- Vezzaro, L., Grum, M., 2014. A generalised Dynamic Overflow Risk Assessment (DORA) for Real Time Control of urban drainage systems. J. Hydrol. 515, 292–303. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.05.019