

# Erweiterung einer Netzwerk-übergreifenden modellprädiktiven Reglung von einem sensitiven Abwassernetzwerk in Luxemburg: Erfahrungen und Ergebnisse

G. Schutz<sup>1,\*</sup>, D. Fiorelli<sup>2</sup>, A. Cornelissen<sup>1</sup>, und R. Schaack<sup>3</sup>

<sup>1</sup>RTC4Water, 9, avenue des Hauts-Fourneaux, L-4362 Esch-sur-Alzette

<sup>2</sup>LIST, 5, avenue des Hauts-Fourneaux, BELVAL, L-4362 Esch-sur-Alzette

<sup>3</sup>Le Syndicat Intercommunal de Dépollution des Eaux résiduaires du Nord (SIDEN), Bleesbruck, L-9359 Bettendorf

\*Email des korrespondierenden Autors: georges.schutz@rtc4water.com

**Kurzfassung** In früheren Arbeiten analysierten die Autoren die Nutzung der modellprädiktiven Regelung (MPC) mit einfachen linearen mathematischen Modellen im Zusammenspiel mit einer online mathematischen Optimierung zur Minimierung der Mischwasserentlastung in einem Kanalnetz bei Regenereignissen [1]. Die verwendete Zielfunktion versuchte, sowohl die hydraulische Last homogen über das Netz zu verteilen, als auch den Zulauf zur Kläranlage (KA) konstant zu halten [2]. Die verwendete Modellbeschreibung erlaubte eine lineare Beschreibung des Optimierungsproblems. Getestet wurde die Methode mittels Simulation eines zu dem Zeitpunkt im Bau befindlichen Kanalnetzes mit 24 Regenüberlaufbecken (RÜBs) in der Nordwestregion von Luxemburg [3]. Geplant und gebaut wurde das Kanalnetz durch den SIDEN. Die KA in Heiderscheidergrund wurde zusammen mit der ersten Stufe des Kanalnetzes in 2009 in Betrieb genommen. Die netzübergreifende prädiktive Regelung (Global Predictive Control oder GPC) wurde Juli 2013 operationell. Inzwischen ist auch die zweite Stufe des Kanalnetzes gebaut. Die erste Stufe (2009) enthielt acht RÜBs und die zweite Stufe (Februar 2016) weitere sechs. Zwei RÜBs sind derzeit noch im Bau und weitere sieben sind in der Planungsstufe. In diesem Artikel werden die Erfahrungen und Ergebnisse mit dem GPC während der Ausbaustufen des Systems vorgestellt. Vier Stufen werden unterschieden: (1) Parametrierung des RÜB im Regler-internen Modell mit Durchfluss null, (2) Statischer Durchfluss, (3) Gemessener Durchfluss des untersuchten RÜB aber ohne Kontrolle, (4) RÜB im Verbund.

*Schlagwörter:* Modellprädiktive Regelung, Kanalnetz, netzübergreifende prädiktive Regelung

## 1 EINLEITUNG

Der Haute-Sûre Stausee liefert Trinkwasser für einen erheblichen Teil der Bevölkerung von Luxemburg. Die Abwasserreinigung der Dörfer der Region rings um den Stausee, welche vorrangig im Mischsystem entwässerten, entsprach nicht mehr den geltenden Regeln, so dass nur teilweise geklärtes Abwasser in den Stausee gelang. Im Jahr 2003 beschloss die luxemburgische Regierung, in die Installation eines Mischsammlersystems an beiden Ufern des Sees zu investieren, welche in eine neu zu bauende, zentrale Kläranlage (Heiderscheidergrund oder HSG) entleert. Die bei Regenfällen unweigerlich eintretenden Überläufe der zahlreichen Regenüberlaufbecken in die Vorfluter belasten, auch bei normgerechter Auslegung, in dieser sensiblen Umgebung die Qualität der natürlichen Gewässer sowie die Qualität des Trinkwasserreservoirs. Mit dem Ziel, die Wasserqualität der Vorfluter weiter zu verbessern und in den guten Zustand (WWRL) zu versetzen sowie die Trinkwassergewinnung zu sichern, begann das Syndicat Intercommunal de Dépollution des Eaux résiduaires du Nord (SIDEN) die Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern (zuerst von Tudor, dann LIST und jetzt RTC4Water) zu entwickeln und einen Steuerungsansatz für das Kanalnetz zu implementieren, der die Überläufe, soweit wie möglich, reduziert.

Seitdem haben die Autoren die Nutzung einer modellprädiktiven Regelung (MPC) mit einfachen linearen mathematischen Modellen im Zusammenspiel mit einer online mathematischen Optimierung zur Minimierung der Mischwasserentlastung in einem Kanalnetz bei Regenereignissen [1] untersucht und optimiert. Die verwendete Zielfunktion versucht, sowohl die hydraulische Last homogen über das Netz zu verteilen als auch den Zulauf zur Kläranlage konstant zu halten [2]. Die verwendete Modellbeschreibung erlaubte eine lineare Darstellung des Optimierungsproblems. Getestet wurde die Methode vor der Inbetriebnahme mittels einer Simulationsumgebung des oben erwähnten Haute-Sûre Kanalnetzes mit 24 Regenüberlaufbecken (RÜBs), welches sich damals, und auch heute noch, zum Teil im Bau befindet. Der Einfluss der Teilziele sowie deren Gewichtung wurden analysiert und die Vorteile der Methode an Hand verschiedener Regenereignisse dargestellt. Des Weiteren wurde eine Möglichkeit zur Implementierung

dieser Methode vorgestellt. Die Kläranlage in Heiderscheidergrund wurde zusammen mit der ersten Stufe des Kanalnetzes in 2009 in Betrieb genommen. Die netzübergreifende prädiktive Regelung (Global Predictive Control oder GPC) wurde erstmals im Juli 2013 operationell.

Inzwischen wurde diese Methodik erweitert und wird für Kanalnetze sowie auch Trinkwasserverteilungssysteme benutzt. Die Kenntnisse sind vorhanden, um ein beliebiges Netzwerk in kürzester Zeit zu simulieren, eine Zielfunktion zu formulieren, einen GPC Controller zu bauen und zu installieren und Rückfall -und Notfallstrategien auf SPS Ebene zu implementieren. Die Forscher, die diese Vorgehensweise entwickelt haben, sind aus dem Forschungsinstitut ausgestiegen und haben eine Firma gegründet (RTC4Water), die diese Methodik kommerziell vermarktet.

Das bestehende Kanalnetz rings um den Haute-Sûre Stausee ist momentan mit 293 Variablen, 141 System-Variablen, 83 Kontroll-Variablen und 69 Zustands-Variablen beschrieben. Es hat einen prädiktiven Horizont von 2 Stunden und einen Optimierungszyklus von 10 Minuten. Acht RÜBs wurden bis Ende 2015 kontrolliert. Derzeit, im Juni 2016, sind 13 RÜBs im GPC-Verbund kontrolliert, 1 unkontrolliert, 1 RÜB ist im Bau, 1 ist hydraulisch noch nicht angeschlossen und schlussendlich sind 7 Becken noch in der Planungsstufe.

### Problemstellung

Eine mathematische Optimierung zu erhalten, die in einer Simulationsumgebung oder in einer perfekten realen Situation die RÜBs kontrolliert, ist wichtig, aber nur ein Bruchteil der kompletten Lösung, weil es in der Praxis viele Jahre dauert, um das vollständige System zu bauen und auch weil es in der Realität nie eine perfekte Situation gibt. Die meisten kleinen und auch größeren Schwierigkeiten, ein theoretisches Modell in der Praxis zu verwenden, wurden in den letzten Jahren bereits beseitigt, aber die Optimierung des Systems während der Bauphasen bleibt eine Herausforderung. Aus der GPC-Sicht können generell folgende Bauphasen eines RÜBs identifiziert werden:

**Stufe 0:** Das geplante RÜB ist noch nicht gebaut oder noch nicht am Kanalnetz angeschlossen

**Stufe 1:** Das Betone-Skelett des RÜB ist gebaut und das Bauwerk ist hydraulisch am Kanalnetz angeschlossen. Meistens ist der Auslaufschieber auch installiert, aber fest eingestellt und nur manuell benutzbar.

**Stufe 2:** Lokale Messgeräte, und vielleicht auch die SPS, sind installiert und übertragen Daten an ein SCADA System.

**Stufe 3:** Das neue RÜB kann via Fernwartung gesteuert werden (z.B. via das SCADA System oder eben auch vom GPC)

Natürlich gibt es ähnliche Probleme beim Bau von Leitungen und noch zusätzliche Probleme durch temporäre Lösungen sowie temporäre Pumpanlagen oder Engpässe, oft, weil Leitungen noch nicht vollständig fertig sind, z.B. weil eine Leitung unter einer Straße noch nicht erneuert ist. Es ist für den Verbundbetrieb unzulässig, dass in dieser Zeit der GPC überhaupt nicht funktioniert. Stattdessen muss der GPC fähig sein, so gut wie möglich mit den vorhandenen Daten das Gesamtsystem so zu regeln, dass trotz solcher einschränkenden Umstände das Potential der existierenden Infrastruktur ausgereizt wird.

### Zulauf zur Kläranlage

Der GPC versucht, den Zulauf zur Kläranlage möglichst konstant zu halten. Es benutzt dafür zwei Variablen ( $Q_{ref}/max\_HSG$ ), die dem Referenz- bzw. Maximal-Volumenstrom entspricht, welcher an die Kläranlage HSG angeliefert werden soll bzw. kann. Dem GPC ist es nicht erlaubt (es ist eine feste Randbedingung), über diesen Maximalwert hinaus zu gehen. Dieser Maximalwert ist von der Anzahl der im Betrieb befindlichen Straßen der KA sowie dessen Betriebszustandes abhängig; er beträgt für HSG  $180 \text{ m}^3/\text{h}$  in der aktuellen Ausbauphase. Der gewünschte Referenzwert,  $Q_{ref\_HSG}$ , ist eine weiche Randbedingung und kann vom Personal eingestellt werden, um operativ auf die hydraulische Situation der KA einzuwirken.  $Q_{max\_HSG}$  ist jedoch sehr schwer zu garantieren falls ein oder mehrere RÜBs sich in „Stufe 1“ befinden. Für diesen Fall muss man den maximalen Zulauf der unkontrollierten RÜBs so genau wie möglich einschätzen und vom  $Q_{max\_HSG}$  abziehen. Es gibt zwei gleichwertige Herausforderungen in diesem Kontext:

- I. Der Volumenstrom aus unkontrollierten RÜBs Richtung Kläranlage wird überschätzt: dadurch wird der restliche  $Q_{\text{max\_HSG}}$  unnötig klein, was im Extremfall zur Folge hat, dass die kontrollierten RÜBs immer überlaufen, aber auf jeden Fall früher als erwartet zum Überlauf kommen. Dieser Situation ist deutlich unerwünscht.
- II. Der Volumenstrom aus unkontrollierten RÜBs Richtung Kläranlage wird unterschätzt: dadurch ist es möglich, dass erheblich mehr als  $180 \text{ m}^3/\text{h}$  an der KA ankommen und dadurch unbehandeltes Abwasser vor der KA überläuft und im HSG Fall in die „Pollishing Ponds“ gelangt. Bei anderen Anlagen gibt es oft einen By-Pass, der dann anspringt und dadurch ungeklärtes Abwasser in den Vorfluter gelangt.

## Verteilung der hydraulischen Last

Wenn ein oder mehrere RÜBs sich in Stufe 2 befinden, ist die Situation zwar besser, aber kann noch immer zu erheblichen Problemen führen. Der GPC bekommt in diesem Fall Informationen über den Volumenstrom, der von diesen RÜBs in das Netz geleitet wird und kann dieses Volumen dynamisch berücksichtigen. Damit kann der GPC den Zulauf zur KA berechnen/abschätzen und ist in der Lage, den Maximalwert der Kläranlage einzuhalten. Der GPC ist jedoch nicht in der Lage, die hydraulische Last optimal zu verteilen, weil er die Schieber der RÜBs in Stufe 2 nicht kontrolliert. Dadurch gibt es im Extremfall Situationen, in welchen kontrollierte RÜBs vorzeitig überlaufen, was normalerweise durch den GPC verhindert wird: Falls RÜBs der Stufe 2 unverhältnismäßig viel Wasser zur KA weiterleiten, hat der GPC im schlimmsten Fall „Null“ oder sehr wenig Volumenstrom für die kontrollierten RÜBs übrig. Der Grund für eine solche Situation ist oft, dass auch die KA noch nicht auf ihrer optimalen Auslastung ist und mit einem reduzierten QMax gefahren wird bzw. die statischen Designeinstellungen für den Endausbau berechnet sind und oft keine Einstellungen für irgendwelche Zwischenstufen vorliegen.

## Das Verbundsystem

Im Trockenwetterabfluss ist jedes RÜB unkontrolliert und die Schieber völlig offen. Aber sobald die Zulauf-Vorhersage  $1.1 \times Q_{\text{maintenance}}$  (statische Designeinstellung) des RÜB überschreitet, oder das gestaute Volumen im RÜB mehr als 10% des Maximalvolumens erreicht, wird dieses RÜB in den GPC-Verbund aufgenommen. Der Schieber wird darauf durch das GPC kontrolliert, bis wieder Leerstand erreicht wird und der Durchfluss unter  $0.9 \times Q_{\text{maintenance}}$  des RÜB fällt. Der GPC berücksichtigt den Durchfluss der RÜBs, die nicht im Verbund sind, und zieht diese von  $Q_{\text{max\_HSG}}$  ab. Das Resultat ist, dass die RÜBs, die (noch) nicht im Verbund sind, ihren Durchfluss immer an die KA weiterleiten. Dies ist wichtig, weil dieser Durchfluss unverdünnt ist und daher generell am meisten verunreinigt ist.

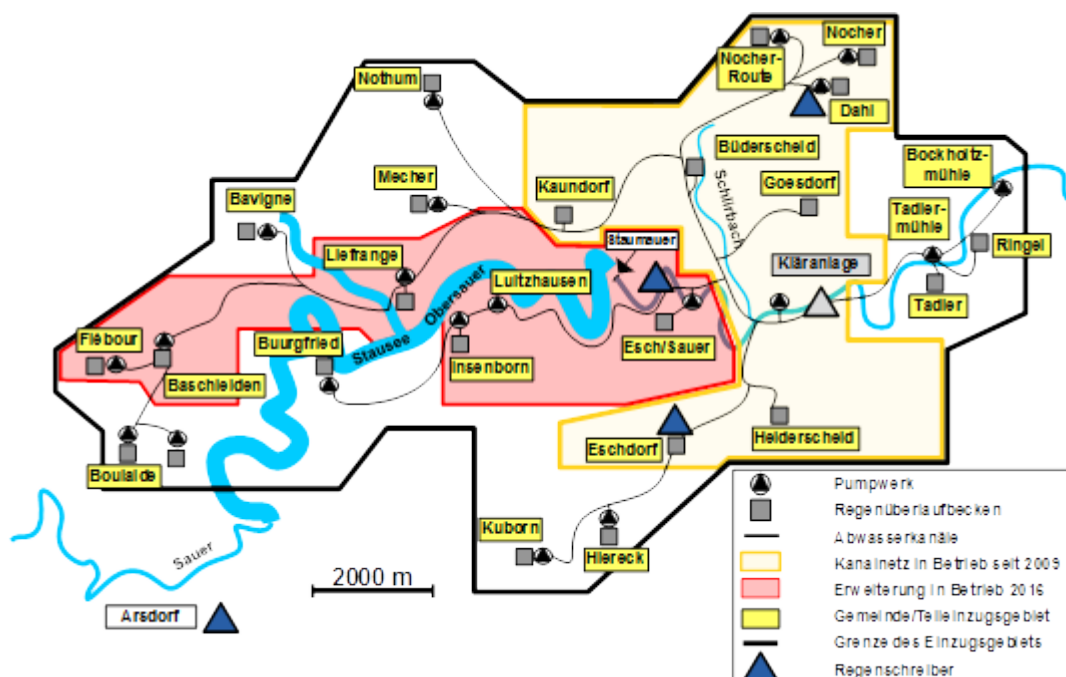
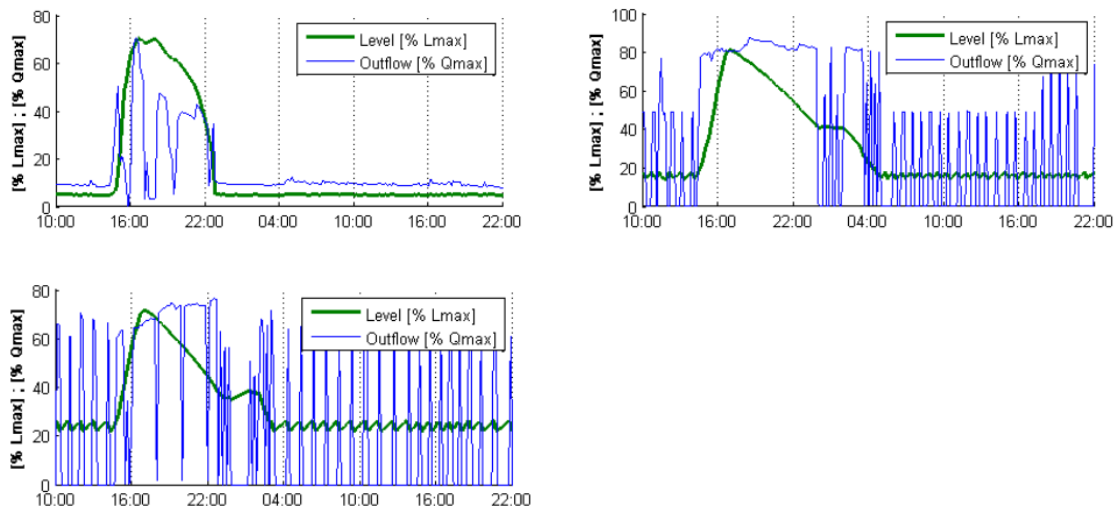


Bild 1: Schema des Kanalnetzes um den Stausee Obersauer. Ausbausituation Anfang 2016

## 1 RESULTATE

Mit dem Ziel die in dieser Publikation beschriebenen Problemfälle teilweise zu belegen, ist ein Regenereignis, vom 12. Oktober 2015 im Detail ausgearbeitet:



Diagrammen 1-3: Niveau (Level) und Ablauf (Outflow) der RÜBs Goesdorf (Links oben), Dahl (Rechts Oben) und Nocher-Route (Links-Unten)

Die Diagramme 1-3 illustrieren das Verhalten dreier kontrollierten RÜBs im Gesamtsystem (zu dem Zeitpunkt insgesamt 6 kontrollierte RÜBs). Ungefähr um 14:30 (12 Oktober 2015) fangen diese Becken an sich aufzufüllen (Sehe Niveau Werte). Um 22:00 ist Goesdorf wieder leer, ohne dass ein Überlauf stattgefunden hat. In dieser Periode hat der GPC den Ablauf von Goesdorf mehrmals eingeschränkt, um eine gleichmäßige netzwerkweite Auslastung zu gewährleisten und Überläufe zu vermeiden.

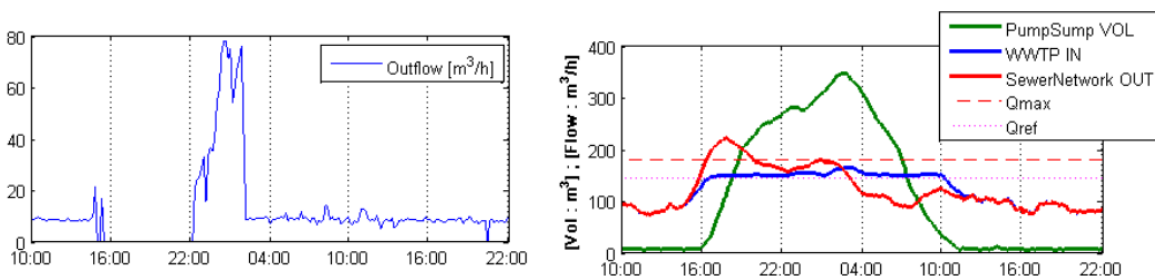


Diagramm 4 (Links): Ablauf (Outflow) des RÜB Kaundorf

Diagramm 5 (Rechts): Volumen im Pumpensumpf (PumpSump), Zulauf KA (WWTP), Ablauf des Kanalnetzes (SewerNetwork OUT), Qmax\_HSG und Qref\_HSG

Diagramm 4 zeigt den Ablauf eines RÜBs (Kaundorf), das zu dem Zeitpunkt in Wartung war, also unkontrolliert war, allerdings mit einem vom GPC berücksichtigten Ablauf. Das Ablaufventil des Behälters wurde während dem Regenereignis manuell geschlossen. Nach dem Regen wurde es wieder maximal geöffnet und gegen 3:00 Uhr war das Becken im autonomen Steuermodus (Stufe 2) mit konstantem Ablauf. Es ist nicht ersichtlich, ob ein Überlauf zwischen 16:00 und 22:00 stattgefunden hat, weil das Niveau in Kaundorf zu dem Zeitpunkt nicht gemessen wurde (Wartungsarbeiten).

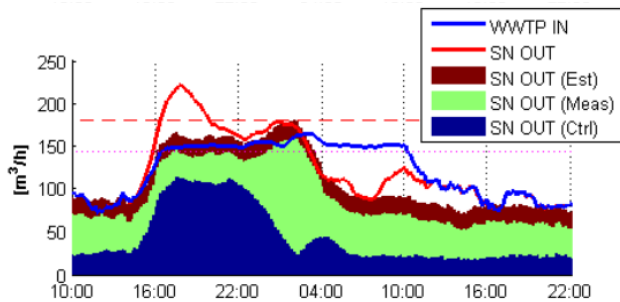


Diagramm 6: Zulauf KA (WWTP), Ablauf des Kanalnetzes (SN OUT), Ablauf den kontrollierten RÜBs des Kanalnetzes (SN OUT Ctrl), Ablauf den bemessenen RÜBs des Kanalnetzes (SN OUT Meas), Ablauf den ästimated RÜBs des Kanalnetzes (SN OUT Est),  $Q_{max\_HSG}$  und  $Q_{reference\_HSG}$

Diagramm 5 zeigt den Zustand im Zulauf des KA. Aus diesem Diagramm kann man sehen, dass das Volumen im Pumpensumpf sich drastisch erhöht. Dies ist das Resultat von unberücksichtigten Zuläufen (Unterschied zwischen Zulauf KA und kumulierten Abläufen des Kanalnetzes). Der Zulauf zum Pumpensumpf wird hier nicht gemessen, sondern aus der Volumenbilanz bestimmt.

Dies ist deutlicher, wenn der Ablauf in drei separate Teile aufgespalten wird (siehe Diagramm 6): (1) Der Volumenstrom der kontrollierten RÜBs (SN OUT Ctrl), (2) Der Volumenstrom der bemessenen RÜBs (SN OUT Meas) und (3) Der Volumenstrom der geschätzten RÜBs (SN OUT Est).

Aus Diagramm 6 kann beobachtet werden, dass um 16:00 und 22:00 am ersten Tag des Ereignisses der Volumenstrom aus unkontrollierten, nicht bemessenen RÜBs Richtung Kläranlage unterschätzt wird. Außerdem kann beobachtet werden, dass zwischen 22:00 (Tag 1) und 02:00 (Tag 2), das Entleeren der kontrollierten RÜBs deutlich eingeschränkt war, weil der unkontrollierte RÜB Kaundorf mit einem sehr großen Ablauf (75[m<sup>3</sup>/h]) manuell geleert wurde.

## 2 DISKUSSION

Die optimalen Schritte für die Erweiterung eines dynamisch bewirtschafteten Kanalnetzwerks sind:

1. Planung und Parametrierung der neuen RÜBs im GPC-Model. Diese RÜBs werden so parametrierung, dass sie zu dem Zeitpunkt vom GPC noch nicht betrachtet werden. Sie existieren zwar bereits im Model, der Durchfluss und das gespeicherte Volumen ist aber gleich null gesetzt.
2. Sobald eine der neuen RÜBs physikalisch existiert und hydraulisch am Netz angeschlossen ist, kann es im GPC mit einem realistischen statischen Durchfluss berücksichtigt werden. Dies ist die kritischste Stufe, weil der wirkliche Durchfluss unbekannt ist und die Gefahr besteht, dass kumulativ zu viel Volumen bei der Kläranlage ankommt bzw. zu viel Durchfluss angenommen wird und somit der restliche Verbund zu stark eingeschränkt wird.
3. Wenn die Messtechnik existiert und funktioniert, kann der reelle Durchfluss des neuen RÜB im GPC berücksichtigt werden, auch wenn diese Struktur vom GPC noch nicht geregelt werden kann. Es ist wichtig, dass der statische bzw. maximale Durchfluss von einem solchen RÜB unter Berücksichtigung des Gesamtkontextes festgelegt wird, weil sonst die Optimierungsmöglichkeiten des GPC unnötig eingeschränkt werden.
4. Wenn die vollständige Funktionsfähigkeit des RÜB zu Verfügung steht, kann dieses, nach einer geeigneten Test- und Validierungsphase, in den GPC-Verbund aufgenommen werden.

## 3 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Es wurde gezeigt, dass die Erweiterung einer Netzwerk-übergreifenden modellprädiktiven Regelung mit neuen RÜBs nicht trivial ist und dass teilweise unbefriedigende, nicht optimale Situationen geduldet werden müssen. Der GPC kann jedoch, mit Hilfe der Erweiterungsschritte, welche in der Diskussion beschrieben wurden, dennoch zufriedenstellend funktionieren und eine Optimierung der Überläufe herbeiführen. Hierbei sollten bei der Planung der Bauphasen versucht werden, die kritische Stufe (Bauwerk hydraulisch angeschlossen, aber noch keine Messtechnik verfügbar) so kurz wie möglich zu gestalten. Weiterhin soll hier noch einmal darauf hingewiesen werden, dass die statische Parametrierung



(Netzwerk Design) nicht nur für den Endausbau des Netzes durchgeführt wird, sondern auch strategische Erweiterungsphasen hierbei betrachtet werden sollen, damit jeweils realistische hydraulische Situationen berücksichtigt werden können.

#### 4 REFERENZEN

- [1] Henry E., Klepiszewski K., Fiorelli D., Solvi A.-M., Weidenhaupt A. : "Modelling of a sewage network: Contribution to the management of pollution risks at the Haute-Sûre drinking water reservoir" in Proceedings of the 10th International Conference on Urban Drainage (ICUD), Copenhagen, Denmark, 21st - 26th August 2005
- [2] Henry, E.; A. Boulay; Klepiszewski, K.; Fiorelli, D.; Weidenhaupt, A. : "Modélisation d'un réseau d'assainissement: Contribution à la gestion des risques de pollution de la réserve d'eau potable de la Haute-Sûre" in Proceedings de la conférence "Autosurveillance, diagnostic permanent et modélisation des flux polluants en réseaux d'assainissement urbains", ISBN 2-906831-62-X, 28-29 juin 2005, Marne-La-Vallee
- [3] Gillé S., Fiorelli D., Henry E., Klepiszewski K. : "Optimal Operation Of A Sewer Network" in Proceedings of the 11th International Conference on Urban Drainage (ICUD), Edinburgh, Scotland, 31st - 5th September 2008
- [4] Fiorelli D., Schutz G. : "Real-time control of a sewer network using a multi-goal objective function" in Proceedings of the 17th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED09), Thessaloniki, Greece, 24th - 26th June 2009
- [5] G. Schutz, D. Fiorelli, S. Seiffert, K. Klepiszewski. : "Optimierte Regelung eines Abwassernetzwerks Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen", november 17-18, 2009 Wuppertal, Deutschland
- [6] David Fiorelli, Georges Schutz, Kai Klepiszewski, Mario Regneri & Stefanie Seiffert : "Optimised real time operation of a sewer network using a multi-goal objective function", Urban Water Journal, Volume 10, Issue 5, 2013, Special Issue: Real Time Control of Urban Drainage Systems, pages 342-353. DOI: 10.1080/1573062X.2013.806560
- [7] David Fiorelli, Georges Schutz, Nataliya Metla and Joel Meyers. Application of an optimal predictive controller for a small water distribution network in Luxembourg. Journal of Hydroinformatics Vol 15 No 3 pp 625–633 © IWA Publishing 2013 doi:10.2166/hydro.2012.117