

**Entwicklung und Erprobung
eines Prozesssteuerungssystems
zur Funktions- und Kostenoptimierung
bestehender Abwasseranlagen
für kleine und mittelgroße Gebietskörperschaften
(Abwasser-PSS)**

- Abschlussbericht -

September 2011



**Technische Werke
Emmerich am Rhein GmbH (TWE)**

**Gefördert mit Mitteln des Landes Nordrhein-Westfalen vertreten
durch die Bezirksregierung Düsseldorf**

Abschlussbericht zum Vorhaben "Entwicklung und Erprobung eines lernfähigen Prozesssteuerungssystems zur Funktions- und Kostenoptimierung bestehender Abwasseranlagen für kleine und mittelgroße Gebietskörperschaften (Lernfähiges Abwasser-PSS)"

Gefördert mit Mitteln des Landes Nordrhein-Westfalen
aus dem Aufkommen im Rahmen der Abwasserabgabe, Kapitel 10 050 Titel 887 71

Vorhabenkennzeichen: 5247

Laufzeit: 30.04.2007 - 30.09.2011

Projektpartner und Verfasser des vorliegenden Berichts:

Technische Werke Emmerich am Rhein GmbH
Blackweg 40, 46446 Emmerich am Rhein
www.twe-emmerich.de
(Projektleitung: M. Antoni (ab 2009), J. Gisselmann (bis 2008))

Institut für Umwelttechnik und Management an der Universität Witten/Herdecke gGmbH
Alfred-Herrhausen-Straße 44, 58455 Witten
www.uni-wh-utm.de
(Projektleiter: Prof. Dr. Dr. K.-U. Rudolph)

FH Köln, Campus Gummersbach, Institut für Automation & Industrial IT
Steinmüllerallee 1, 51643 Gummersbach
www.fh-koeln.de/ait.de
(Projektleiter: Prof. Dr. M. Bongards)

Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Verfassern.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	6
1 Veranlassung.....	7
2 Projektziele	9
3 Abgrenzung zu vergleichbaren Projekten.....	11
4 Beschreibung des Entwässerungssystems der Stadt Emmerich.....	12
4.1 Entwässerungssituation	12
4.2 Entwässerungssysteme Elten, Hüthum, Stadtgebiet.....	14
4.2.1 Elten - Kanalnetz, RÜB Elten I und II.....	14
4.2.2 Hüthum - Kanalnetz	16
4.2.3 Innenstadt- und Außengebiete - Kanalnetz, MWPW und RÜB Rheinpromenade	16
4.3 Entwässerungssysteme der Industriegebiete.....	19
4.3.1 Allgemeines.....	19
4.3.2 Budberger Straße - Kanalnetz	19
4.3.3 Gewerbegebiet Ost - Kanalnetz, Regenwasserbehandlung Vorwerk	19
4.3.4 Duisburger Straße - Kanalnetz, RRB	21
4.3.5 Blackweg - Kanalnetz, Stauraumkanal.....	22
4.3.6 LDZ - Kanalnetz, Regenwasserbehandlung Stadtweide.....	23
4.4 Entwässerungssysteme im Einzugsgebiet Industriebahnhof.....	24
4.4.1 Allgemeines.....	24
4.4.2 Hafenstraße - Kanalnetz, RRB	25
4.4.3 Werftstraße - Kanalnetz, RRB.....	26
4.4.4 AKZO (Oleon)	26
4.4.5 Industriebahnhof - Kanalnetz, RRB.....	27
4.5 Nachrechnung des RRB Industriebahnhof.....	29
4.5.1 Veranlassung	29
4.5.2 Bemessung	29
4.5.3 Vergleich Ist-Situation mit Planungs-Situation	32
4.6 Beschreibung der Kläranlage	34
4.6.1 Situation	34
4.6.2 Einlaufgruppe	35
4.6.3 Vorklärung	35
4.6.4 Belebungsbecken.....	35
4.6.5 Nachklärung	36
4.6.6 Ablauf der Kläranlage	36
4.6.7 Hochwasserpumpwerk	36
4.6.8 Schlammbehandlung	36
4.6.9 Messungen.....	37

5	Anpassung des Entwässerungssystems für das Prozesssteuerungssystem	38
5.1	Anpassungsbedarf	38
5.2	Auswahl relevanter Sonderbauwerke	38
5.3	Bauliche Anpassungen	39
5.3.1	Bauliche Vorleistungen der TWE.....	39
5.3.2	Anbindung der Abwasserdruckrohrleitung an das RRB Industriehafen.....	41
5.4	Steuerungstechnische Anpassungen	43
5.4.1	Steuerungstechnische Vorleistungen der TWE	43
5.4.2	Datenübertragung	44
5.5	Messtechnik.....	45
5.5.1	Überblick.....	45
5.5.2	Definition der Durchflussmessungen	45
5.5.3	Definition der Frachtmessungen.....	48
5.5.4	Selbst entwickelter Messbehälter für CSB-Messungen in Rohabwasser.....	51
5.5.5	Niederschlagsmessgeräte.....	53
6	Komplettierung und Vereinfachung der Simulationsmodelle.....	54
6.1	Hydrodynamisches Simulationsmodell Modell in HYSTEM-EXTRAN.....	54
6.1.1	Einsatz des Programmes HYSTEM-EXTRAN	54
6.1.2	Modellierung der Einzugsgebiete von Emmerich	54
6.1.3	Implementierung der Regenbecken	58
6.1.4	Regendaten	59
6.1.5	Kalibrierung der Teilnetze.....	61
6.2	Modell in MATLAB/Simba	67
6.2.1	Anwendung der Simba-Software.....	67
6.2.2	Kalibrierung und Vereinfachung des hydrodynamischen Simba-Modells	68
7	Erarbeitung des Prozesssteuerungssystems	72
7.1	Einleitung regelungstechnische Regelungsansätze.....	72
7.2	Auswahl relevanter Komponenten im Entwässerungsnetz.....	73
7.2.1	Auswahl der Entwässerungskomponenten	73
7.2.2	Anpassung der hydraulischen Funktionsweise der einzelnen Entwässerungskomponenten	74
7.3	Auswahl des Regelungssystems für den hydraulischen Anteil.....	82
7.4	Erläuterung des Agentensystems.....	83
7.4.1	Definition Agentensystem	83
7.4.2	Agentenmodelle.....	85
7.4.3	Entwicklungsansatz des Agentensystems.....	90
7.4.4	Physikalische Randbedingungen des Agentensystems	93
7.4.5	Preisfunktion	93
7.5	Entwicklung der Frachtkomponente des PSS.....	103
7.5.1	Verfügbare Eingangsdaten und Analyse der Messwerte	105
7.5.2	Beschreibung des Frachtreglers.....	106

8	Umsetzung des Prozesssteuerungssystems in Emmerich	112
8.1	Einbindung des Kanalnetzsteuerungssystems in vorhandene Infrastruktur und zentrales Prozessleitsystem.....	112
8.2	Datenübertragung und Kommunikationsüberwachung	113
8.3	Interne Sicherheitsmechanismen des Prozesssteuerungssystems	115
9	Technische Bewertung des Prozesssteuerungssystems.....	116
9.1	Bewertung der technischen Umsetzung	116
9.1.1	Messtechnik.....	116
9.1.2	Datenübertragung	118
9.1.3	Kommunikations- und Regelstreckenüberwachung.....	118
9.1.4	Wahl des Reglersystems.....	120
9.1.5	Einbindung des Reglersystems.....	122
9.2	Hydraulischer Einfluss des PSS auf das Entwässerungssystem.....	122
9.3	Hydraulische und frachtmäßige Betrachtung des Kläranlagenbetriebs	124
9.3.1	Qualitativer und quantitativer Ansatz.....	124
9.3.2	Beschreibung des Ist-Zustands	125
9.3.3	Einfluss des Agentensystems	127
9.3.4	Frachtmäßige Betrachtung des Kläranlagenbetriebs	129
9.4	Umweltentlastung.....	130
10	Ökonomische Aspekte	133
10.1	Einführung.....	133
10.2	Datenlage.....	134
10.3	Vergleich von Regenereignissen mit und ohne Prozesssteuerungssystem	135
10.4	Bewertung monetärer Aspekte	138
10.5	Bewertung nichtmonetärer Aspekte	143
10.6	Fazit.....	145
11	Zusammenfassung und Gesamtbewertung	147
11.1	Ausblick	150
	Literatur.....	152

Anlagen

- Anlage 1: Lageplan mit Einzugsgebieten
- Anlage 2: Entwässerungsfließbild
- Anlage 3: Einzugsgebiet RRB Industriehafen
- Anlage 4: Fließbild RRB Industriehafen
- Anlage 5: Lageplan Kläranlage
- Anlage 6: Fragebogen für die Dokumentation von Forschungsvorhaben in der Umweltforschungsdatenbank UFORDAT®

Abkürzungsverzeichnis

AFS	Abfiltrierbare Stoffe
ASK-Wehr	Automatisches schwimmergesteuertes Klappen-Wehr
BSB	Biologischer Sauerstoffbedarf
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DN	Diameter Nominal (Nennweite)
DSL	Digital Subscriber Line
DWD	Deutscher Wetterdienst
EMSR	Elektrisches Messen, Steuern und Regeln
EW	Einwohnerwert
EZG	Einzugsgebiet Magnetisch-induktives Durchflussmessgerät
GEP	Generalentwässerungsplan
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
IEEM	Institut für Umwelttechnik und Management an der Universität Witten/ Herdecke gGmbH
KA	Kläranlage
KOSTRA	Koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertungen
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
LDZ	Logistisches Dienstleistungszentrum
LF	Leitfähigkeit
MID	magnetisch-induktives Durchflussmessgerät
MWPW	Mischwasserpumpwerk (hier: das Mischwasserpumpwerk Rheinpromenade)
NH ₄ -N	Ammonium
NO _x	Nitrat, Nitrit
OPC	Open Process Control
PLS	Prozessleitsystem
PO ₄ -P	Orthophosphat
PSS	Prozesssteuerungssystem
PW	Pumpwerk
RKB	Regenklärbecken
RRB	Regenrückhaltebecken
RÜB	Regenüberlaufbecken
RZB	Regenzyklonbecken
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
T	Temperatur
TWE	Technische Werke Emmerich am Rhein GmbH
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System

1 Veranlassung

Derzeit werden Entwässerungssysteme hauptsächlich nach statischen Konzepten betrieben, bei denen Regenbecken einen festgelegten maximalen Drosselabfluss aufweisen, ohne den Belastungszustand der angeschlossenen Kläranlage zu berücksichtigen. Die vorhandene hydraulische Gesamtkapazität in solchen Systemen wird nur teilweise ausgenutzt. Um die gesetzlichen Vorgaben für den Gewässerschutz einzuhalten, werden steigende Anforderungen meist durch den Bau von weiterem Rückhaltevolumen gelöst, mit der Folge entsprechender Investitionskosten.

Bedingt durch den raschen Technologiefortschritt bei der Online-Erfassung und Verarbeitung von Abwasserdaten, bei der integrierten Prozesssteuerung und den Steuerungssystemen für Abwasserkanalsysteme, Regenbecken und Kläranlagen kann der Einsatz moderner und innovativer Steuer- und Steuerungstechnik einen wichtigen Beitrag leisten, um vorhandene Speichervolumen in Regenbecken und Kanalnetz für ein gezieltes Abflussmanagement mit Blick auf eine Optimierung des Kläranlagenzuflusses besser zu nutzen. Optimierungsansätze ergeben sich vor allem für den Fall von kleineren bis mittleren Niederschlagsereignissen, wenn Regenüberlaufbecken nur teilgefüllt werden. Dabei wird der Abwasserabfluss bedarfsweise auf mehrere Regenbecken verteilt und zwischengespeichert, um insbesondere den ersten Frachtstoß bei Regenereignissen zurückzuhalten und andererseits Stoßbelastungen der Kläranlage verringern zu können.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts sollte für diesen Anwendungsfall am Beispiel der Abwasserentsorgung in Emmerich am Rhein ein neues Automatisierungskonzept zur Optimierung der Abflusssituation mittels eines innovativen Prozesssteuerungssystems (PSS) für mittelgroße Gemeinden entwickelt und demonstriert werden.

Die Kläranlage der Stadt Emmerich am Rhein mit einer Ausbaugröße von 195.000 EW und einem industriellen Anteil am Abwasserzufluss von ca. 80 % wird regelmäßig durch hydraulische und frachtmäßige Spitzen belastet. Aufgrund der topografisch flachen Lage des Entwässerungsnetzes mit mehreren direkt zur Kläranlage fördernden Pumpwerken steigt im Regenwetterfall der Zulauf zur Kläranlage innerhalb weniger Minuten um ein Vielfaches, was speziell zu Beginn eines Regenereignisses zu Betriebsproblemen auf der Anlage führen kann. Ursächlich sind sowohl hydraulische als auch frachtmäßige Stoßbelastungen, z. B. nach einer längeren Trockenperiode. Diese Situation soll durch eine Vergleichmäßigung des Kläranlagenzulaufs verbessert werden.

Im Jahr 2004 wurde von der für die Abwasserentsorgung zuständigen Technischen Werke Emmerich am Rhein GmbH (TWE) damit begonnen, die Leit- und Steuerungstechnik auf der Kläranlage und den Außenstationen (Pumpwerke und Sonderbauwerke) zu erneuern. Dabei wurden die technischen Voraussetzungen berücksichtigt, um das Entwässerungsnetz und die

Kläranlage online im Verbund betreiben und die Abflusssituation durch ein integriertes Steuerungssystem verbessern zu können.

Zur Entwicklung eines geeigneten Systems wurde von der TWE in Zusammenarbeit mit dem Institut für Umwelttechnik und Management an der Universität Witten/Herdecke gGmbH (IEEM) und der Fachhochschule Köln, Campus Gummersbach, Institut für Automation & Industrial IT im März 2007 ein Förderantrag beim Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (jetzt Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz) des Landes Nordrhein-Westfalen eingereicht, auf den im April 2010 von der Bezirksregierung Düsseldorf ein Zuwendungsbescheid erteilt wurde (Az. 54.173/25 - 5247).

2 Projektziele

Im Rahmen des vom Land Nordrhein-Westfalen geförderten Projekts soll ein neues Prozesssteuerungs- bzw. -regelungssystem (PSS) zur Nutzung von Speichervolumen in vorhandenen Regenbecken für eine Verbesserung der Abflusssituation im Emmericher Entwässerungsnetz und eine Vergleichmäßigung des Kläranlagenzuflusses entwickelt und demonstriert werden. Das System soll so ausgelegt sein, dass es auch auf andere Entwässerungsnetze vergleichbarer Größenordnung übertragbar ist.

Für die Erarbeitung des Systems sind sinnvolle Steuergrößen für das Abwassersystem zu definieren und es ist zu ermitteln, welche Anlagenteile unter Berücksichtigung von technischen, ökologischen und genehmigungsrechtlichen Randbedingungen durch eine intelligente Steuerung besser genutzt werden können. Neben einer hydraulischen und frachtmäßigen Vergleichmäßigung des Kläranlagenbetriebs sollen u. a. auch Potentiale für einen wirtschaftlicheren Gesamtbetrieb und die Steigerung der Betriebssicherheit untersucht werden.

Die Umsetzung ist in Form eines neuartigen, sehr flexiblen und lernfähigen Steuerungssystems auf Basis von Softwareagenten ("Agentensystem") vorgesehen, das zum ersten Mal im Bereich des Abwassermanagements eingesetzt wird.

Laut Projektantrag sind bei der Entwicklung des Prozesssteuerungssystems u. a. folgende Ziele und Anforderungen zu berücksichtigen:

- 1) Erarbeitung eines robusten, lernfähigen Steuerungssystem mit selbständiger Anpassung an Veränderungen von Eingangs- und Zustandsgrößen.
- 2) Optimierung, d. h. Vergleichmäßigung des Kläranlagenzuflusses entsprechend der hydraulischen und frachtmäßigen Belastungssituation sowie eine damit verbundene Verbesserung der Betriebsstabilität der Kläranlage.
- 3) Minimierung der Gewässerbelastung aufgrund von Mischwassereinleitungen durch Verringerung von Abschlagshäufigkeiten und -frachten aus Regenbecken zur Entlastung der schwachen Vorfluter im Stadtrandbereich.
- 4) Optimale Nutzung des vorhandenen Speichervolumens im Kanalnetz und in den Sonderbauwerken, wobei für jeden Betriebszustand eine optimale Regelstrategie automatisch ausgewählt wird.
- 5) Zentrale Zusammenfassung, Archivierung und Verarbeitung aller Daten der abwassertechnischen Anlagen (auch im Sinne der SÜwV Kan und SÜwV-kom).
- 6) Übertragbarkeit des entwickelten Systems auf andere Kommunen gleicher Größenordnung.

Neben den genannten technischen und ökologischen Aspekten sollen auch die wirtschaftlichen Wirkungen durch den Einsatz der modernen Automatisierungstechnik auf die angestrebten Reduzierungen von Kosten für den Bau von weiterem Retentionsvolumen bzw. auf langfristig geplante Neubau- und Modernisierungsmaßnahmen untersucht werden.

Wie sich im Projektverlauf gezeigt hat, stehen die o. g. Ziele der Vergleichmäßigung des Kläranlagenzuflusses und der Senkung der Entlastungsrate aus den Regenbecken in Konkurrenz bzw. sind sogar konträr, da beide jeweils zusätzliches Regenbeckenvolumen beanspruchen. Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wurde die Vergleichmäßigung des Kläranlagenzuflusses daher als vorrangig definiert, da hier die größten Optimierungspotentiale in der Gesamtabwägung gesehen wurden.

3 Abgrenzung zu vergleichbaren Projekten

Für den Bereich der Steuerung und Regelung von Abwassernetzen gab es in den letzten Jahren mehrere interessante Forschungsvorhaben. Für Nordrhein-Westfalen sind z. B. zu nennen:

- Projekt beim Wasserverband Eifel-Ruhr (WVER),
- Projekt "KANNST" beim Aggerverband,
- Projekt beim Ruhrverband mit der Kläranlage Oelbachtal.

Die genannten Projekte sowie das vorliegende Projekt "Emmerich Abwasser-PSS" verfolgen grundsätzlich eine ähnliche Zielstellung: den optimierten Betrieb des Abwasserkanalnetzes inklusive der Sonderbauwerke.

Die wesentliche Abgrenzung zu den anderen Projekten stellt die Wahl der Steuer- bzw. Regelungsmethode dar. Nach ersten Voruntersuchungen im vorliegenden Projekt wurde festgestellt, dass die in Kapitel 2 benannten Projektziele mit Hilfe konventioneller Steuerungsansätze nicht optimal umgesetzt werden können. Dies gilt insbesondere für die Übertragbarkeit auf andere Kanalnetze, die sich aufgrund der Komplexität beispielsweise von Neuro-Fuzzy-Systemen als problematisch darstellt. Eine Anpassung eines solchen Reglers auf ein anderes Kanalnetzsystem ist nur mit einem sehr hohen Zeit- und Arbeitsaufwand möglich.

Nach gründlicher Analyse von Alternativstrategien (Hilmer, 2008; Hilmer, Bongards, 2008; Pabst et al, 2009) wurde die Umsetzung mit Hilfe eines Softwareagentensystems als beste Methode ermittelt.

Ihren Ursprung haben Softwareagentensysteme im Forschungsbereich der Künstlichen Intelligenz. In der Praxis kommen solche Systeme bisher vorrangig in der Industrie (z. B. in der Lagerhaltung) oder in der Wirtschaft zum Einsatz. In der Abwassertechnik stellt der Einsatz eines Softwareagentensystems einen sehr innovativen Ansatz dar, der in dieser Form noch nicht umgesetzt wurde.

Weitere Angaben zur Auswahl der Regelungsmethode sind in Kapitel 7 gegeben.

4 Beschreibung des Entwässerungssystems der Stadt Emmerich

4.1 Entwässerungssituation

Die Stadt Emmerich am Rhein liegt im Kreis Kleve im Westen Nordrhein-Westfalens an der niederländischen Grenze. Sie ist in mehrere separate Ortsteile gegliedert, in denen ca. 30.000 Einwohner leben. Das Stadtbild ist geprägt durch die Lage der Innenstadt am Rhein, die sich daran anschließenden Hafenanlagen und die Straßenbrücke nach Kleve auf der anderen Rheinseite. Wirtschaftlich von Bedeutung sind die zahlreichen Betriebe der Chemie- und der Lebensmittelindustrie, die auch einen wesentlichen Anteil an der Abwasserlast beitragen.

Das Gelände weist kaum Gefälle auf, es sind aber im Stadtgebiet einige für das Entwässerungssystem maßgebliche Senken vorhanden. Nur im Stadtteil Elten erhebt sich der "Eltener Berg", der größere Gefälle im Entwässerungsnetz zur Folge hat.

Vorfluter des Stadtgebietes sind neben dem Rhein im Süden, im Nord-Westen die Wild und im Osten die Löwenberger Landwehr, die beide über weitreichende Grabensysteme verfügen, mit denen Oberflächen- und Grundwasser dem Rhein zugeleitet werden. Für Hochwasserzeiten sind beide Gewässer mit Schöpfwerken ausgestattet.

Die Stadt gliedert sich entwässerungstechnisch in fünf Einzugsbereiche (siehe Anlage 1):

- die **Innenstadt** "Zwischen den Wällen" mit den außerhalb der früheren Wallanlagen (heute Bundesstraße B 8) liegenden Außengebieten, die im Mischsystem entwässern,
- den westlich gelegenen Ortsteil **Elten**, der ebenfalls ein Mischsystem besitzt,
- dazwischen die lockerbesiedelten Ortsteile **Hüthum** und **Borghees** mit einem Schmutzwasserkanalsystem, das Regenwasser wird ortsnah versickert oder in offenen Gräben abgeleitet,
- die östlich und südöstlich an die Außengebiete anschließenden **Industriegebiete**, die auch den Hafen umfassen und mit Misch- bzw. Trennsystemen erschlossen sind sowie
- entlang der B8 nach Südosten die Ortsteile **Vrasselt**, **Praest** und **Dornick**, in denen das Schmutzwasser in Drucksystemen abgeleitet wird. Das Regenwasser versickert ortsnah oder wird in offenen Gräben gefasst.

Aufgrund des flachen Geländes wird das gesamte Abwasser der Stadt über Druckrohrleitungen dem Klärwerk zugeführt, das wegen des hohen Industrieanteils eine Ausbaugröße von 195.000 EW besitzt. Der Ablauf wird in den Rhein eingeleitet.

Das gesamte Entwässerungsnetz wird von der Technische Werke Emmerich am Rhein GmbH (TWE) bewirtschaftet, einer Tochtergesellschaft der Gelsenwasser AG und der Stadt Emmerich am Rhein. Sie ist für den Betrieb aller Abwasseranlagen der Stadt sowie deren Planung, Bau und Finanzierung verantwortlich.

Die TWE bewirtschaftet neben der biologischen Kläranlage ein Kanalnetz mit einer Länge von rd. 228 km. Hiervon entfallen rd. 139 km auf Freispiegelkanäle und etwa 76 km auf ein Druckentwässerungssystem mit mehr als 500 Kleinpumpstationen sowie weitere 13 km Regenwasserkanäle zur Straßentwässerung. Des Weiteren werden vier Regenüberlaufbecken, fünf Regenrückhaltebecken und ein Stauraumkanal von der TWE betreut.

Die Entwässerungsstruktur zeigt das Fließbild in Anlage 2. Das Mischwasserkanalnetz Elten besitzt ein zentrales Pumpwerk, das über eine Doppeldruckrohrleitung an das Mischwasserpumpwerk Rheinpromenade (MWPW) angeschlossen ist, sowie zwei RÜB für die Abflussspitzen bei Regenwetter. In die Doppelleitung fördert auch das Schmutzwasserpumpwerk von Hüthum/Borghees.

In dem Mischwasserpumpwerk Rheinpromenade vereinigen sich die Teilströme aus dem Mischwasserkanalnetz der Innenstadt und der Außengebiete, der Ortsteile Elten, Hüthum, Borghees sowie aus dem westlich der Stadt gelegen Chemiestandort (früher Uniqema). Die zusammengeführte Abwassermenge wird dann entlang der Rheinpromenade zur 3,2 km entfernten Kläranlage gepumpt. Auf dem Weg zur Kläranlage sind drei Regenrückhaltebecken sowie eine weitere Pumpstation aus dem Hafengebiet angeschlossen. Zwei hier ansässige Unternehmen leiten ihr Abwasser mit einem separaten Pumpwerk zur Kläranlage.

Das Misch- bzw. Schmutzwasser der Industriegebiete im Osten der Stadt wird jeweils in Regenrückhaltebecken aufgefangen und über eigene Pumpwerke der Kläranlage zugeführt. Das Schmutzwasser der häuslichen Drucksysteme im Südosten der Stadt wird ebenfalls direkt in die Kläranlage gepumpt.

Etliche kleine Pumpwerke entsorgen am Rand der Stadt liegende Streubebauungen in die Freispiegelkanalsysteme. Als größte Anschlüsse sind das Kasernengelände und das Wasserverk zu nennen. In beiden Fällen ist durch geplante Umbaumaßnahmen zukünftig mit wesentlich geringeren Wassermengen zu rechnen.

4.2 Entwässerungssysteme Elten, Hüthum, Stadtgebiet

4.2.1 Elten - Kanalnetz, RÜB Elten I und II

Kanalnetz

Der Ortsteil Elten ist räumlich eingeschlossen von der BAB A 3 im Norden und Osten, der Bahnlinie Arnheim-Oberhausen, dem Gewässer "Die Wild" im Westen sowie dem Eltener Berg im Süden. Im flacheren Teil liegt die Geländehöhe bei etwa 18 m ü. NN, auf dem Eltener Berg bei 82 m ü. NN.

Das Siedlungsgebiet ist deutlich vom Emmericher Stadtgebiet abgetrennt und hat ein eigenständiges Abwasserkanalnetz. Im Ortsteil überwiegt lockere Bebauung von dörflicher Struktur mit kleineren Häusern und Gartenflächen; im Kernbereich liegt max. dreigeschossige, geschlossene Bebauung vor. Hinzu kommen Sonderflächen wie Gewerbegebiet, Schule, Altenheim, Marktplatz und Park. Derzeit leben knapp 4.700 Einwohner in Elten.

Das Kanalnetz wurde als Mischwassersystem errichtet; lediglich ein kleiner Teil in Hochelten wurde als Trennsystem gebaut. Neue Baugebiete werden mit Schmutzwasserkanälen erschlossen und das Regenwasser in eigenen Systemen gesammelt und ortsnah versickert. Das Eltener Netz umfasst 27,9 km Kanalisation im Freigefälle und 22,9 km Druckrohrleitungen und entwässert 152,7 ha, von denen 34,0 ha abflusswirksam sind. Die längste Fließzeit im System von Elten beträgt 30 Minuten.

Im Netz befindet sich ein Regenrückhaltekanal in der Von-Bodelschwingh-Straße in der Dimension DN 1200 bis DN 1400 mit Schwallspülung, dessen Stauvolumen 270 m³ beträgt. Dieser Stauraumkanal ist mit einem steuerbaren Schieber ausgerüstet, der bei Starkregenereignissen schließt und verhindert, dass die Spitzenabläufe aus zwei Teileinzugsgebieten sich überlagern und einen Überstau verursachen.

Mit vier Schmutzwasserpumpwerken ist die in den Randbereichen liegende Bebauung angeschlossen.

Hauptpumpwerk und RÜB Elten I (Zyklonbecken) und II (Erdbecken)

Am Tiefpunkt des Mischsystems sind das Hauptpumpwerk und zwei Regenüberlaufbecken angeordnet. Das Abwasser läuft in den Pumpensumpf des Hauptpumpwerks mit drei Unterwasserpumpen (2+1), die es durch zwei Druckrohrleitungen DN 250 bis zum Pumpwerk Rheinpromenade fördern. Bei Trockenwetter fördert eine Pumpe auf eine Druckrohrleitung, bei Regenwetterzufluss wird eine weitere Pumpe und die andere Druckrohrleitung zugeschaltet.

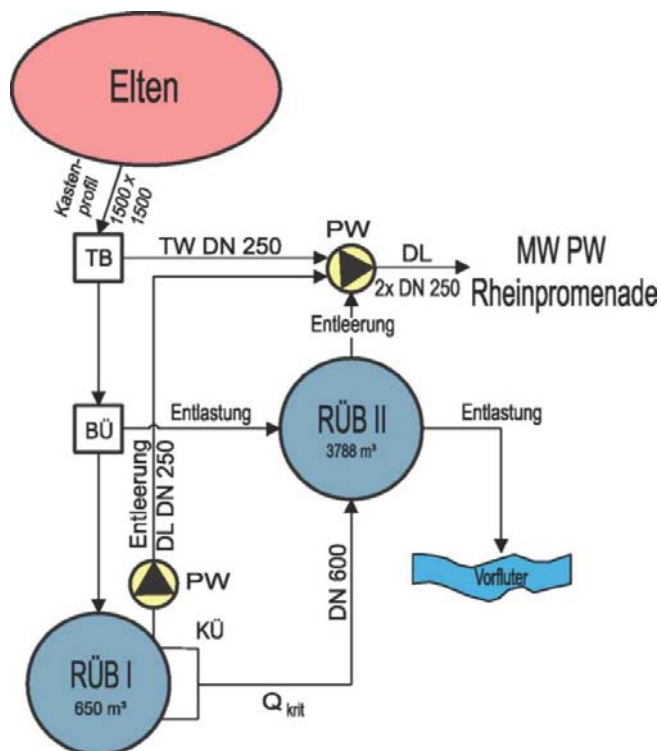


Abbildung 1: Fließschema RÜB Elten I und II

Die RÜB I und II sind erforderlich, damit die Entwässerung des besiedelten Bereichs auch bei Starkregenereignissen und hohem Pegel von Rhein und dem Vorfluter Wild gewährleistet bleibt. Die Auslegung erfolgte nach deutschem und niederländischem Recht, da die Wild, in die abgeschlagen wird, auf niederländischem Hoheitsgebiet liegt.

Bei steigendem Zufluss im Regenwetterfall füllt sich zunächst das RÜB I, das als Zyklonbecken ausgebildet ist und über ein Nennvolumen von 650 m³ verfügt.

Im Becken wird das Abwasser von einem Tauchmotorrührwerk in Rotation gehalten, um die Feststoffe in der Beckenmitte zu konzentrieren. Die Entleerung des Beckens erfolgt durch ein Pumpwerk in Beckenmitte, welches das Abwasser zum Hauptpumpwerk fördert. Sollte der Wasserstand im Becken weiter ansteigen, schlägt das Becken über einen Klärüberlauf in das 3.788 m³ große Erdbecken ab. Bei extremen Starkregenereignissen öffnet sich ein Schwimmerwehr vor dem Zyklonbecken und gibt den Bypass vom Hauptsammler direkt in das Erdbecken frei. Das Erdbecken ist so ausgelegt, dass bei Erreichen des Maximalwasserstandes ein Abschlag über die Entlastungsschwelle in die Wild erfolgt. Vom Erdbecken aus kann das Abwasser im Freigefälle zurück in das Hauptpumpwerk fließen, von dem es nach Emmerich gefördert wird.

4.2.2 Hüthum - Kanalnetz

In Hüthum, das mittig zwischen Emmerich und Elten liegt, wird das anfallende Schmutzwasser über Trennsystem abgeleitet und von einem zentralen Pumpwerk in die Doppeldruckrohrleitungen von Elten zum MWPW Rheinpromenade gefördert. Die Leitungen werden an der Vereinigung von DA 250 HDPE auf DA 315 HDPE aufgeweitet.

Das Regenwasser wird in separaten Leitungen und Gräben aus dem besiedelten Bereich geführt oder dezentral an mehreren Stellen im System versickert bzw. in den Vorfluter, die Wild, abgeleitet.

4.2.3 Innenstadt- und Außengebiete - Kanalnetz, MWPW und RÜB Rheinpromenade

Kanalnetz

Im Gegensatz zum Stadtteil Elten ist die Stadt Emmerich mit einer Höhenlage zwischen 15 und 20 m ü. NN tief gelegen und besitzt keine Erhebungen. Bei Rheinhochwasser übersteigt der Wasserstand die Geländehöhe großer Teile Emmerichs.

Das zentrale Mischwasserkanalnetz Emmerichs wird im Westen von der Bundesstraße B 220 (Klever Straße), im Norden und im Osten von der Umgehungsstraße Weseler Straße und im Süden vom Rhein sowie der Bahntrasse Arnheim-Oberhausen begrenzt. Außerhalb dieser Grenzen liegende Wohngebiete leiten dort anfallendes Schmutzwasser über Pumpwerke in das öffentliche Freispiegelnetz ein.

In großen Bereichen Emmerichs herrscht durchmischte Bebauung, bestehend aus Einfamilienhäusern, Reihenhäusern mit Gartenflächen und einigen mehrstöckigen Gebäuden. Im Bereich der Innenstadt liegt dichte Wohnbebauung mit kleineren gewerblichen Einleitern und hoher Flächenversiegelung vor. Weiterhin sind Sonderflächen wie Schulen, Sportplätze, Altenheime, Marktplätze und Parkanlagen vorhanden. Derzeit leben schätzungsweise rund 18.000 Einwohner in Emmerich, davon 3.000 Einwohner im historischen Innenstadtbereich.

Nördlich von Emmerich befindet sich eine Trinkwassergewinnungsanlage, deren Schutzgebiet (Schutzzone 3a) bis in das Einzugsgebiet des Kanalnetzes der Stadt Emmerich hineinreicht. Weitere Wasser- oder Naturschutzgebiete werden ebenso wie Überschwemmungsgebiete vom Kanalnetz nicht berührt.

Das Kanalnetz wurde als Mischwassersystem errichtet. Die Einzugsgebietsfläche inklusive der noch nicht gebauten Erweiterungsflächen beträgt 447,7 ha, wovon 127 ha versiegelt sind. Die Gesamtlänge des Entwässerungssystems verteilt sich auf 69,5 km im Freigefälle und

9,4 km Druckrohrleitungen. Die Dimensionen variieren von DN 150 bis DN 2000. Die längste Fließzeit im System von Emmerich beträgt 60 Minuten.

Lediglich ein kleiner, vor wenigen Jahren erschlossener Teil an der Grenze zum Industriegebiet Ost 1 ("Auf dem Spilling") wurde als Trennsystem gebaut. Neue Baugebiete sollen zukünftig durch Schmutzwasser- bzw. Trennsysteme erschlossen und Niederschlagswasser ortsnah versickert werden.

In das FreigefälleNetz von Emmerich münden sechs Pumpstationen aus kleineren außerhalb von Emmerich liegenden Siedlungen sowie das Mischwasser vom Gelände der "Moritz-von-Nassau-Kaserne" im Nordwesten (zurzeit Sitz der Hochschule Rhein-Waal) und das Spülwasser vom Wasserwerk "Helenenbusch" im Norden mit Abwassermengen zwischen 5 und 70 l/s. Nach Umbau des Wasserwerkes (gepl. 2012) entfällt diese Einleitung.

Durch die flache Topographie von Emmerich sind die Kanäle mit geringem Gefälle zum Pumpwerk Rheinpromenade verlegt, weswegen das System stark Rückstau-behaftet ist. Bei Abflüssen aus Starkregenereignissen kommt es in Emmerich zu einem kompletten Einstau des Systems und bei Überlastung zu Überstauungen in den Randgebieten, da diese teilweise in Senken liegen und eine geringere Überdeckung aufweisen.

Mischwasserpumpwerk Rheinpromenade

Die gesamten kommunalen Abwässer fließen über zwei Hauptsammler im Außenbereich, die im Grollschen Weg zusammengeführt werden, und einen Hauptsammler aus dem Innenstadtbereich vor dem Mischwasserpumpwerk Rheinpromenade (MWPW) zusammen. Der Hauptkanal führt am Pumpwerk durch ein Trennbauwerk zum dort angeordneten RÜB.

Ein Wehr im Trennbauwerk leitet das Abwasser in einem 180°-Bogen bei gleichzeitiger Verjüngung des Profils von DN 2000 auf DN 700 in den Pumpensumpf des Pumpwerks Rheinpromenade. Hier enden auch die Druckleitungen aus Elten und Hüthum sowie der Freispiegelkanal von dem benachbarten Chemiestandort der früheren Uniqema, jetzt KLK Oleo. Das Pumpwerk verfügt über vier Pumpen (3+1), die im Wechselbetrieb arbeiten und per Frequenzumrichter gesteuert werden.

Sollte der Zufluss bei Starkregenereignissen die Kapazität des Pumpwerks übersteigen, so staut das Wehr zunächst den Kanal ein. Es öffnet beim Erreichen eines Wasserspiegels von 13,00 m ü. NN und gibt den Kanal DN 2000 in den Pumpensumpf des Regenüberlaufbeckens frei. Die 13,00 m ü. NN entsprechen bereits einem Wasserstand von 2,00 m im Hauptsammler, dessen Volumen auf diese Weise zur Entlastung des RÜB genutzt wird.

RÜB Rheinpromenade

Das RÜB Rheinpromenade stellt die Entwässerungssicherheit vom Emmericher Stadtgebiet sowie dessen Außenbereichen sicher und ist zusammen mit dem Mischwasserpumpwerk ein wichtiger Teil des Hochwasserschutzes der direkt am Niederrhein gelegenen Stadt. Es ist mit einer Kapazität von 4.508 m³ das größte RÜB im Entwässerungssystem von Emmerich.

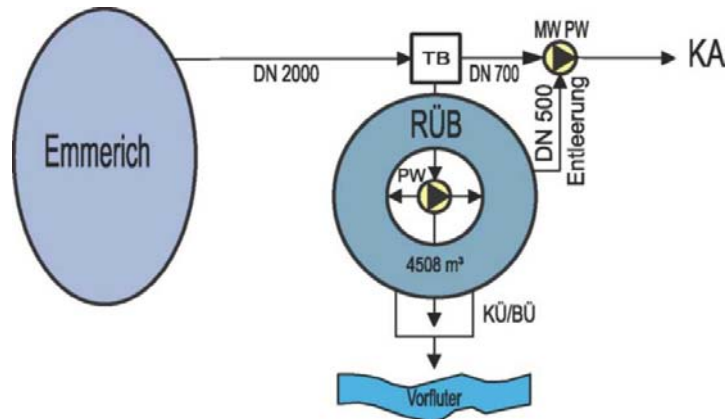


Abbildung 2: Fließschema RÜB Rheinpromenade

Die Lage des RÜB am Rhein erfordert, dass Klär- und Beckenüberlauf auch bei maximalem Rheinhochwasser abgeleitet werden können. Das Becken besteht deshalb aus einem runden Kern und zwei konzentrisch darum angeordneten Becken. Vom mittleren Beckenring aus wird das Abwasser mit Hilfe von sechs Rohrschachtpumpen (4+2) in den äußeren Ring gefördert. Der äußere Ring bildet das eigentliche Becken mit einem Nennvolumen von 4.508 m³ und einem Stauziel von 19,50 m ü. NN. Sobald die Kapazität des Beckens ausgeschöpft ist, wird die geförderte Wassermenge über den Klärüberlauf abgeschlagen und durch einen Fallschacht in einen Kanal DN 2000, der sich auf DN 2500 aufweitet, in den Rhein geleitet.

Überschreitet der Zufluss die Klärwassermenge, werden vier der sechs Pumpen per Motorschieber umgeleitet und pumpen dann das zusätzliche Mischwasser aus dem mittleren Ring in den Kern des RÜB und von dort durch den Kanal DN 2000 direkt in den Rhein. Auf diese Weise wird ein Beckenüberlauf mit einer sehr hohen Leistung realisiert, der auch bei Hochwasser im Rhein das Regenwassers sicher aus der tiefer liegenden Stadt ableitet. Die Bemessung des Beckens erfolgte für einen Rheinhochwasserstand von 18,78 m ü. NN.

Die Beckenentleerung erfolgt Motorschieber-gesteuert durch eine Freigefälledruckleitung DN 500 in den Pumpensumpf des Pumpwerks Rheinpromenade. Während der Entleerungsphase verhindern vier im Becken installierte Tauchmotorrührwerken die Bildung von Ablagerungen.

4.3 Entwässerungssysteme der Industriegebiete

4.3.1 Allgemeines

Die Industriegebiete im Osten und Südosten von Emmerich bilden weitere fünf Teileinzugsgebiete ohne den Bereich um den Hafen, der im nächsten Abschnitt erläutert wird. Sie entwässern überwiegend im Trennsystem; nur in der Duisburger Straße ist eine Mischentwässerung umgesetzt worden. Es handelt sich um folgende Einzugsgebiete (EZG):

- Budberger Straße: Kanalnetz
- Gewerbegebiet Ost: Kanalnetz, Regenwasserbehandlung Vorwerk
- Duisburger Straße: Kanalnetz, RRB
- Blackweg: Kanalnetz, Stauraumkanal
- LDZ: Kanalnetz, Regenwasserbehandlung Stadtweide.

4.3.2 Budberger Straße - Kanalnetz

Das Gewerbegebiet Budberger Straße liegt im Nordosten von Emmerich am Rhein. Es verfügt über eine Gesamtfläche von 25,54 ha inklusive 3,17 ha Grün- und Ausgleichsflächen sowie 1,25 ha Verkehrsflächen. Die Entwässerung erfolgt im Trennsystem. Das Regenwasser wird in einem offenem Grabensystem über ein Regenrückhaltebecken mit einem gedrosselten Abfluss von 3 l/(s·ha) in den ortsnahen Vorfluter, die Landwehr, geleitet.

Das Schmutzwasser wird in zwei Steinzeugkanälen DN 250 in einen Pumpenschacht geführt und über die Druckleitung aus PE-Rohren in den bestehenden Schmutzwasserkanal in der Albert-Einstein-Straße im Gewerbegebiet Ost gepumpt.

4.3.3 Gewerbegebiet Ost - Kanalnetz, Regenwasserbehandlung Vorwerk

Kanalnetz

Das Gewerbegebiet Ost liegt südlich vom Gewerbegebiet Budberger Straße und wird durch die Weseler Straße (K 16) in zwei Bereiche (Ost und West) unterteilt. Die Entwässerung der etwa 30 ha versiegelten Fläche erfolgt ebenfalls durch ein Trennsystem.

Das in dem westlichen Bereich anfallende Schmutzwasser wird in die Pumpstation Dechant-Sprünken-Straße abgeleitet und in das kommunale Netz von Emmerich gefördert. Aus dem östlichen Bereich fließt das Schmutzwasser zum SW-Pumpwerk Vorwerk und wird von dort zur Kläranlage gepumpt.

Der Ablauf von Dächern, Straßen, Parkplatz- und Hofflächen wird in einem Regenwasserkanalsystem zur Regenwasserbehandlung Vorwerk geleitet. Die längste Fließzeit im System von Vorwerk beträgt 20 Minuten.

Regenwasserbehandlung Vorwerk

Die Regenwasserbehandlung Vorwerk besteht aus Stauraumkanal, Regenklärbecken und Regenrückhaltebecken. Der Hauptsammler mit Durchmessern von DN 1000 bis DN 2000 aus Stahlbetonrohren ist als unregelter Stauraumkanal ausgelegt. Das Volumen der vollständig unter 13,00 m ü. NN gelegenen Kanalabschnitte beträgt rd. 3.400 m³ und kann als Kanalstauraum angesetzt werden.

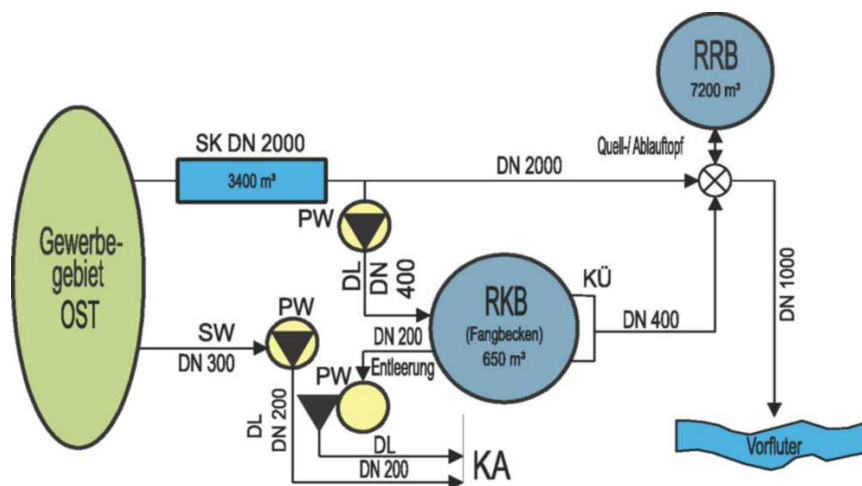


Abbildung 3: Fließschema Regenwasserbehandlung Vorwerk

Der Stauraumkanal bildet mit seinem unteren Ende (DN 2000) die Vorlage für das Pumpwerk des Regenklärbeckens. Bei ansteigendem Wasserspiegel beginnt die Befüllung des RKB aus dem Stauraumkanal heraus über zwei Pumpen. Das Nennvolumen des RKB beträgt 650 m³ bei einem Stauziel von 14,00 m ü. NN. Das RÜB ist als rundes Zyklonbecken ausgebildet. Hier ist die Nachrüstung mit einem Tauchmotorrührwerk vorgesehen.

Bei Überschreiten des Stauziels des RKB erfolgt ein Abschlag über den Klärüberlauf zum Quelltopf und von dort in die Landwehr. Nach der Befüllung des RKB erfolgt der Einstau des Stauraumkanals.

Bei Volleinstau des Systems gelangt über den ansteigenden Entlastungskanal DN 2000 (Verlängerung des Stauraumkanals) ab einer Wasserspiegelhöhe von 11,00 m ü. NN das Regenwasser in den Quelltopf, von wo aus das Erdbecken mit einem verfügbaren Volumen von 7.200 m³ ab einer Einstauhöhe von 13,20 m ü. NN befüllt wird. Hierdurch wird weitgehend sichergestellt, dass sich die nicht gelösten Stoffe im Regenwasser im Stauraumkanal absetzen und nicht ins Erdbecken gelangen. Der Quelltopf ist als Betonschacht ausgebildet. Eine Trennwand (OK auf 13 m ü. NN) grenzt den ankommenden Entlastungskanal von dem abgehenden Ablaufkanal DN 1000 zur Landwehr sowie dem Klärüberlauf DN 600 ab.

Der Ablauf in die Landwehr, ein Kanal DN 1000, hat eine Sohlhöhe von 12,00 m ü. NN. Die Ablaufmenge wird durch einen Regelschieber auf den Gebietsabfluss des un bebauten Gebiets gedrosselt. Diese Menge von 400 l/s entspricht dem Klärüberlauf. Sollte auch das Volumen des Erdbeckens vollständig ausgenutzt sein, kann der Regelschieber vollständig geöffnet und die überschüssige Wassermenge in die Landwehr abgeschlagen werden.

Die Entleerung des Stauraumkanals erfolgt durch das Pumpwerk des RKB unter Ausnutzung des Klärüberlaufs. Nach vollständiger Entleerung des Stauraumkanals fließt das mit Feststoffen angereicherte Abwasser aus dem RKB im Freigefälle einem Pumpensumpf zu. Von dort wird der gesamte Beckeninhalte der Kläranlage zugeführt.

4.3.4 Duisburger Straße - Kanalnetz, RRB

Kanalnetz

Das EZG Duisburger Straße grenzt im Westen an die Außengebiete von Emmerich, im Norden an das Gewerbegebiet Vorwerk, im Süden an die Bahn und im Nordosten an Erweiterungsflächen der Gewerbegebiete. Hier sind 5,41 ha undurchlässige Flächen an die Kanalisation angeschlossen, die in einem Teil-Mischsystem entwässert werden. Die Anfangshaltungen sind reine Schmutzwasserkanäle DN 250 bis DN 400, die in Mischkanäle DN 400 bis DN 700 münden. Das anfallende Abwasser ist kommunalen und gewerblichen Ursprungs. Die längste Fließzeit im System vom Einzugsgebiet für das Regenrückhaltebecken Duisburger Straße beträgt 6,5 Minuten.

In der Arnheimer Straße befindet sich ein unregelmäßiger Regenrückhaltekanal in der Dimension DN 1000 zur Entwässerung der Fahrbahnfläche. Dieser Kanal mit einer Länge von rd. 127 m leitet über eine Drosselverbindung DN 80 in den Mischwasserkanal DN 600 zum RRB ein.

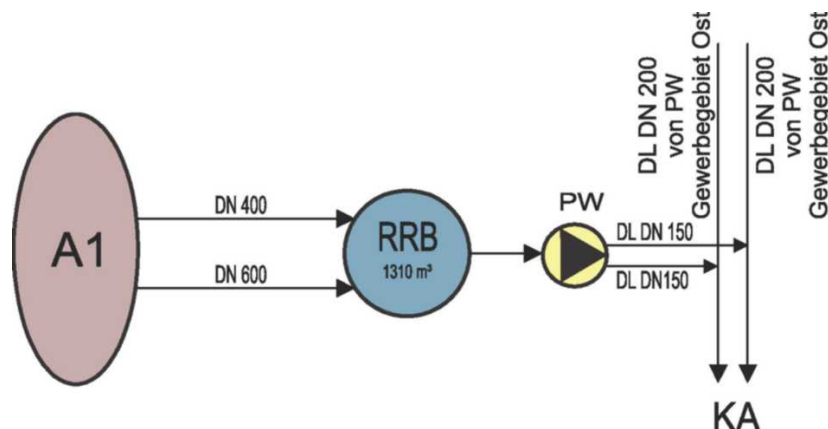


Abbildung 4: Fließschema RRB Duisburger Straße

RRB Duisburger Straße

Die Ableitung erfolgt in ein Regenrückhaltebecken, das sich z. T. auf dem Gelände der GFG - Gelderländer Fleischwarengesellschaft mbH befindet. Es wurde als rundes Zyklonbecken unterirdisch gebaut und mit Tauchmotorrührwerken ausgestattet. Das Nennvolumen beträgt 1.310 m³.

Der Zufluss gelangt über zwei Sammler (DN 400 und DN 600) in den Vereinigungs- und Absturzschaft, der mit einem Kanal DN 700 an das Becken angeschlossen ist. Aus dem Becken fördern zwei redundante Pumpen mit einer Leistung von je 20 l/s das Abwasser in die beiden Druckrohrleitungen vom Pumpwerk Vorwerk zur Kläranlage. Im Regenwetterfall sind beide Pumpen in Betrieb.

4.3.5 Blackweg - Kanalnetz, Stauraumkanal

Kanalnetz

Das Gebiet liegt südöstlich des EZG Duisburger Straße, überwiegend zwischen der Bahntrasse und der Reeser Straße (B 8). Es beinhaltet sowohl private Haushalte als auch Gewerbe. Das Einzugsgebiet umfasst insgesamt 11,61 ha mit einer abflusswirksamen Fläche von 3,33 ha. Es wird im Trennsystem entwässert. Das Schmutzwasser wird in einem separaten Kanal DN 250 gesammelt und in einen Pumpenschacht geleitet.

Stauraumkanal Blackweg

Das Regenwasser fließt in den im Blackweg liegenden Stauraumkanal DN 1000 bis DN 2000 mit einem aktivierbaren Volumen von 1.825 m³. Der Drosselabfluss mündet in das Pump-

werk, welches das anfallende Abwasser mit bis zu 26,8 l/s über eine Druckrohrleitung DN 200 direkt zur Kläranlage fördert.

Abschläge aus dem Stauraumkanal bei Starkregenereignissen, die über die Bemessung hinausgehen, erfolgen über einen freien Auslass DN 1000 mit einer Froschklappe DN 400 zur Rückstausicherung aus dem Gewässer in den Vorfluter Landwehr, so dass das gesamte Volumen genutzt werden kann.

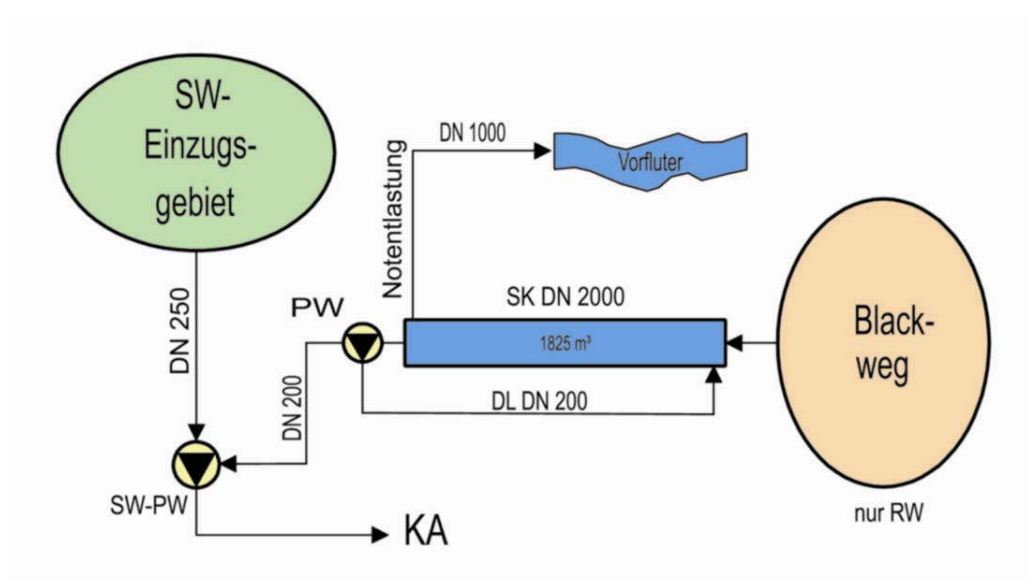


Abbildung 5: Stauraumkanal Blackweg

4.3.6 LDZ - Kanalnetz, Regenwasserbehandlung Stadtweide

Kanalnetz

Das Einzugsgebiet um das LDZ (Logistisches Dienstleistungszentrum) liegt östlich des Industriehafens und schließt das Klärwerksgelände auf zwei Seiten ein. Einige Flächen der 17,9 ha großen Einzugsfläche werden noch nicht gewerblich genutzt und tragen nicht zum Abfluss bei, so dass bislang 6,3 ha von genehmigten 11,761 ha tatsächlich abflusswirksam sind. Die Entwässerung erfolgt im Trennsystem. Das Schmutzwasser wird separat zu einer Pumpstation geleitet, die es über eine Druckrohrleitung DN 250 direkt zur Kläranlage fördert.

Die Regenentwässerung beinhaltet zwei Kanäle, die parallel verlaufen. Der außen liegende Kanal in der Dimension DN 500 bis DN 800 dient der Dachentwässerung der angeschlossenen Hallen und wird direkt über zwei Abschläge DN 700 bzw. DN 1500 in den Vorfluter Landwehr abgeleitet. Der innen liegende Sammler DN 300 bis DN 1400 dient der Straßen-

und Hofentwässerung und entwässert zur Regenwasserbehandlung Stadtweide. Die längste Fließzeit im System LDZ Stadtweide beträgt knapp 10 Minuten.

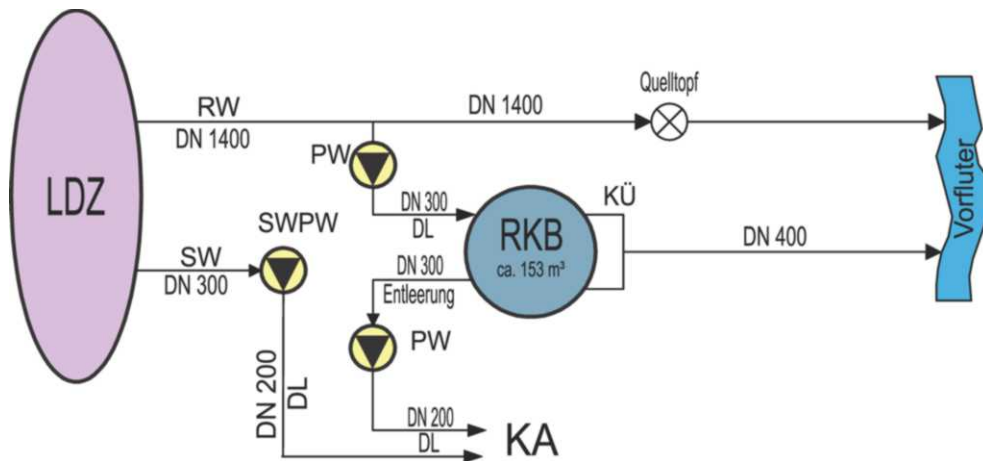


Abbildung 6: Fließschema Regenwasserbehandlung Stadtweide

Regenwasserbehandlung Stadtweide

Die Ausführung der Regenwasserbehandlung entspricht weitestgehend der Regenwasserbehandlung Vorwerk, nur ist sie kleiner dimensioniert worden. Das Regenwasser aus dem ankommenden Sammler DN 1400 wird über zwei Pumpen in das Regenklärbecken gepumpt. Das Nennvolumen des RKB beträgt ca. 153 m³ bei einem Stauziel von 14,50 m ü. NN und ist als Zyklonbecken mit einem Tauchmotorrührwerk ausgebildet. Die Entleerung erfolgt aus der Beckenmitte über eine Leitung DN 300 in das Regenwasserpumpwerk. Die Abwassermenge wird von zwei Pumpen mit einer Förderleistung von insgesamt 60 l/s zur Kläranlage gepumpt.

Sollte die ankommende Wassermenge die Kapazität des RKB übersteigen, kann über den Klärüberlauf in die Löwenberger Landwehr entlastet werden. Über einen Quelltopf, der als offener Betonschacht ausgebildet ist, kann auch der Zulauf des Regenwassersammlers indirekt in die Löwenberger Landwehr fließen. Die Schachtsohle befindet sich bei 11,00 m ü. NN und die Geländeoberkante bei 14,20 m ü. NN.

4.4 Entwässerungssysteme im Einzugsgebiet Industriehafen

4.4.1 Allgemeines

Der Industriehafen befindet sich im südöstlichen Bereich von Emmerich und wird im Norden von der Gleistrasse der Deutschen Bahn AG begrenzt. Im Westen grenzt der historische Innenstadtbereich direkt an dieses Gebiet, das im Osten bis zur Deichstraße reicht. Die Entwässerung erfolgt im Mischsystem und umfasst rund 6,5 km Kanalisation bis DN 1350. Die ge-

samte zu entwässernde Fläche ergibt sich zu 65,43 ha, wovon insgesamt 22,41 ha (+ die Fläche von AKZO) versiegelt sind. Das Gesamtgebiet besteht aus vier Teileinzugsgebietsflächen mit drei Regenrückhaltebecken. Hinzu kommt die Fläche des Chemiebetriebes, AKZO Nobel Chemicals GmbH (wovon zwischenzeitlich Teile an die Firma Oleon GmbH verkauft wurden), der mit einem eigenen System 11,46 ha entwässert und über eine eigene Pumpstation in die Hauptdruckrohrleitung von der Rheinpromenade zur Kläranlage fördert.

4.4.2 Hafenstraße - Kanalnetz, RRB

Kanalnetz

Das Einzugsgebiet des RRB Hafenstraße liegt im nördlichen Bereich des Industriehafens und beinhaltet die Reeser Straße (B 8). Das Abwasser fällt sowohl von kommunalen als auch gewerblichen Einleitern an. Von den angeschlossenen 18,67 ha sind 11,79 ha abflusswirksam. Die Mischentwässerung mit einer Gesamtlänge von 3,2km endet in einem Regenrückhaltebecken. Die längste Fließzeit im Einzugsgebiet für das RRB beträgt knapp 20 Minuten.

RRB Hafenstraße (RRB 1)

Das Regenrückhaltebecken ist unterirdisch angelegt und befindet sich in der Hafenstraße gegenüber einer ALDI-Filiale auf einem städtischen Grundstück. Das als Durchlaufbecken im Hauptschluss angelegte Becken besitzt ein Nennvolumen von 2.400 m³.

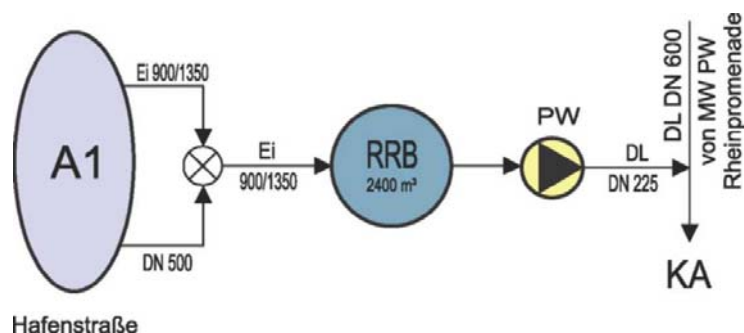


Abbildung 7: Fließschema RRB Hafenstraße

Der Zuflüsse aus dem Sammler im Ei-Profil 900/1350 und dem Nebensammler DN 500 fallen über einen innen liegenden Untersturz in das Zyklonbecken, das mit zwei Tauchmotorrührwerken ausgerüstet ist. Zwei Pumpen vom Fabrikat KSB, Typ KRTF 100-240/172 X1G 190 mit einer Nennleistung von 17,0 kW, drücken das Abwasser mit einem Drosselabfluss von 20 l/s in die Hauptdruckrohrleitung zur Kläranlage.

4.4.3 Werftstraße - Kanalnetz, RRB

Kanalnetz

Zur Entwässerung des Containerterminals wurde dieses Einzugsgebiet erschlossen. Es grenzt südwestlich an das Einzugsgebiet des RRB Hafenstraße und umfasst 1,6 km Mischkanalisation und eine Fläche von 8,54 ha. Hiervon sind 6,34 ha abflusswirksam. Die längste Fließzeit im System vom Einzugsgebiet für das RRB 2 beträgt knapp 6 Minuten.

Ursprünglich war das Gebiet größer geplant, aber durch den Chemiebetrieb AKZO, der eine eigene separate Entwässerung für sein Gelände betreibt, und eine veränderte Abgrenzung zum Gebiet Industriehafen hat sich das Einzugsgebiet für das Regenrückhaltebecken von 14,40 ha auf 8,54 ha reduziert.

RRB Werftstraße (RRB 2)

Das Regenrückhaltebecken liegt direkt im Containerterminal des Industriehafens. Die unterirdische Konstruktion wurde genauso gewählt wie beim RRB Hafenstraße: ein rundes Zyklonbecken als Durchlaufbecken im Hauptschluss, ausgerüstet mit zwei Tauchmotorrührwerken. Für das ursprünglich größere Einzugsgebiet erhielt das RRB ein Volumen von 2.000 m³.

Die zwei ankommenden Sammler (Hauptsammler Ei-Profil 900/1350 und Nebensammler DN 700) laufen in einem innen liegenden Absturzschaft zusammen. Aus dem Schacht gelangt das Abwasser über ein Rohr DN 1000 in das Becken. Das anfallende Abwasser wird mit zwei identischen Pumpen wie im RRB Hafenstraße, mit einer Förderleistung von 15 l/s, in die Hauptdruckrohrleitung zur Kläranlage gepumpt.

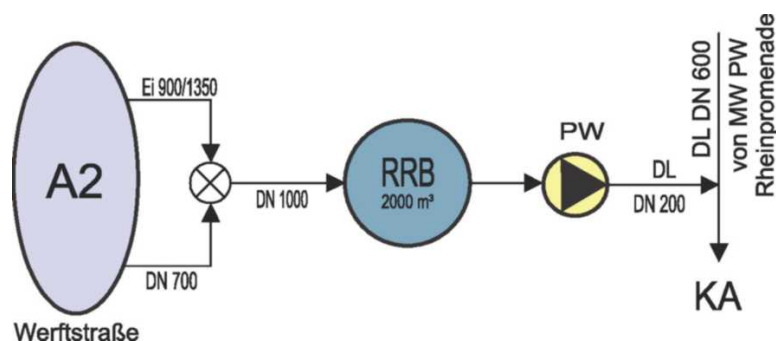


Abbildung 8: Fließschema RRB Werftstraße

4.4.4 AKZO (Oleon)

Das Gelände der Firma AKZO (Oleon) verfügt über eine eigene Entwässerung im Mischsystem. Das gesamte Gebiet umfasst 11,46 ha. Das Abwasser gelangt über eine eigene Pumpstation in die Hauptdruckrohrleitung zur Kläranlage, die im Mittel 14 l/s pumpt.

4.4.5 Industriefafen - Kanalnetz, RRB

Kanalnetz

Dieses Teileinzugsgebiet schließt sich östlich an die beiden Gebiete der Hafen- und Werftstraße an und beinhaltet auch die östlich und südlich des Industriefafens gelegenen Flächen. Ursprünglich waren zwei Regenrückhaltebecken für dieses Mischwassereinzugsgebiet vorgesehen, aus wirtschaftlichen Gründen wurde nur ein gemeinsames Becken für beide Gebiete gebaut.

Die gesamte Fläche dieses Teileinzugsgebietes beträgt 26,76 ha, von denen effektiv lediglich 4,28 ha abflusswirksam angeschlossen sind. Hierbei ist bereits die noch in der Planung befindliche Erweiterungsfläche eines Unternehmens berücksichtigt worden. Der extreme Unterschied zwischen A_{ek} und A_{red} kommt durch die Dachentwässerung der im Einzugsgebiet befindlichen ausgedehnten Produktionshallen zweier weiterer Unternehmen zustande, die direkt in den Rhein entwässern.

Das westlich gelegene Teileinzugsgebiet 3 entwässert mit einem Freispiegelkanal in das Trockenwetter-Pumpwerk des RRB Industriefafen. Das Abwasser aus Teileinzugsgebiet 4 läuft im Freigefälle einer Pumpstation an der Kreuzung Stadtweide - Deichstraße zu, die das Abwasser in das RRB fördert.

Die Gesamtlänge der Kanalisation ist mit 0,8 km (440 m Mischwasserkanalisation bis DN 1000 und 374 m Regenwasserkanalisation bis Ei-Profil 900/1350) relativ kurz, dies hängt aber auch mit der geringen Größe der angeschlossenen Flächen zusammen. Die längste Fließzeit im System vom Einzugsgebiet für das RRB Industriefafen beträgt knapp 5 Minuten.

RRB Industriefafen (RRB 3/4)

Das Regenrückhaltebecken befindet sich auf dem Gelände des Ölkontors im nördlichen Randbereich des Industriefafens zwischen der Straße Stadtweide und der Von-Gimborn-Straße.

Das Durchlaufbecken im Nebenschluss wurde oberirdisch gebaut und für 32,60 ha ausgelegt, von denen damals 23,76 ha als abflusswirksam angenommen wurden. Das Becken ist als rundes Zyklonbecken ausgebildet und somit selbstreinigend. Zur Unterstützung der Wasserströmung im Becken sind zwei Tauchmotorrührwerke eingebaut. Das Nennvolumen des Beckens beträgt 4.200 m³.

Das Mischwasser aus Gebiet 3 gelangt über den Sammler DN 1000 in den Pumpensumpf, dessen Sohle auf 12,00 m ü. NN liegt und in einem Schacht in der Mitte des Beckens angeordnet ist. Ab einem Wasserstand von 12,40 m ü. NN schaltet eine Trockenwetterpumpe ein

und fördert gemäß Auslegung rund 20 l/s über eine Druckrohrleitung DN 200 in die Hauptdruckleitung zur Kläranlage. Steigt der Wasserstand auf 13,20 m ü. NN, schaltet die zweite Trockenwetterpumpe dazu und die volle Förderleistung von rund 33 l/s (Auslegung) wird erreicht. Die dritte Pumpe bildet die Reserve und läuft im stetigen Wechsel mit den anderen Trockenwetterpumpen. Die Pumpen sind vom Fabrikat KSB, Typ KRTF 100-250/114XG-260 mit 11,8 kW Nennleistung, ihre per magnetisch-induktivem Durchflussmessgerät (MID) gemessene, tatsächliche Förderleistung beträgt 30,0 l/s bzw. 48,9 l/s.

Bei Regenwetter steigt der Wasserspiegel im Pumpensumpf an und ab einer Höhe von 14,90 m ü. NN, die einem Wasserstand von 2,90 m entspricht, wird eine der beiden redundanten Propellerpumpen eingeschaltet, die das Wasser ins ringförmig um den Pumpensumpf angeordnete Becken fördern. Ihre Förderleistung beträgt je 800 l/s. Sie füllt das Becken bis zum maximalen Stauziel von 20,75 m ü. NN.

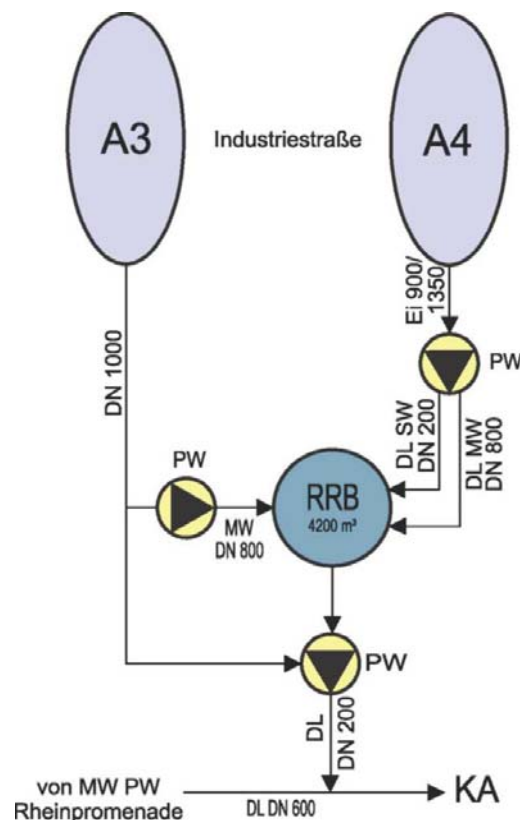


Abbildung 9: Fließschema RRB Industriehafen

Das Gebiet 4 im Süden des Hafens wird über einen Sammler im Ei-Profil 900/1350 in die Pumpstation Deichstraße entwässert. Hier sind für den Trockenwetterzufluss zwei redundante Tauchmotorpumpen und für Regenwetter eine Propellerpumpe installiert. Die Trockenwetterpumpen fördern 25 l/s über die Druckrohrleitung DN 200 direkt ins Becken des RRB, aus dem das Abwasser durch die Entleerungsöffnung, die bei Regenwetterzufluss verschlossen wird, in den Pumpensumpf in die Mitte des Beckens laufen.

Der Regenwetterzufluss wird von einer Propellerpumpe DN 800 über eine Druckrohrleitung DN 800 direkt ins RRB gefördert. Die Pumpe entspricht der Pumpe im Becken. Die Förderleistung beträgt ca. 800 l/s bei einer manometrischen Förderhöhe von 6,90 m. Sobald der maximale Füllstand im RRB Industriehafen erreicht ist, wird das Pumpwerk verriegelt. Nach Abschalten der Propellerpumpe entleert die Druckrohrleitung DN 800 zurück in den Pumpensumpf und die Trockenwetterpumpen übernehmen die Restentleerung des Sumpfes.

Das RRB wird durch eine Wandöffnung, die mit einem Motorschieber geöffnet wird, in den Pumpensumpf in der Beckenmitte entleert. Die dort angeordneten Trockenwetterpumpen fördern dann die Beckenfüllung in die Hauptdruckrohrleitung zur Kläranlage.

4.5 Nachrechnung des RRB Industriehafen

4.5.1 Veranlassung

Langjährige Betriebserfahrung hat gezeigt, dass sich das RRB Industriehafen auch bei starken Regenereignissen nicht füllt. Es sollte daher geprüft werden, wie viel Beckenvolumen tatsächlich für die konventionelle Regenwasserbewirtschaftung benötigt wird, um den Rest als Retentionsvolumen für das neue PSS nutzen zu können. Aus diesem Grund wird das Regenbecken nach aktuellem Stand des DWA-Arbeitsblattes 117 (4/2006) nachgerechnet.

4.5.2 Bemessung

Bemessungsgrundlagen

Im Einzugsgebiet des RRB Industriehafen sind fünf große Unternehmen ansässig. Von der TWE wurde im Jahr 2008 ermittelt, welche Flächen dieser Unternehmen an das RRB angeschlossen und welche Erweiterungen geplant sind. Die (Dach-)Flächen von zwei Unternehmen entwässern direkt in den Industriehafen. Die anderen Unternehmen sind an das Regenwasserkanalnetz angeschlossen. Ein Unternehmen plant außerdem im nördlichen Bereich ihres Geländes ein Logistikzentrum auf 10.547 m² (vgl. Anlage 3). Die Erweiterungsfläche wird zu 50 % als abflusswirksam für das Entwässerungsnetz angenommen und geht mit einem mittleren Abflussbeiwert von 0,90 für asphaltierte Straßen bzw. Metallflachdächer (vgl. DWA-A 117, Tab. 1) in die Berechnung ein.

Die angeschlossene Straßenfläche umfasst lediglich den unteren Teil der Deichstraße ab Kreuzung Stadtweide und die Industriestraße bis zum Schacht 11764. Die folgende Tabelle zeigt die zurzeit an das RRB Industriehafen angeschlossenen und rechnerisch zu berücksichtigenden Flächen.

Tabelle 1: Angeschlossene Flächen des RRB Industriehafen (siehe Anlage 3)

Teilgebiet Unternehmen / Straße	Einzugsgebietsfläche $A_{E,k}$ in m^2	mittl. Abflussbeiwert Ψ_m in %	undurchl. Fläche A_u in m^2
Fläche 1	9.199	0,90	8.279
Fläche 2	12.000	0,30	3.600
Fläche 3	23.330	0,87	20.550
Erweiterungsfläche 4	5.247	0,90	4.746
Industriestr.	2.744	0,90	2.470
Deichstr.	3.545	0,90	3.191
Summe	56.065		42.836

Die gesamte angeschlossene Einzugsgebietsfläche summiert sich auf $A_{E,k} = 5,607$ ha. durch den mittleren Abflussbeiwert von 0,87 - 0,90 für die Unternehmensflächen und -dächer sowie für asphaltierte Straßen und 0,30 für lockeren Kiesbelag beträgt die gesamte rechnerisch undurchlässige Fläche $A_u = 4,284$ ha.

Aufgrund der Größe und der Fließzeit des Einzugsgebietes ($A_{e,k} < 200$ ha und $t_F < 15$ min) sowie einem Regenanteil der Drosselabflusspende von > 2 l/(s·ha) kann das einfache Verfahren zur Ermittlung des Volumens von Regenrückhalteräumen angewendet werden (vgl. DWA-A 117, Abschnitt 4).

Zur Bemessung wurde eine **Regenreihe** des Niersverbands aus dem benachbarten Goch herangezogen, deren Datenreihe mehr als 30 Jahre umfasst. Die Starkregenberechnungen nach ATV-A 121 der Zeitreihe Goch KA liegen sowohl in der jährlichen Reihe als auch in der partiellen Reihe unter den Ergebnissen der vom DWD herausgegebenen KOSTRA-Auswertungen; bei einer zulässigen Abminderung von 10 % befinden sie sich noch im Toleranzbereich. Die Regenreihen wurden vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) zur Verfügung gestellt.

Zur Bemessung ist nach DWA-A 117, Abschnitt 4.4.2 eine Überschreitungshäufigkeit von $n = 0,1/a$ anzusetzen. Gemäß der DIN EN 752-2 müsste dagegen für Industriegebiete eine Überflutungshäufigkeit von $n = 0,033/a$ nachgewiesen werden. Allerdings besteht aufgrund der Topographie des Einzugsgebiets (EZG) kein Schadenspotential bei möglichen Überflutungen aus Überstauereignissen, so dass die Überstauhäufigkeit von $n = 0,2/a$ ausreichen würde. Maßgebend für die Bemessung wird somit die Überschreitungshäufigkeit von $n = 0,1/a$ gem. DWA-A 117.

Maximaler Drosselabfluss

Neben der angeschlossenen Fläche und dem Berechnungsregen hängt das erforderliche Volumen des Regenrückhaltebeckens vom zulässigen Drosselabfluss ab. Das RRB Industriehafen befindet sich schon seit mehreren Jahren in Betrieb. Dort sind drei Pumpen eingebaut (vgl. Anlage 4), die jeweils mit einer Leistung von 30,0 l/s betrieben werden. Es laufen maximal zwei Pumpen gleichzeitig, so dass der maximal mögliche reduzierte Spitzenabfluss unabhängig von der Regenspende $r_{D,n}$ konstant 48,9 l/s beträgt. Der maximal zulässige Drosselabfluss Q_{Dr} ergibt sich somit zu

$$Q_{Dr} = 48,9 \text{ l/s.}$$

Die zulässige Drosselabflussspende q_{dr} in l/(s·ha) wird in der Regel auf die undurchlässige Fläche A_u im untersuchten Einzugsgebiet bezogen:

$$q_{Dr} = Q_{Dr} / A_u = 48,9 / 4,284 = 11,41 \text{ l/(s·ha).}$$

Der zur Berechnung des erforderlichen Rückhaltevolumens angesetzte Regenanteil der Drosselabflussspende berechnet sich wie folgt:

$$q_{Dr,u} = (Q_{Dr} - Q_{T,d,aM}) / A_u = (48,9 - 1,07) / 4,284 = 11,16 \text{ l/(s·ha)}$$

mit $Q_{T,d,aM} = 0,25 \text{ l/s} \cdot 4,284 \text{ ha} = 1,07 \text{ (l/s)}$ mittlerer täglicher Trockenwetterabfluss aus Erfahrungswerten des Kanalbetriebes der TWE.

Erforderliches Rückhaltevolumen

Die Ermittlung des notwendigen Regenrückhaltevolumens für die gedrosselte Weiterleitung zur Kläranlage Emmerich mittels der oben beschriebenen Pumpen erfolgt mit dem einfachen Verfahren nach DWA-A 117 (4/2006) gemäß Gleichung 2 und 3:

$$V_{s,u} = (r_{D,n} - q_{Dr,u}) \cdot D \cdot f_Z \cdot f_A \cdot 0,06 \quad \text{und} \quad V = V_{s,u} \cdot A_u$$

mit $V_{s,u}$: spezifisches Speichervolumen, bezogen auf A_u in m^3/ha
 V : erforderliches Speichervolumen in m^3
 D : Regendauer in min
 $r_{D,n}$: maßgebende Regenspende in l/(s·ha)

Zu- und Abschlagsfaktor werden auf der sicheren Seite angenommen: $f_Z = 1,2$ und $f_A = 1,0$.

Mit $A_u = 4,284 \text{ ha}$ ergibt sich für das erforderliche Speichervolumen folgende Bestimmungsgleichung:

$$\begin{aligned} V &= V_{s,u} \cdot A_u = (r_{D,n} - q_{Dr,u}) \cdot D \cdot f_Z \cdot f_A \cdot 0,06 \cdot A_u = \\ &= (r_{D,n} - 11,16) \cdot D \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot 0,06 \cdot 4,284 \end{aligned}$$

Bei Einsetzen der partiellen Regenreihe von Goch KA erhält man das in Abbildung 10 dargestellte Ergebnis:

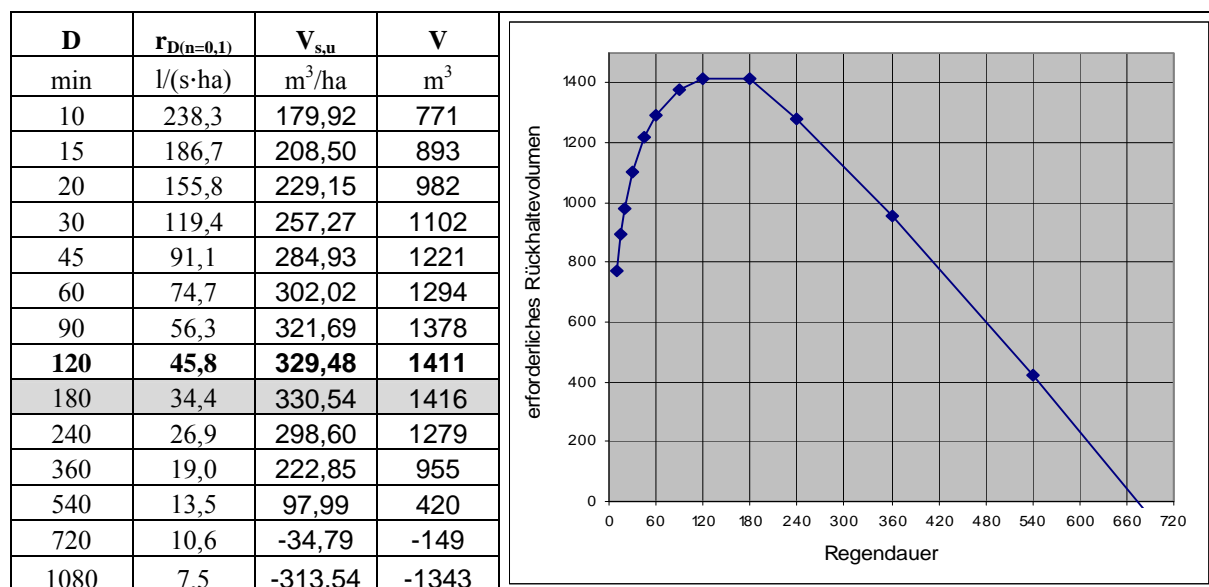


Abbildung 10: Ermittlung des erforderlichen Speichervolumens

Für eine Regendauer von 180 min ergibt sich das maßgebende Gesamtspeichervolumen mit:

$$V = 1.416 \text{ m}^3.$$

4.5.3 Vergleich Ist-Situation mit Planungs-Situation

Der Genehmigungsentwurf für das RRB Industriehafen aus dem Jahr 1992/1993 beruht auf dem damals vorgesehenen Einzugsgebiet (EZG) von $18,54 + 14,06 = 32,6 \text{ ha}$. Durch die Reduzierung der Fläche im Westen um rd. 5,53 ha (vgl. Anlage 3), die dem Einzugsgebiet des RRB 2 zugeschlagen wurden, ist das heutige EZG bereits verkleinert worden. Hinzu kommen in der Planung berücksichtigte (Dach-)Flächen eines Unternehmens, die stattdessen direkt in den Industriehafen entwässern. Gleiches gilt für ein zweites Unternehmen im Südwesten des EZG.

Rein rechnerisch reduziert sich die zum Abfluss in das RRB Industriehafen führende undurchlässige Fläche von geplanten $A_{u,Plan} = 13,72 + 10,04 = 23,76 \text{ ha}$ auf zurzeit $A_{u,IST} = 4,284 \text{ ha}$. Dies entspricht einer Reduzierung von über 80 %. Das ursprünglich ermittelte Beckenvolumen von $V = 2.435 + 1.781 = 4.216 \text{ m}^3$ wurde mit einem Beckenvolumen von 4.500 m^3 und einem Stauziel von 4.200 m^3 realisiert und wird dementsprechend nicht vollständig genutzt, so dass hier nachweislich Kapazitäten von

$$V = 4.200 - 1.416 = 2.784 \text{ m}^3$$

vorhanden sind.

Fazit

Durch den vorstehenden Vergleich des erforderlichen Rückhaltevolumens für das Einzugsgebiet des RRB Industriehafen für den zukünftigen Stand mit den Ergebnissen der ursprünglichen Planung bzw. der Bauausführung ist der Nachweis erbracht worden, dass freie Kapazitäten von 2.784 m^3 im RRB Industriehafen vorhanden sind. Diese Kapazität möchte die TWE für das Abwasser-PSS nutzen und einen Anschluss der Druckrohrleitung von der Rheinpromenade zum Klärwerk an das RRB Industriehafen herstellen. Die Steuerung der Überleitung würde mittels eines magnetisch-induktiven Durchflussmessgeräts (MID) auf das begrenzte Beckenvolumen abgestimmt werden, so dass stetig die Entwässerung der Einzugsgebiete 3 und 4 gewährleistet bleiben.

Aufgrund der Erfahrungswerte des Kanalbetriebes der TWE und der aufgezeichneten Pumpen- und Durchlaufwerte des RRB Industriehafen ist die Auslastung des Beckens jedoch noch weitaus geringer als vorstehend berechnet wurde. Seit Inbetriebnahme 2002 war das Becken zu keinem Zeitpunkt teilgefüllt bzw. ein Rückstau in das Kanalnetz erkennbar. Die Betriebsstunden der drei Trockenwetterpumpen bestätigen den geringen Zufluss. Sie betragen bei drei ausgewerteten Jahren nur 4,4 - 5,8 % der Jahresstunden.

Zudem ist laut Aussage des Kanalbetriebes die installierte Regenwetterpumpe noch nie angesprungen und nur zu Test- und Wartungszwecken in Betrieb gewesen.

4.6 Beschreibung der Kläranlage

4.6.1 Situation

Die biologische Kläranlage der Stadt Emmerich am Rhein behandelt das häusliche, gewerbliche und industrielle Abwasser der Stadt, das ihr über die Druckrohrleitung vom Pumpwerk Rheinpromenade und sieben weiteren Druckrohrleitungen zugeführt wird.

Die Kläranlage liegt südöstlich der Stadt direkt am Rhein. Sie wurde 1982 in Betrieb genommen. Die Ausbaugröße betrug 11.700 kg BSB₅/d, entsprechend 195.000 EW. Im Laufe der Jahre wurde sie mehrfach an die sich ändernden Abwasserzusammensetzungen und verschärfenden Einleitbedingungen angepasst.

Die Anlage hat aktuell eine mittlere Frachtbelastung von rd. 140.000 EW. An die Anlage sind zurzeit 30.000 Einwohner angeschlossen, ca. 85 % des Abwassers entstammen industriellen Einleitern.

Aktuell gelten die in Tabelle 2 genannten Einleitgrenzwerte. Sie werden bei Trocken- und Regenwetter sicher eingehalten. Lediglich bei einsetzendem Regenwetterzufluss erreichen die Ablaufwerte phasenweise die Größenordnung der Grenzwerte. Mit Hilfe des Prozesssteuerungssystems sollen diese Betriebsphasen verbessert werden.

Tabelle 2: Überwachungswerte Ablauf Kläranlage

Parameter	Einheit	Abw.-Verordnung Anhang 1	Erlaubnis 09.10.2002
CSB	mg/l	75	65
BSB ₅	mg/l	15	15
NH ₄ -N	mg/l	10	10
N _{ges}	mg/l	13	13
P _{ges}	mg/l	1	1
AOX	µg/l	---	100
Hg	µg/l	---	1
Cd	µg/l	---	5
Cr	µg/l	---	50
Ni	µg/l	---	50
Pb	µg/l	---	50
Cu	µg/l	---	100

4.6.2 Einlaufgruppe

Da alle Abwasserströme dem Klärwerk über Druckleitungen zugeführt werden, ist die Einlaufgruppe etwa 5 m über Gelände angeordnet worden. Das Abwasser muss daher auf dem Klärwerk nicht mehr gehoben werden. Es wird aus einer Einlaufkammer auf drei Rechengebinne verteilt, von denen eines als Notumlauf dient. In den beiden anderen sind Filterstufenrechen angeordnet.

Der Sand wird in einem zweistraßigen, belüfteten Sandfang abgeschieden und über Sandklassierer in einen Sandcontainer abgeworfen. Die gesamte Einlaufgruppe ist abgedeckt, die Abluft wird abgesaugt und in einem chemisch-biologischen Abluftwäscher behandelt.

4.6.3 Vorklärung

Die Vorklärung wurde als Rundbecken errichtet. Das Abwasser tritt in Beckenmitte durch den Königsstuhl ins Becken ein und wird über eine umlaufende Betonschwelle abgezogen. Eine Räumerbrücke fördert den abgesetzten Schlamm in den Schlammtrichter in der Beckenmitte, aus der er in den Faulturm abgezogen wird.

4.6.4 Belebungsbecken

Nach der Vorklärung wird das Abwasser durch ein offenes Gerinne zu den drei Belebungsbecken geleitet. In dem Gerinne wird der Rücklaufschlamm zugegeben. Für die drei Belebungsbecken sind zwei Fahrweisen möglich. Die Becken werden

- als Kaskade nacheinander durchflossen oder
- dreistraßig betrieben.

Im Normalfall hat sich der Kaskadenbetrieb bewährt. Das erste Becken wird als Deni- und Bio-P-Becken gefahren, das zweite als Nitri-Becken und das dritte als Nachreinigung, da die Industrieeinleitungen auch schwerabbaubare Inhaltsstoffe enthalten. Die Rezirkulation für den Stickstoffabbau wird mit dem Rücklaufschlammkreislauf erreicht. Die feinblasigen Belüftungen der Becken werden intermittierend betrieben. Über Analyser wird die Luftmenge bedarfsgerecht gesteuert. Jedes der drei Becken ist mit einer ausreichenden Gebläsekapazität ausgerüstet, um auch bei Außerbetriebnahme eines Beckens eine ordnungsgemäße Abwasserreinigung zu ermöglichen.

4.6.5 Nachklärung

Der Abwasserstrom wird über ein Verteilerbauwerk gleichmäßig auf die drei Nachklärbecken verteilt, die als Rundbecken mit horizontaler Sohle und Saugräumung ausgebildet sind. Über die Zahnschwellen der Nachklärbecken fällt das Abwasser in die untereinander verbundenen Klarwasserrinnen der drei Becken und fließt aus der Rinne des dritten Beckens ins Ablaufgerinne. Der Rücklaufschlamm wird am Beckenboden abgesaugt und einem Schneckenpumpwerk zugeleitet, von dem er dem Gerinne zwischen Vorklärung und Belebungsbecken zufließt.

4.6.6 Ablauf der Kläranlage

Das offene Ablaufgerinne der Kläranlage endet in einem Ablaufschacht, an den sich ein Armaturenschacht anschließt. Von dort führt eine Freispiegelleitung DN 1200 durch den Rheindeich zu einem Kontrollschacht im Rheinvorland, in dem die Leitung von DN 1200 auf DN 1000 reduziert wird. Diese in Stahlbetonrohren ausgeführte Leitung durchquert das Rheinvorland bis zum Auslaufbauwerk.

4.6.7 Hochwasserpumpwerk

Während bei Niedrigwasser des Rheins mehrere Meter Gefälle zwischen dem Wasserspiegel der Nachklärbecken und dem Rhein vorhanden sind, ist bei Hochwasser ein Freispiegelablauf nicht mehr möglich. Deshalb kann im Armaturenschacht die Ablaufleitung abgeschiebert werden. Das geklärte Abwasser wird dann über ein Hochwasserpumpwerk über die Deichkronenhöhe angehoben und durch die dann als Freispiegeldruckleitung funktionierende Ablaufleitung in den Rhein gedrückt. Im Hochwasserpumpwerk heben drei Pumpen das Wasser, eine vierte wird als Reserve vorgehalten.

4.6.8 Schlammbehandlung

Der Überschussschlamm wird aus dem Rücklaufschlamm abgezogen und dem Schlammspeicher zugeleitet. Zusammen mit dem Vorklärschlamm wird er in einem Faulbehälter anaerob stabilisiert. Der ausgefaulte Schlamm wird zwischengespeichert, mit einer Zentrifuge entwässert und zur Entsorgung abgefahren. Das anfallende Trübwasser fließt im Freigefälle einem Pumpwerk zu, das es in den Kläranlagenzulauf fördert.

4.6.9 Messungen

Aus dem Rohabwasser des Mischwasserpumpwerks Rheinpromenade (MWPW) und in der Einlaufgruppe des Klärwerks wird ein Probestrom entnommen, in dem CSB, $\text{NO}_x\text{-N}$, Leitfähigkeit, pH-Wert und Temperatur gemessen werden. Die Messungen wurden für das Prozesssteuerungssystem eingerichtet. Die zugehörige Wassermenge wird am Beginn der Druckrohrleitung im MWPW durch ein MID ermittelt.

Die Messung der Zulaufmenge der Kläranlage erfolgt mit einem MID in der gedückerten Rohrleitung zwischen Sandfang und Vorklärung.

Nach Rechen und Vorklärung werden Probestrome für die Eigenüberwachung des Kläranlagenzulaufs in den Wasseruntersuchungsraum geleitet, wo sie in Probenehmern gesammelt und auf CSB, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_x\text{-N}$, LF und den pH-Wert untersucht werden.

Die drei Belebungsbecken sind folgendermaßen ausgestattet:

- Becken 1: O_2 , NO_x , $\text{PO}_4\text{-P}$, pH-Wert, Temperatur
- Becken 2: O_2 , NO_x , $\text{NH}_4\text{-N}$, pH-Wert, Temperatur
- Becken 3: O_2 , NO_x , pH-Wert, Temperatur.

In den Ablauf der Belebungsbecken wird direkt hinter dem Becken Eisen-III-Chlorid zur Phosphatfällung dosiert. Etwa 35 m dahinter, vor der Aufteilung auf die Nachklärungen, wird ein Probestrom für einen $\text{NH}_4\text{-N}$ - und einen $\text{PO}_4\text{-P}$ -Analyser zur Überwachung des Kläranlagenablaufs entnommen. Der $\text{PO}_4\text{-P}$ -Analyser regelt außerdem die Dosierung des Eisen-III-Chlorids.

Die im Ablaufgerinne eingebaute Venturi-Messung entsprach nicht mehr den Anforderungen. Deshalb wurde ergänzend zur vorhandenen Wasserspiegelmessung eine Fließgeschwindigkeitsmessung installiert. An dieser Stelle ist auch die Probenahme für die Ablaufmessungen installiert. Der Probestrom wird analog zur Zulauf-Beprobung in den Wasseruntersuchungsraum gepumpt und dort mit Probenehmern beprobt.

5 Anpassung des Entwässerungssystems für das Prozesssteuerungssystem

5.1 Anpassungsbedarf

Für das neue Prozesssteuerungssystem waren neben der Entwicklung des eigentlichen Prozesssteuerungssystems (Kapitel 7) umfangreiche technische Vorleistungen zur Anpassung des Entwässerungsnetzes mit den dazugehörigen Sonderbauwerken bzw. Regelstrecken notwendig. Dies umfasste sowohl bauliche Anpassungen, aber vor allem Investitionen im Bereich der EMSR-Technik. Neben der Ausstattung mit Messtechnik zur Erfassung der hydraulischen Zustände und der frachtmäßigen Belastung beinhalteten diese Investitionen auch die Ausstattung der Sonderbauwerke mit Datenfernübertragungstechnik.

Im Vorfeld der Durchführung der Investitionen erfolgte im Rahmen der gängigen Richtlinien eine Voruntersuchung hinsichtlich der Steuerungswürdigkeit der einzelnen Anlagenteile des Entwässerungsnetzes unter besonderer Berücksichtigung von DWA-M 180, 2005. Entsprechend dieser Ergebnisse erfolgte eine Festlegung der Sonderbauwerke, die im Rahmen des Projekts berücksichtigt werden sollten, und der jeweils notwendigen Anpassungsmaßnahmen.

5.2 Auswahl relevanter Sonderbauwerke

Im Vorfeld erfolgte eine intensive Voruntersuchung hinsichtlich der Steuerungswürdigkeit der Sonderbauwerke des Kanalnetzes der Stadt Emmerich am Rhein, insbesondere der Regenbcken. Dabei wurden folgende Kriterien beachtet bzw. hatten Einfluss auf die Bewertung:

- Gesamtspeichervolumen und verfügbares Speichervolumen,
- Grundausstattung an EMSR-Technik (insbesondere Messtechnik wie Füllstandsmessungen),
- technischer und baulicher Anpassungsbedarf und daraus resultierender Investitionsbedarf.

Bei der Untersuchung stellte sich heraus, dass die Grundausstattung im Bereich der EMSR-Technik aller betrachteten Sonderbauwerke für regelungstechnische Aufgabenstellung geeignet war bzw. die notwendigen Investitionen sich in einem realisierbaren Rahmen hielten.

Aus diesem Grund war das maßgebliche Kriterium bei der abschließenden Auswahl der für das neue Steuerungssystem einzubeziehenden Sonderbauwerke das Gesamt- sowie das freie Speichervolumen.

Becken mit einem Speichervolumen von deutlich weniger als 1.000 m³ eignen sich aufgrund der Zulaufsituation im Kanalnetz Emmerich nicht für steuerungstechnische Zwecke. Bei den verbleibenden Becken wurde im Anschluss überprüft, inwieweit freie Speicherkapazitäten zur Verfügung stehen. Dabei wurden für Niederschlagsereignisse mit verschiedenen Wiederkehrhäufigkeiten die resultierenden Höhenstände im Becken untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass alle untersuchten Becken, insbesondere bei Niederschlagsereignissen mit einer geringen Wiederkehrhäufigkeit (< 2 Jahre), über freie Kapazitäten verfügen und somit für die weiteren Untersuchungen in Betracht kamen.

Weitergehende Erläuterungen zur Auswahl und steuerungstechnischen Anpassung der Regenbecken für das Prozesssteuerungssystem werden im Kapitel 7.2 gegeben. Die relevanten Becken sind in der Abbildung 11 dargestellt.

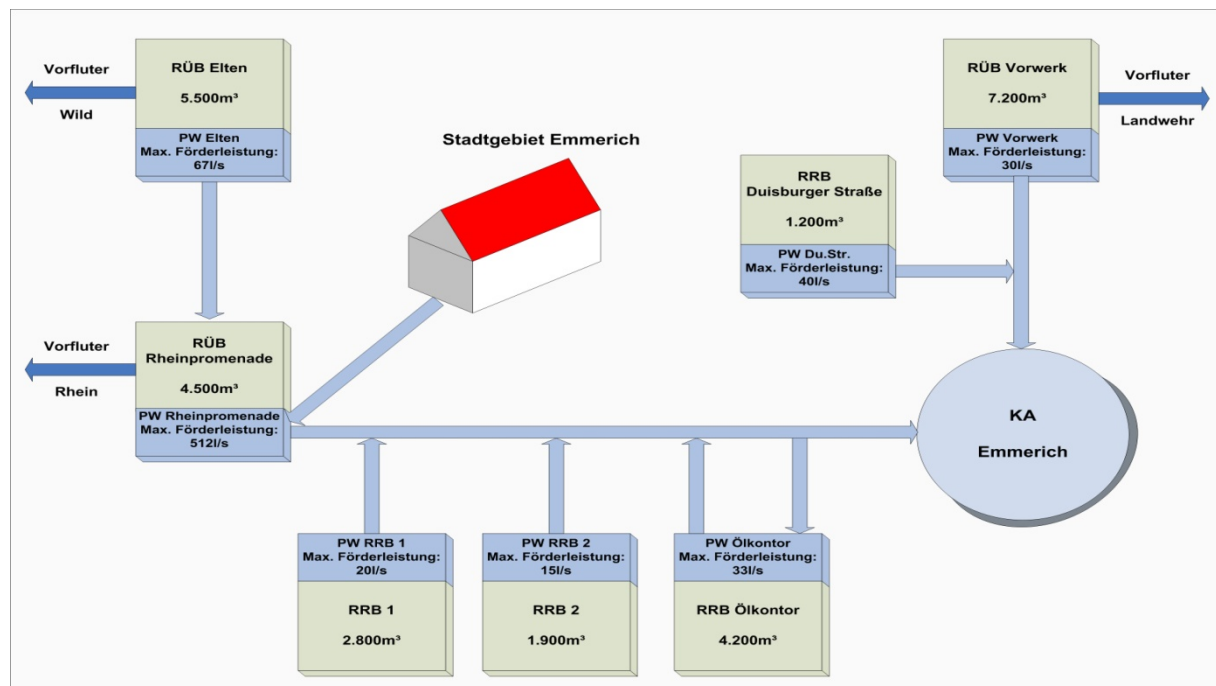


Abbildung 11: Übersicht der relevanten Sonderbauwerke im Rahmen des Forschungsprojektes

5.3 Bauliche Anpassungen

5.3.1 Bauliche Vorleistungen der TWE

Seit ihrer Gründung im Jahr 2004 investierte die TWE gezielt in die Sanierung der Kanalnetze und die Sonderbauwerke. Zunächst standen Aufgaben zur Erhaltung der Bausubstanz und Reinvestitionen in die Maschinenteknik neben den in Kapitel 5.4 beschriebenen Maßnahmen im Bereich der EMSR-Technik im Vordergrund. Auf diese Weise wurden die Voraussetzun-

gen für die Implementierung des Prozesssteuerungssystems geschaffen. Einige in diesem Zusammenhang wichtige bauliche Maßnahmen werden nachfolgend genannt:

- Das **Mischwasserpumpwerk an der Rheinpromenade** fördert den größten Teil des Abwassers aus den Einzugsgebieten Emmerichs zur Kläranlage. Der Beton der Pumpenvorlage war aufgrund hoher Schwefelwasserstoffgehalte des Abwassers stark korrodiert. Mit einer aufwendigen Abwasserumleitung wurde der Sumpf trockengelegt und eine grundlegende Sanierung der Betonoberfläche vorgenommen. Eine anschließende Beschichtung mit Polyurethan sichert langfristig den Bestand des Bauwerks. Von den fünf für die Abwasserumleitung eingesetzten Unterwasserpumpen wurden anschließend vier in Trockenaufstellung im Pumpwerk als Ersatz für die vorhandenen Pumpen eingesetzt. Die fünfte Pumpe wird als Ersatzreserve vorgehalten. In diesem Zusammenhang wurde auch die Verrohrung ausgetauscht und eine neue MID-Messung zur Kontrolle der Förderleistung eingebaut. Die neuen Pumpen der Firma KSB werden mit dem System "Pump-Expert" überwacht und besitzen so eine umfassende Funktionskontrolle.
- Im **RÜB Rheinpromenade** heben sechs Rohrumpen DN 800 mit einer Förderleistung von ca. 1.000 l/s pro Pumpe das Abwasser ins Becken und in den Rhein. Über mehrere Jahre wurden die aus Altersgründen abgängigen Pumpen gegen neue ausgetauscht und damit die Funktion des Beckens nachhaltig gesichert.
- Die **Regenwasserbehandlung Vorwerk** wurde hinsichtlich ihrer Auslegung nach dem aktuellen Stand der Technik überprüft. Die vorhandenen Becken erwiesen sich als ausreichend. Der vermutete Investitionsbedarf bestätigte sich nicht. Ungünstige Rückströmungen bei der Entleerung werden im Rahmen der Implementierung des Prozesssteuerungssystems abgestellt (Anpassung der Betriebsweise geplant, mit evtl. notwendigem Antrag gem. § 58.2 LWG).
- Die **Regenwasserbehandlung Stadtweide/LDZ** (Logistisches Dienstleistungszentrum) erforderte ebenfalls keinen Umbau.
- Die **Verbindung der beiden Druckrohrleitungen** vom Mischwasserpumpwerk Rheinpromenade zur Kläranlage und dem Zulauf zum Regenrückhaltebecken Industriehafen bildet die wichtigste Voraussetzung für die Realisierung des Prozesssteuerungssystems. Die im folgenden Kapitel beschriebene Maßnahme erlaubt die Nutzung der freien Kapazität des Beckens als Puffer- und Havariebecken.

5.3.2 Anbindung der Abwasserdruckrohrleitung an das RRB Industriehafen

5.3.2.1 Gewählte Verbindung

Wie in Kapitel 4.5 nachgewiesen, steht im RRB Industriehafen Speichervolumen zur Verfügung, das bei Starkregenereignissen als Zwischenspeicher genutzt werden soll. Hierzu muss eine neue Verbindung von der bestehenden Abwasserdruckrohrleitung in das Regenrückhaltebecken Industriehafen realisiert werden. In einer Variantenuntersuchung wurde der direkte Anschluss an das Becken verworfen; eine Verbindung mit der vorhandenen Befüllleitung DN 800 von der Pumpstation Deichstraße, aus Einzugsgebiet 4, wurde als wirtschaftlichste Lösung ausgewählt. Da diese GFK-Leitung seit ihrem Bestehen noch nie in Betrieb war, ergeben sich keine betrieblichen Nachteile, und die Realisierung ist deutlich weniger aufwendig als ein direkter Anschluss an das Becken.

Für die Überleitung zum Regenbecken waren daher die Druckrohrleitung DN 800 und die Druckrohrleitung DN 600 (vom Pumpwerk Rheinpromenade zur Kläranlage), die ein Stück parallel verlaufen, zu verbinden. Die Verbindung der beiden Druckrohrleitungen ist durch eine ca. 8 m lange Verbindungsleitung DN 500 mit einer MID-Regelstrecke hergestellt worden.

Erschwert wurde die Ausführung dadurch, dass es sich bei der vorhandenen Abwasserdruckrohrleitung DN 600 AZ um die Hauptleitung vom Stadtgebiet Emmerich zur Kläranlage handelte und eine Außerbetriebnahme dieser Leitung nur bei Trockenwetter kurzzeitig möglich war.

Bei der statischen Auslegung der Schächte und der Einbindung der Rohrleitungen waren die bei geschlossenen Schiebern wirkenden statischen Kräfte aus den Rohrleitungen zu berücksichtigen. Außerdem wurde eine Druckstoßberechnung durch die Firma SIGMA aus Unna durchgeführt. Die sich hieraus ergebenden dynamischen Kraftspitzen wurden ebenfalls bei der Bauwerksauslegung angesetzt.

5.3.2.2 Bauwerke

Abzweigschacht

Der neue Abzweigschacht wurde als Betonfertigteile erstellt und an der Einbaustelle mit Edelstahlrohrleitungen und Schiebern ausgerüstet. Zum Einbau wurde aus der Asbestzementrohrleitung zur Kläranlage ein komplettes Rohr entnommen, der vormontierte Schacht in die Lücke gesetzt und die Rohrleitungen mittels speziell angefertigter Kupplungen verbunden. So konnte nach wenigen Stunden das Abwasser wieder zur Kläranlage gepumpt werden.

Das durchgehende Stahlrohr wurde an die Wanddurchführungen des Schachtes kraftschlüssig mit Mauerkragen angeschlossen. Innerhalb des Schachtes wurde ein T-Stück mit Pass- und Ausbaustück und anschließendem Regelschieber in die Druckleitung DN 600 eingebaut. Die abzweigende Leitung erhielt ebenfalls ein Pass- und Ausbaustück und einen Handschieber, der über eine Straßenkappe geöffnet und geschlossen werden kann. Die Wanddurchführung der abzweigenden Leitung wurde mit zwei Gliederketten gedichtet, um Spannungen aus unterschiedlichen Setzungen der beiden Schächte nicht auf das Rohr zu übertragen.

MID-Schacht

Der Schacht für die magnetisch-induktive Durchflussmessung (MID) liegt in der neuen Verbindungsleitung und nimmt das MID mit Reinigungskasten, Pass- und Ausbaustück sowie Regelschieber auf. Im Normalbetriebsfall drosselt der Regelschieber den Abfluss so, dass das MID ständig vollgefüllt ist. Lediglich im Havariefall würde man den Schieber voll öffnen, und es könnte in der Phase der Füllung der Rohrleitung DN 800 zu einer kurzzeitigen Teilfüllung des MID kommen. In diesem Fall wird das Messsignal aber nicht zum Steuern des Schiebers benötigt.

Die Einführung der Verbindungsleitung zwischen den Schächten wurde mit zwei Gliederketten gedichtet, um Zwängungen zu vermeiden. Die abgehende Leitung erhielt einen Mauerkragen und wurde in der Betonwand vergossen, um die Kräfte aus dem Wasserdruck auf den geschlossenen Schieber aufnehmen zu können. Die Bauhöhe des Schachtes konnte kleiner gewählt werden als bei dem Abzweigschacht, da der Antrieb für den 500er Schieber keine so große Bauhöhe erfordert.

5.3.2.3 Anschluss an die Druckleitung DN 800

Die Druckrohrleitung DN 800 besteht aus GFK-Rohren. Hier wurde ein entsprechendes Passstück ausgeschnitten, um ein T-Stück mit einem Abgang DN 500 einsetzen zu können. Die Verbindung zu der Edelstahlleitung erfolgte mit zwei elastischen Kupplungen, um Setzungen und die Winkelabweichung auszugleichen. Das T-Stück erhält zur Aufnahme der Umlenkkräfte aus der Rohrleitung DN 500 ein Widerlager aus Massenbeton.

5.3.2.4 Anbindung der Station an die EMSR-Technik des RRB Industriehafen

Der zugehörige neue Schaltschrank mit der Steuerungstechnik wird mit einem eigenen Stromanschluss mit elektrischer Energie versorgt. Die Steuerungstechnik wurde über ein vorhandenes Steuerkabel zwischen RRB Industriehafen und Pumpwerk an der Deichstraße mit Verlän-

gerung zum neuen Schaltschrank an die vorhandene Steuertechnik in der Station RRB Industriehafen angekoppelt und damit die Verbindung zum Prozessleitsystem der Kläranlage Emmerich hergestellt.

5.4 Steuerungstechnische Anpassungen

5.4.1 Steuerungstechnische Vorleistungen der TWE

Wie in Kapitel 4 beschrieben, bewirtschaftet die TWE neben der Kläranlage ein umfangreiches Kanalnetz mit zahlreichen Sonderbauwerken wie Regenbecken und Pumpstationen. Da nicht alle Regenbecken ausreichende Speicherreserven für steuerungstechnische Anwendungen aufweisen, sind nur sieben Regenbecken inklusive der dazugehörigen Pumpwerke in das Prozesssteuerungssystem integriert (siehe Auswahl in Kapitel 7.2). Ergänzend zu Anlage 2 mit einer Gesamtübersicht über das Entwässerungssystem ist in Abbildung 11 eine Übersicht mit den für das Projekt relevanten Sonderbauwerken zu sehen.

Da sich der Zufluss der Kläranlage qualitativ und quantitativ im Minutenraster stark ändern kann, ist eine Online-Vernetzung der relevanten Außenstationen mit der Kläranlage notwendig, um bei Belastungsstößen den Zufluss der Kläranlage durch ein aktives Management der Becken im Netz zu steuern. Auf der Kläranlage sollen die Abflüsse sowie relevante Messwert-Änderungen der Abwässer der Außenstationen verwertet werden können, um insbesondere die Becken im Verbund mit der Kläranlage zu betreiben.

Auf der Leit- sowie der Steuerungsebene wurden jeweils einheitliche Hard- und Software eingeführt. Zentral wurden die Geräte der Leitebene über einen Switch sternpunktartig vernetzt und so eine PC-basierte Client-Server-Struktur mit redundanten Prozess-Servern aufgebaut. Neben den üblichen SCADA-Funktionalitäten (SCADA = Supervisory Control and Data Acquisition) auf der Leitebene und den Programmier-/Parametriersystemen für die angeschlossenen Steuerungen wurde mittels eines separaten Servers das übergeordnete Kanalnetzsteuerungssystem integriert.

Ein weiterer positiver Effekt der Modernisierung der Steuerungs- und Leitechnik ist die zentrale Zusammenfassung, Archivierung und Verarbeitung aller abwassertechnischen Anlagen im Sinne der Eigenüberwachungsverordnungen SÜwV Kan bzw. SÜwV-kom.

Abbildung 12 zeigt den Aufbau der Leit- und Automatisierungssysteme der Kläranlage und der Außenstationen.

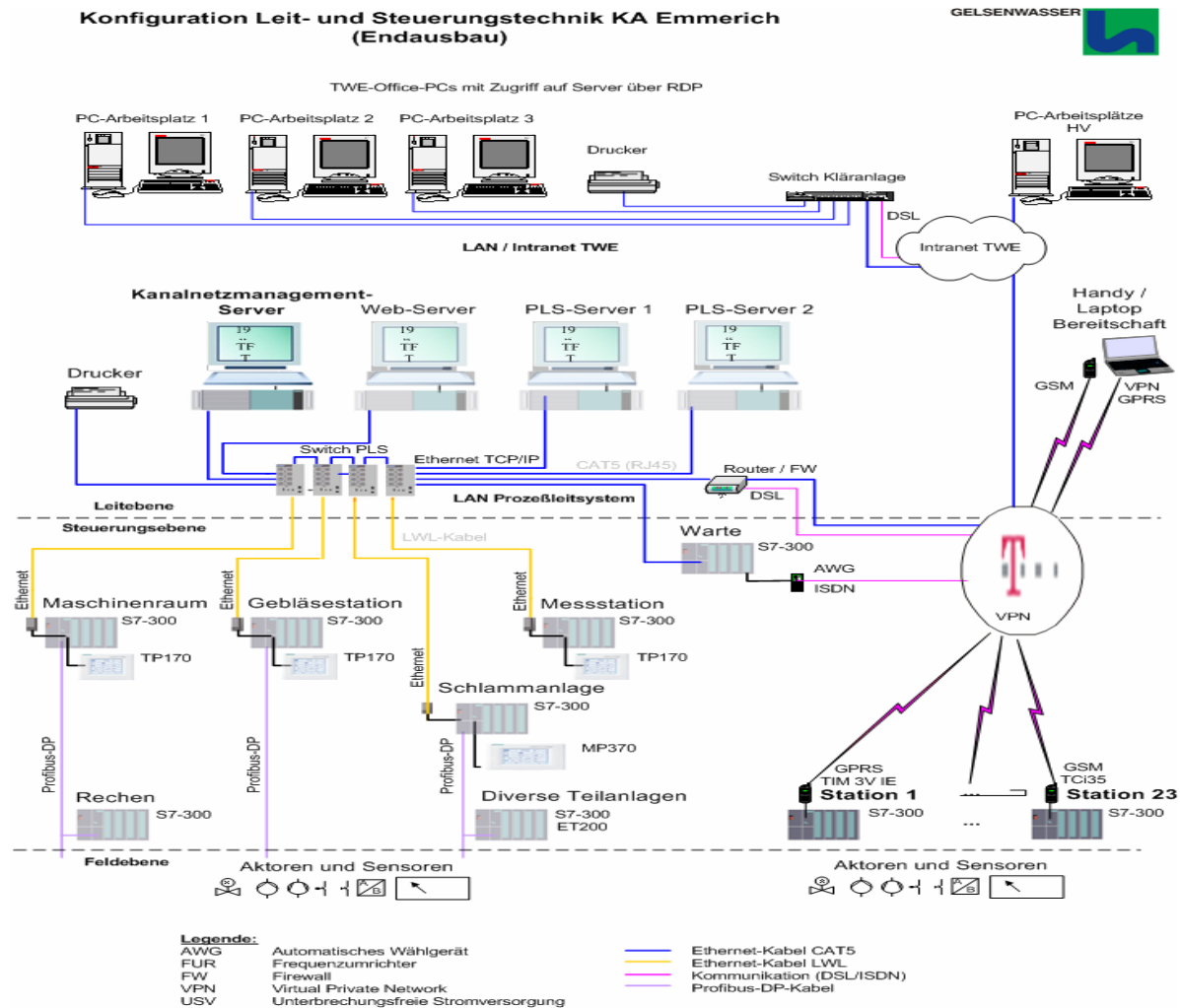


Abbildung 12: Leit- und Automatisierungssysteme der Kläranlage und der Außenstationen

5.4.2 Datenübertragung

Um die Kommunikation des Kanalnetzsteuerungssystems mit den Außenstationen sowie die Datenübertragung zum Prozessleitsystem (PLS) in Echtzeit gewährleisten zu können, ist eine Vernetzung mit dem PLS notwendig.

Als technische Lösung wurde die Datenfernübertragung mit Hilfe von GPRS (General Packet Radio Service, paketorientierter Dienst zur Datenübertragung in GSM- und UMTS-Netzen) gewählt. Alle relevanten Außenstationen wurden mit der entsprechenden Technik ausgerüstet.

Die Kommunikation bzw. der Datenaustausch zwischen Außenstation und Kanalnetzsteuerungssystem/PLS erfolgt dabei im Minutenraster.

Allerdings stellte sich während des Projektverlaufs heraus, dass diese Verbindungsart für den Bereich Emmerich relativ störanfällig ist. So wurden vermehrt Verbindungsstörungen während Niederschlagsereignissen festgestellt, was für den sicheren Betrieb des Kanalnetzsteuerungssystems ungeeignet ist.

Nach Abwägung der möglichen technischen Alternativen wurde entschieden, drei Außenstationen mittels kabelgebundenem DSL-Anschluss mit dem Prozessleitsystem zu vernetzen. Dabei handelt es sich um folgende Stationen:

- RRB Industriehafen,
- Mischwasserpumpwerk Rheinpromenade,
- Elten.

Nach Umstellung der Datenübertragungsmethode konnten die Verbindungsausfälle auf ein Minimum reduziert werden.

5.5 Messtechnik

5.5.1 Überblick

Insgesamt wurde für das neue Prozesssteuerungssystem und die Begleituntersuchungen umfangreiche Messtechnik im Entwässerungssystem installiert, die in den nachfolgenden Abschnitten erläutert wird.

5.5.2 Definition der Durchflussmessungen

Als technisch beste Lösung haben sich für die Durchflussmessungen bei den gegebenen Randbedingungen die Geräte der Firma NIVUS herausgestellt. Nach Angaben des Herstellers bieten sie mit dem stationär betriebenen OCM Pro CF und dem mobilen PCM Pro Ex hochgenaue Durchflussmessungen für teil- und vollgefüllte Rohre unterschiedlichster Geometrien wie z. B. auch Ei-Profile. Diese funktioniert auch in stark verschmutzten und abrasiven Medien wie Rohabwasser und liefert Messungen des realen Geschwindigkeitsprofils und ordnet die Einzelgeschwindigkeiten örtlich zu.

Die Messgeräte registrieren folgende Parameter, die auch aufgezeichnet werden:

- Höhenstand [m],
- Geschwindigkeit in [m/s],
- Durchfluss in [m³/s].

Der Einbau der Messgeräte soll an hydraulisch wichtigen Punkten in Hauptsammlern erfolgen. Für die Kalibrierung in HYSTEM-EXTRAN sowie der Modellierung in SIMBA-Sewer ist der beste Standort am Ende eines Einzugsgebietes, da hier nicht nur ein Teilstrang betrachtet werden kann, sondern das vollständige Gebiet.

Elten

Im Ortsteil Elten sind zwei mobile und ein stationäres Durchflussmessgerät installiert worden.

Das stationäre Gerät befindet sich im Messcontainer beim Pumpwerk Elten (Schacht 20048), in dem auch Frachtmessungen mit einer Sonde durchgeführt werden können (vgl. Kapitel 5.5.3). Es zeichnet den Abfluss aus dem gesamten Einzugsgebiet von Elten auf und erfüllt somit die Anforderung zur Kalibrierung in HYSTEM-EXTRAN sowie zur Modellierung in SIMBA-Sewer.

Um das hydrodynamische Modell besser eichen zu können, sind zwei weitere Geräte temporär im Netz von Elten eingebaut worden, die nach Abschluss der Kalibrierung in das Netz von Emmerich umgesetzt werden sollen.

Eine der beiden mobilen Messungen ist im Schacht 21041 (Kanal DN 400 mit einem Gefälle von 52,5 o/oo) in der Lindenallee untergebracht, damit das deutlich dynamischere Abflussverhalten aus dem Teileinzugsgebiet Hochelten aufgenommen werden kann (vgl. Kapitel 4.2.1). Die Werte wurden zunächst im 5-Minuten-Raster aufgezeichnet, um die Kapazität des Akkus zu schonen und die Intervalle für die Auslesung der Speicherkarte lang zu halten. Das Aufnahmeintervall wurde für ein feineres Aufnahmeraster dann auf 1-Minuten-Werte verkürzt, so dass jetzt alle zwei Wochen die Karte ausgelesen und der Akku gewechselt werden muss.

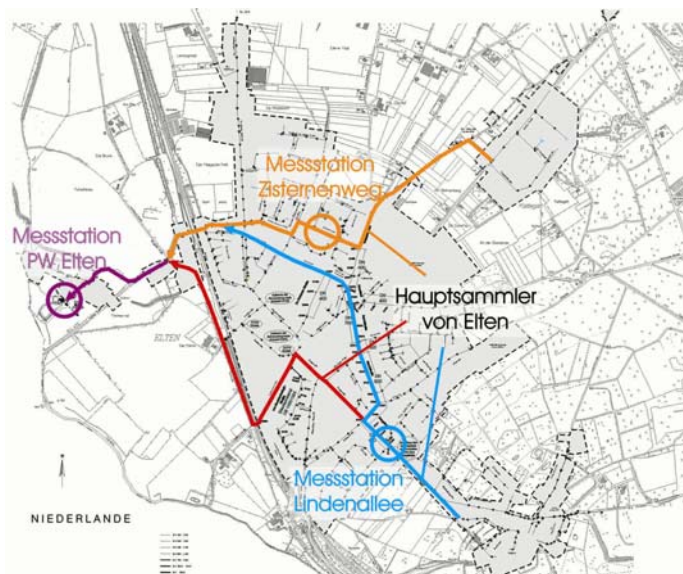


Abbildung 13: Hauptsammler und Messstationen Elten

Die zweite mobile Durchflussmessung befindet sich im Hauptsammler im Zisternenweg in Schacht 20013 (Kanal DN 1400), um die hydraulischen Verhältnisse des nördlichen Hauptsammlers genauer zu betrachten. Hier wird kein Teileinzugsgebiet abgedeckt. Dennoch eignet sich dieser Standort gut zur Kalibrierung des Modells in HYSTEM-EXTRAN, da dieser Bereich so gut wie rückstausicher ist und gute Wellen aufgezeichnet werden können.

Emmerich Stadt- und Außenbereich

Beim Entwässerungssystem von Emmerich und gerade im Bereich des Pumpwerks Rheinpromenade, wo zwei Hauptsammler aus zwei Teileinzugsgebieten zusammenlaufen, ist das Rückstaupotential besonders groß. An diesem Punkt lassen sich bei Regenwetter keine auswertbaren Wellen aufzeichnen, da der Abfluss bei Regenwetter vor dem Wehr im Trennbauwerk eingestaut wird und erst ab einem Wasserstand von 13,00 m ü. NN durch das geöffnete Wehr dem RÜB Rheinpromenade zufließt (vgl. Kapitel 4.2.3).

Aus diesem Grund wurden in Emmerich zwei Durchflussmessgeräte in Fließrichtung weiter oberhalb positioniert, ohne die Teileinzugsgebiete der Hauptsammler vollständig abzudecken. Dieser Bereich ist nicht so stark Rückstau-behaftet, so dass auch im Regenwetterfall die Aufzeichnung einer repräsentativen Welle für einen längeren Zeitraum möglich ist.

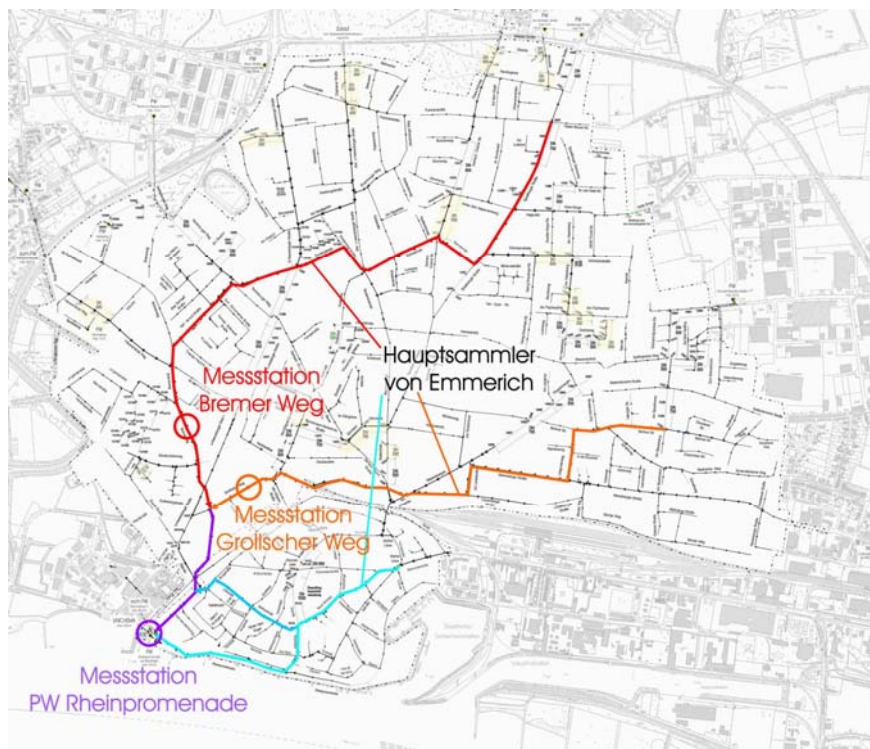


Abbildung 14: Hauptsammler und Messstationen Emmerich Stadt- und Außenbereich

Die Installation der stationären Durchflussmessgeräte erfolgte im Grollscher Weg in Schacht 10108 (Kanal DN 1800) sowie im Bremer Weg in Schacht 10074 (Kanal DN 1600). Da die Stromversorgung der Station im Bremer Weg von den Stadtwerken Emmerich über die Straßenbeleuchtung und nur ab der Dämmerungsphase sichergestellt wurde, musste eine Lösung mit Ladegerät und Akkubetrieb gewählt werden.

Hinzu kommt eine bereits vorhandene und in Betrieb befindliche Messstation im Pumpwerk Rheinpromenade, die mittels eines MIDs den Durchfluss des ankommenden kommunalen Abwassers aus dem Emmericher Stadt- und Außenbereich misst.

Eine Aufzeichnung bzw. Messung des Zuflusses von der Uniqema, jetzt KKK Oleo, in den Pumpensumpf des Pumpwerks Rheinpromenade ist nicht möglich. Da aber der Zufluss zur Kläranlage mittels MID gemessen wird und der Abfluss aus dem Pumpwerk Elten ebenfalls, kann auf dieser Basis auch der Zufluss von KKK Oleo zumindest rechnerisch bestimmt werden.

Vorwerk (Gewerbegebiet Ost)

Bei der Station Vorwerk ist ein Messcontainer analog zu dem Container in Elten aufgestellt und angeschlossen worden. Ein Auswertegerät von NIVUS für eine Durchflussmessung war nicht erforderlich, da die Station Vorwerk bereits über eine Durchflussmessung verfügt, die auch an das PLS in der Kläranlage per Datenlogger angeschlossen ist. Die Messung ist im Schacht 00033 (Kanal DN 2000) installiert worden. Die Werte sind je nach Höhenstand im Kanal und dem damit verbundenen Schaltpunkt der Regenwasserpumpen für die Befüllung des RÜB (vgl. Kapitel 4.3.3) stark schwingungsbehaftet. Eventuell ist ein neuer Schacht im Einzugsgebiet zu bestimmen, in dem ein mobiles Durchflussmessgerät installiert werden könnte.

5.5.3 Definition der Frachtmessungen

Für eine aussagekräftige Charakterisierung des Abwassers sind die folgenden Parameter maßgeblich:

- CSB in [mg/l],
- AFS in [mg/l],
- NO_x in [mg/l],
- LF in [mS/cm],
- pH in [pH],
- T in [°C].

Im Mischwasserpumpwerk werden folgende Parameter erfasst:

- CSB in [mg/l]
- AFS in [mg/l]
- NO_x in [mg/l]
- LF in [mS/cm]
- pH in [pH]
- T in [°C]

Pumpwerk Elten

Die Messtechnik für das Einzugsgebiet Elten wurde in einem speziell angefertigten Messcontainer installiert. Die Probenahmepumpe befindet sich im Pumpensumpf und fördert über eine Zuleitung direkt in den Messcontainer. Über die installierten Frachtmessungen sollen Frachtschübe, insbesondere zu Beginn eines Niederschlagsereignisses, erkannt werden, um das anfallende Mischwasser gezielt speichern können. Folgende Messtechnik ist installiert:

- CSB in [mg/l],
- AFS in [mg/l],
- NO_x in [mg/l],
- NH₄-N (Nasschemisches Messverfahren) in [mg/l].

Pumpwerk Vorwerk

Analog zum Pumpwerk Elten erfolgte die Installation der Messtechnik in einem speziellen Messcontainer. Im Gegensatz zum Mischwasserpumpwerk Rheinpromenade und zum Pumpwerk Elten erfolgte die Probenahme aus dem Zulauf des Regenwasserkanals. Da im Einzugsgebiet des Pumpwerks Vorwerk vorrangig Gewerbe und Industrie angesiedelt ist, wird davon ausgegangen, dass das anfallende Niederschlagswasser deutlich höher belastet ist, als beispielsweise in Einzugsgebieten mit rein kommunaler Nutzung.

Die Probenahmepumpe ist dementsprechend im Regenwetterpumpwerk installiert und fördert direkt in den Messcontainer. Um Fehlmessungen bei Trockenwetter zu vermeiden, sind Messtechnik und Probenahmepumpe mit dem im Stauraumkanal installierten Durchflussmessgerät verbunden. Steigt der Durchfluss an dieser Stelle über einen definierten Wert, beginnt die Pumpe zu fördern und die Messgeräte erfassen die vorhandenen Frachten. So kann zeitnah erkannt werden, ob aus dem EZG Vorwerk belastetes Regenwasser vorliegt und ob entsprechende Maßnahmen, wie gezieltes Zwischenspeichern, notwendig sind.

Folgende Messtechnik ist installiert:

- CSB in [mg/l],
- AFS in [mg/l],
- NO_x in [mg/l].

Zulauf der Kläranlage

Um die Belastungs- bzw. Zulaufsituation der Kläranlage in Bezug auf die Fracht beurteilen zu können, wurde im Zulaufbauwerk eine Frachtmessung installiert, mit Hilfe derer folgende Parameter erfasst werden:

- CSB in [mg/l],
- AFS in [mg/l],
- NO_x in [mg/l].

Die entsprechende Spektralsonde wurde in einer speziell für das Forschungsprojekt entwickelten Messvorrichtung, welche im Kapitel 5.5.4 beschrieben ist, installiert. Neben den oben aufgeführten Parametern wurde im Belebungsbecken 2 der Kläranlage eine Ionenselektive Sonde zur Erfassung der Ammoniumstickstoffkonzentration installiert.

Durch die beiden Messgeräte ist es möglich, genaue Aussagen über den aktuellen Belastungszustand der Kläranlage, insbesondere bei Trockenwetter, zu treffen. Basierend auf den Messergebnissen können somit gezielte Maßnahmen im Kanalnetz getroffen werden, um Belastungsspitzen effektiv abarbeiten zu können.

5.5.4 Selbst entwickelter Messbehälter für CSB-Messungen in Rohabwasser

Da die im Rahmen des Forschungsprojekts angeschafften Spektralmessungen die Konzentration im Rohabwasser messen sollen und ein Direkteinbau im Kanalnetz nicht möglich war, wurde eine spezielle Messvorrichtung entwickelt. Diese Messeinrichtung ist eine Eigenentwicklung der TWE und wurde in dieser Form für alle drei Messstellen der Spektralsonden eingesetzt. Die Besonderheit an diesem System ist, dass es sich um ein vollständig geschlossenes System handelt, Verunreinigungen im Bereich des Aufstellortes sowie Geruchsbelastungen lassen sich somit auf ein Minimum reduzieren. Weiterhin verfügt diese Messeinrichtung über ein Vorfiltersystem, über welches grobe Verunreinigung oder Fette abgefiltert werden, was zum einen zu einer Verbesserung der Messqualität führt und zum anderen den Aufwand bei den notwendigen manuellen Reinigungen vermindert. Ein weiterer Vorteil dieser Apparatur ist die Einbauneigung der Sonde. Diese beträgt ca. 45°, wodurch die durch die Luftspülung eingetragenen Luftblasen sich nicht vor den Messspalt setzen können und somit

ebenfalls die Qualität der Messwerte verbessert wird. Nachdem die Messeinrichtung speziell für die Station Mischwasserpumpwerk Rheinpromenade entwickelt, getestet und optimiert wurde, erfolgte eine Ausstattung der beiden anderen Messorte mit dieser Vorrichtung, welche in Abbildung 16 zu sehen ist.



Abbildung 16: Messbehälter Spektralmessung am Beispiel MWPW Rheinpromenade

5.5.5 Niederschlagsmessgeräte

Vor Projektbeginn waren im EZG zwei Niederschlagsmessgeräte, welche sich am Pumpwerk Elten und auf der Kläranlage befinden, installiert. Da beide Messorte ca. 11 km voneinander entfernt liegen, wurde die Überregnung des EZG in der Vergangenheit nicht genau genug aufgezeichnet. Dies war vor allem für die Kalibrierung der Simulationsmodelle problematisch, da gerade räumlich beschränkte Regenereignisse, wie z. B. Gewitterzellen, nicht genau genug aufgezeichnet wurden und somit die Simulationsergebnisse keine ausreichende Qualität hatten. Daher wurden zur Ergänzung zwei weitere Niederschlagsmessgeräte zwischen diesen Standorten an den Pumpwerken Ingenkampstraße und Dechant-Sprüngen-Straße aufgestellt.

Ein weiterer Aspekt der zusätzlichen installierten Messgeräte ist der höhere Informationsgehalt für das Prozesssteuerungssystem, bei dem die Niederschlagsintensität einen wichtigen Eingangsparameter darstellt. Wird beispielsweise nur ein Teil des Gesamteinzugsgebiets überregnet, so ist das Prozesssteuerungssystem in der Lage die Information so zu verarbeiten, dass die betroffenen Pumpwerke effektiv eingestaut werden können.

6 Kompletterung und Vereinfachung der Simulationsmodelle

6.1 Hydrodynamisches Simulationsmodell Modell in HYSTEM-EXTRAN

6.1.1 Einsatz des Programmes HYSTEM-EXTRAN

Das hydrodynamische Simulationsmodell wurde mit Hilfe des Programmes HYSTEM-EXTRAN des Instituts für technisch wissenschaftliche Hydrologie (ITWH) aus Hannover aufgestellt. Hierzu waren neben den haltungsrelevanten Daten wie Rohrgeometrie, Länge, Gefälle, angeschlossene Fläche etc. auch die berechnungsrelevanten Parameter wie Benetzungs- oder Muldenverlust, Anfangs- und Endabflussbeiwert sowie Angaben zu den undurchlässigen und den durchlässigen Flächen zu ermitteln.

Die Berechnung des Kanalabflusses erfolgte dann - nach Bestimmung der Abflussbildung und Abflusskonzentration im Modul HYSTEM auf Basis der Netzdatei und der Regenbelastung - hydrodynamisch über die Lösung des Saint Venantschen Differentialgleichungssystems im Modul EXTRAN.

6.1.2 Modellierung der Einzugsgebiete von Emmerich

6.1.2.1 Allgemeines

Das Gesamtnetz von Emmerich besteht aus 16 Teilnetzen (inkl. Hüthum und die südwestlich befindlichen Ortsteile Praest, Vrasselt und Dornick) und liegt in der Kanaldatenbank bei der TWE im ISYBAU-96-Format vor. Dieses Format lässt sich in HYSTEM-EXTRAN importieren und als Modelldatenbank mit allen zur Berechnung erforderlichen Werten erweitern.

Die bereits vorliegenden modellierten Netze von Elten und Emmerich wurden mit den Daten der TWE abgeglichen und aktualisiert. Für die noch nicht im hydrodynamischen Modell implementierten Teileinzugsgebiete, wie die vier Einzugsgebiete am Industriehafen oder die östlich an den Außenbereich von Emmerich grenzenden Gewerbegebiete, wurden die Daten importiert und nachmodelliert. Insgesamt konnten 12 Teileinzugsgebiete von Emmerich berücksichtigt und in ein hydrodynamisches Modell übernommen werden. Datenbasis war die Kanaldatenbank der TWE mit Stand von 2006.

Keine Berücksichtigung fanden die Teileinzugsgebiete Hüthum (vgl. Kapitel 4.2.2), da hier eine Trennentwässerung vorliegt und lediglich das Schmutzwasser zur Kläranlage gelangt, sowie das Gewerbegebiet Budberger Straße (vgl. Kapitel 4.3.2) und die sogenannten Süd-

staaten Praest, Vrasselt und Dornick, die über eine Druckentwässerung verfügen, die in HYSTEM-EXTRAN nicht abbildbar ist. Der Schmutzwasseranfall von Hüthum und des Gewerbegebietes Budberger Straße wurde bei der Simulation allerdings berücksichtigt und geht in die Berechnung mit ein.

Für die Gewerbegebiete Vorwerk, Industriehafen, Duisburger Straße, Blackweg und LDZ Stadtweide wurde der Trockenwetteranfall von 0,25 l/(s·ha) von der TWE durch Messkampagnen bestimmt. Dieser Wert wurde trotz der Vorgabe durch das DWA-Arbeitsblatt 118 von $q_G = 0,0 - 0,50$ l/(s·ha) bei Betrieben mit geringem und 0,50 - 1,0 l/(s·ha) bei Betrieben mit mittlerem bis hohem Wasserverbrauch berücksichtigt. Der Trockenwetteranfall von 0,25 l/(s·ha) wurde den Schmutzwasserkanälen in Abhängigkeit der Größe der angeschlossenen Fläche der parallel verlegten Regenwasserhaltungen zugeschlagen.

Die auf Basis der Bestandsdaten der TWE modellierten Pumpstationen der jeweiligen Teileinzugsgebiete fördern die berechnete Abwassermenge direkt zur Kläranlage.

6.1.2.2 Elten

Das Kanalnetz von Elten wurde bereits 2001 für den Generalentwässerungsplan (GEP) detailliert aufgenommen (analog Stadt- und Außengebiete s. u.) und in HYSTEM-EXTRAN modelliert. Das Netz beinhaltet sämtliche hydraulische Maßnahmen, die im Zuge des GEPs für einen Prognosezustand ermittelt wurden, um die Engpässe im vorhandenen System zu entfernen.

Der Prognosezustand berücksichtigt die Entwicklung des Stadtgebietes und der Einwohnerzahlen in den nächsten 20 Jahren, mit der Folge der Zunahme der im Entwässerungsgebiet anfallenden Wassermenge. Dazu wurden aufbauend auf dem Ist-Zustand mit Hilfe von Angaben aus Flächennutzungsplan, Bebauungsplänen und Abstimmung mit dem Stadtplanungsamt weitere Erschließungsgebiete und eine teilweise Verdichtung festgelegt. Es wurde eine zukünftige Einwohnerzahl im Betrachtungszeitraum von gut 5.000 Personen zugrunde gelegt.

Seit 2001 sind die tatsächlich umgesetzten Baumaßnahmen anhand von Planungs- oder Bestandsplänen in die Modelldatenbank des Prognosezustandes eingepflegt worden, so dass das Modell immer auf dem aktuellen Stand ist, inklusive der berechneten, aber noch nicht umgesetzten hydraulischen Maßnahmen.

Implementiert wurden weiterhin die Pumpstationen, die über Zuflüsse in den Haltungen definiert wurden, sowie das Regenüberlaufbecken.

6.1.2.3 Emmerich Stadt- und Außengebiet

Auch für das Emmericher Stadtgebiet und deren Außengebiete wurde ein GEP durchgeführt und der Bericht 2002 dem Staatlichen Umweltamt Krefeld vorgelegt.

Der hydraulische Ist-Zustand wurde durch eine terrestrische Vermessung der Lage und Höhen der bestehenden Schächte aufgenommen. Hinzu kam eine detaillierte Flächenermittlung auf Basis von Luftbilddauswertungen und der Zuordnung zu den jeweiligen Haltungen.

Der Planungszustand baut auf dem Datenbestand des Ist-Zustandes auf, hier wurden die erwarteten Veränderungen für den Planungshorizont von 20 Jahren eingearbeitet. Berücksichtigung fanden ohnehin geplante bzw. in der Realisierung befindliche Baumaßnahmen, Neuerschließungen und Bebauungsverdichtung. Der Modellregen und die globalen Parameter für HYSTEM-EXTRAN blieben unverändert. Die betriebliche Reibung für den Planungszustand wurde auf den Standardwert $k_b=1,5$ gesetzt.

Im Netz vom Stadt- und Außengebiet sind sechs Pumpstationen verteilt (vgl. Kapitel 4.2.3), die analog zur Modellierung im Netz Elten über Zuflüsse zu den Haltungen definiert sind, in denen die Druckleitungen enden.

Die hydraulische Situation am RÜB Rheinpromenade wurde detailliert abgebildet.

6.1.2.4 Vorwerk

Das Modell wurde über den bereits oben erwähnten Import der ISYBAU-96-Daten aufgebaut. Die unbefestigten und befestigten Haltungsflächen wurden mit Hilfe von Luftbildern und Angaben der TWE ermittelt.

In das Einzugsgebiet vom RÜB Vorwerk mündet die Druckleitung aus dem Gewerbegebiet Budberger Straße in den Schacht 12756 in der Albert-Einstein-Straße. Der ankommende Trockenwetterabfluss wurde mit 10,9 l/s bestimmt, das Regenwasser wird gedrosselt in den Vorfluter Landwehr geleitet und wird nicht bei der Simulation berücksichtigt. Der Trockenwetterabfluss von 10,9 l/s wird der Haltung 12756-12701 aufgeschlagen.

Das RÜB Vorwerk ist vollständig im Modell abgebildet.

6.1.2.5 Industriedafen

Die modelltechnische Umsetzung der vier Entwässerungsnetze im Industriedafen wurde analog zum Modell Vorwerk über Datenimport und Auswertung von Luftbildern aufgebaut. Das Einzugsgebiet der früheren Firma AKZO Nobel, jetzt Oleon, das über ein eigenständiges Netz verfügt und am Rand des Teileinzugsgebietes vom RRB Werftstraße liegt, wird nur teilweise abgebildet, da das firmeninterne Entwässerungsnetz der TWE nicht vollständig bekannt ist. Der von den TWE ermittelte permanente Schmutzwasseranfall von 14 l/s geht in die Berechnung mit ein, spielt aber nur eine untergeordnete Rolle bei der Auswertung.

Das Kanalnetz von Emmerich besteht aus 12 Teilnetzen, die über Pumpstationen und vorgeschalteten Regenrückhalte- bzw. Regenüberlaufbecken zur Kläranlage entwässern (vgl. Kapitel 4.2). Zehn der 12 Teilnetze sind hydraulisch unabhängig, die Teileinzugsgebiete im Industriedafen um die Becken Hafenstraße, Werftstraße und Industriedafen sind miteinander vermascht. Hieraus ergibt sich ab Überschreiten der Hochpunkte bei Schacht 11756 in der Van-Gimborn-Straße Kreuzung Industriestraße und Schacht 11821 in der Blücherstraße ein kommunizierendes System der Teileinzugsgebiete untereinander.

Die Netze verfügen über drei Regenrückhaltebecken, die mit den dazugehörigen Pumpstationen gemäß den Betriebshandbüchern modelltechnisch implementiert worden sind.

6.1.2.6 Duisburger Straße

Das Modell vom Teileinzugsgebiet Duisburger Straße ist bei weitem nicht so komplex wie die vorhergehend beschriebenen Netze. Die Kanaldaten konnten durch den Import der ISY-BAU-Daten übernommen werden, so dass nur die jeweils angeschlossenen Haltungsflächen über Luftbilder ermittelt werden mussten.

Das vorhandene Regenrückhaltebecken wurde analog zu den Becken Hafenstraße und Werftstraße modelliert und in das Modell implementiert. Die Pumpe fördert in der Simulation direkt zur Kläranlage und mündet nicht, wie in der Realität, in die Doppeldruckleitung, die vom Pumpwerk Vorwerk aus zur Kläranlage pumpt, da dies keinen Unterschied in den Simulationsergebnissen ergibt.

6.1.2.7 Blackweg

Das Netz umfasst lediglich 13 Regenwasser- und 26 Schmutzwasserhaltungen sowie zwei Haltungen für Mischwasser, die durch den Import der ISYBAU-Daten übernommen werden konnten. Die angeschlossenen Haltungsflächen wurden ergänzt.

Das Schmutzwasserpumpwerk, in dem auch der Regenrückhaltekanal DN 2000 über eine Drossel DN 500 mündet, wurde modelltechnisch abgebildet. Der Regenrückhaltekanal besitzt auch eine Abschlagsmöglichkeit in die Landwehr (vgl. Kapitel 4.3.5), die über einen freien Auslass simuliert wird. Die in den Regenrückhaltekanal integrierte Spülfunktion über eine Druckrohrleitung erfüllt keinen hydraulischen Zweck und wurde dementsprechend nicht abgebildet.

6.1.2.8 LDZ (Logistisches Dienstleistungszentrum) Stadtweide

Bei der Umsetzung des hydrodynamischen Modells für das Teileinzugsgebiet LDZ Stadtweide mussten einige beim Import der ISYBAU-Daten fehlende Netz-Verknüpfungen nachträglich ergänzt werden. Es wurde für das Modell ein freier Auslass im System berücksichtigt. In dem Modell finden sowohl die Regen- als auch die Schmutzwasserableitung Berücksichtigung.

Das Regenentwässerungssystem im Teileinzugsgebiet mündet an der Stadtweide in einen Pumpensumpf mit angeschlossenem Regenklärbecken. Die Situation wurde modelltechnisch analog zur Station Vorwerk abgebildet.

6.1.3 Implementierung der Regenbecken

Die Regenüberlauf- und Regenrückhaltebecken werden über Speicherschächte in HYSTEM-EXTRAN abgebildet. Hierbei wird dem Schacht für eine bestimmte Höhe m NN eine entsprechende Oberfläche zugewiesen, so dass im Endeffekt das Volumen berechnet wird, wie es in der Realität den jeweiligen Wasserständen entspricht. Anhand von Beckenprofilen und den aufgemessenen Werten konnte so die Modellierung erfolgen.

6.1.4 Regendaten

Für die hydrodynamische Simulation wurden Niederschlagsdaten benötigt, damit über die Berechnung der Abflusskonzentration und über die Abflussbildung eine den allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechende Belastung der Haltungen abgebildet werden konnte. Hieraus folgten entsprechend die zu erwartenden Eigenschaften des Systems, die für die Prozesssteuerung relevant sind.

Die vom Niersverband zur Verfügung gestellten Niederschlagszeitreihen der Station Goch und die Reihe der 1992 aufgestellten Station Emmerich von der Bezirksregierung Düsseldorf liegen im langjährigen Mittel bei 729 mm bzw. 720 mm. Dies entspricht den langjährigen Werten 30-jähriger Beobachtungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) im Raum Emmerich. Die Zeitreihen können somit in diesem Bereich für Bemessungen, z. B. von Regenüberlaufbecken, herangezogen werden.

Die Starkregenberechnung nach ATV-A 121 der Zeitreihe Goch Kläranlage liegt sowohl in der jährlichen Reihe, als auch in der partiellen Reihe unter den Ergebnissen der vom DWD herausgegebenen Werte der KOSTRA-Auswertungen, die bei 8,75 mm in 15 min und einer Jährlichkeit von $n=1$ liegen. Die Werte der Zeitreihe Goch betragen bei gleichen Bedingungen 7,9 mm jährlich und 8,2 mm partiell. Bei einer zulässigen Abminderung von 10 % liegen die Auswertungen der Zeitreihe Goch noch im Toleranzbereich der KOSTRA-Auswertungen.

Die Daten können somit zur Dimensionierung von Kanalnetzen mit einem Hydrodynamischen Verfahren eingesetzt werden, wobei die partielle Reihe vorgezogen werden sollte.

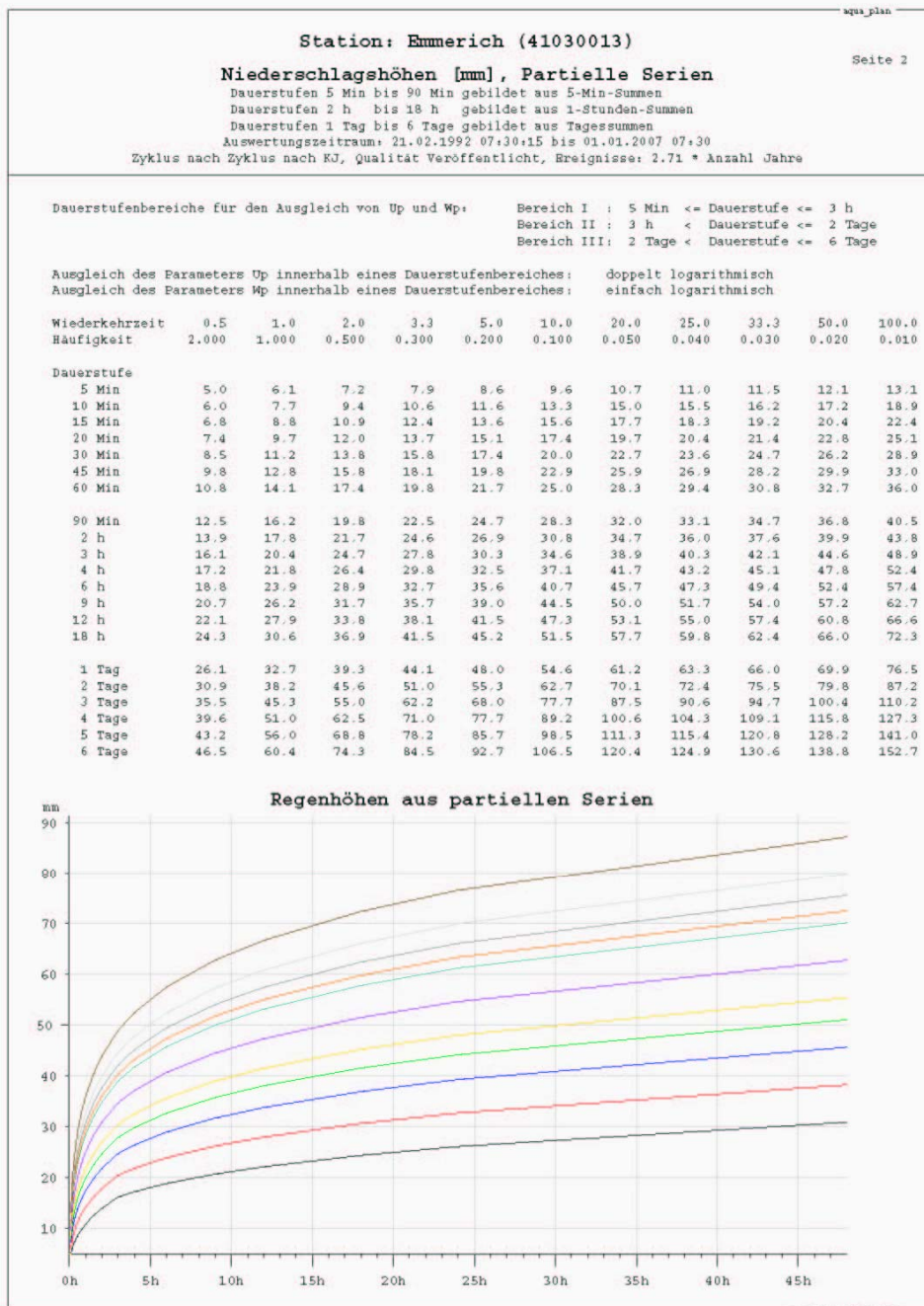


Abbildung 17: Niederschlagshöhen der Station Emmerich, partielle Serie

Die Zeitreihe Emmerich der Bezirksregierung Düsseldorf (ehemals StUA Krefeld), die der Niersverband für das Vorhaben ebenfalls untersucht hat, weist noch keine 30-jährige Datenaufzeichnung auf, ist aber mit einer 15-jährigen Datenaufzeichnung durchaus repräsentativ. Die Daten der Starkregenauswertung liegen sowohl bei der partiellen Serie, als auch in der jährlichen Serie im Bereich der KOSTRA-Auswertungen und wurden daher in die Bemessung des Projektes mit einbezogen. Laut Verworn (1999) sollte eine Zeitreihe mindestens das 3-fache der benötigten Wiederkehrzeit umfassen, also in Emmerich bei einer Wiederkehrzeit von einem Mal in fünf Jahren dementsprechend 15 Jahre.

Die klimatischen Verhältnisse um die Messstation Goch KA entsprechen etwa denen in Emmerich. Am besten geeignet ist die vor Ort liegende Zeitreihe Emmerich. Wenn man die beiden Zeitreihen Goch KA und Emmerich im gleichen Zeitraum betrachtet, also von 01.01.1992 bis 31.12.2006, ergeben sich etwa gleiche Ergebnisse. Die Daten der Zeitreihe Goch Kläranlage wurden vor diesem Zeitpunkt mit Wochenschreiber und geringem Vorschub aufgezeichnet, so dass die Starkregen nur ungenau wiedergegeben werden konnten. Das musste bei der Betrachtung mit berücksichtigt werden.

Es wurde berücksichtigt, dass beim Anwenden der Zeitreihe als Bemessungsgrundlage im Zweifelsfall Rücksprache mit den zuständigen Behörden (Bezirksregierung, LANUV) und unter Umständen mit dem DWD oder dem Betreiber gehalten werden muss, und dass eine Haftung für die Richtigkeit der mitgeteilten Informationen seitens des Niersverbandes nicht in Betracht kommt.

Die rein historischen und in ihrer natürlichen Ausprägung vorliegenden Niederschlagsdaten wurden vor der Langzeitseriensimulation mit Hilfe des Programms "LZ" vom ITWH statistisch ausgewertet und den für den Nachweis relevanten Dauerstufen und Wiederkehrzeiten zugeordnet. Erst danach konnte eine zielgerichtete Betrachtung der Ergebnisse durchgeführt werden.

6.1.5 Kalibrierung der Teilnetze

6.1.5.1 Vorgehensweise

Die Ergebnisse der Berechnungen mit dem oben beschriebenen hydrodynamischen Niederschlag-Abfluss-Modell sind auf ihre Übereinstimmung mit der Realität zu prüfen. Abweichungen von der Realität können durch eine Kalibrierung des Modells verringert werden. Die Kalibrierung stellt die systematische Variation der Modellparameter dar, bis eine ausreichende Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Werten erzielt wird. Hierbei werden die Parameter entsprechend ihrer Bedeutung nacheinander variiert. Zudem sind

Messwerte mehrerer Niederschlags-Abfluss-Ereignisse notwendig, anhand derer die Kalibrierung vorgenommen werden kann. Hieraus wird dann der im Mittel beste Parametersatz ermittelt.

Fehler in der Oberflächenabflussberechnung wirken sich am stärksten aus und pflanzen sich überproportional fort, weshalb die Kalibrierung immer bei den Parametern der Abflussbildung ansetzt.

Für die Aufstellung des aktuellen Generalentwässerungsplans wurden aus Luftaufnahmen der Einzugsgebiete die versiegelten Flächen der beiden großen Mischwassersysteme ermittelt. Es wurde unterschieden in Straßenflächen, Gebäudeflächen und private "saubere" Flächen (z. B. Terrassen) und "schmutzige" Flächen (z. B. Stellplätze). Die Daten wurden haltungsbezogen erhoben und können als zuverlässig bewertet werden. Der Anteil der an das Kanalnetz angeschlossenen, abflusswirksamen Flächen lässt sich aus der Flächenermittlung aber nicht eindeutig ableiten. Er wird im Rahmen der Kalibrierung optimiert.

Grundlage der Kalibrierung bilden zeitgleiche Messreihen der Niederschläge und Abflüsse im Kanalnetz, mit denen die Realität im Vergleich mit dem Modell beschrieben wird. Die Messreihen liefern die in Kap.5.4.1 beschriebenen Messgeräte, die in der folgenden Tabelle noch einmal zusammengefasst sind.

Tabelle 3 Messstellen im Einzugsgebiet Emmerich am Rhein

Ortsteil	Niederschlagsmessungen	Abflussmessungen
Ortsteil Elten	Pumpwerk	Pumpwerk Lindenallee Zisternenweg
Ortsteil Hüthum	Ingenkampstraße	
Stadtbereich Emmerich	Kläranlage Dechant-Sprünken-Straße	Kläranlage (Zuflussmessung) Bremerweg Grollscher Weg
Industriegebiete		Regenwasserbehandlung Vorwerk

Weil die Abstände der Niederschlagsmessungen trotz der beiden zusätzlichen Stationen noch relativ groß sind, enthalten die aufgezeichneten Daten von Mai 2008 bis Oktober 2009 nur wenige Regenereignisse, bei denen von einer einheitlichen Überregnung der Einzugsgebiete auszugehen ist. Dies stellt eine wesentliche Voraussetzung für den Vergleich von gemessenen Abflusswerten mit denen aus der Simulation dar. Trotzdem konnten für die beiden Mischwassersysteme wesentliche Erkenntnisse gewonnen werden.

Die Datenerfassung und Auswertung erfolgte nach den Vorgaben von Merkblatt ATV-DVWK-M 165 "Anforderungen an Niederschlag-Abfluss-Berechnungen in der Siedlungs-entwässerung". Des Weiteren wurden u. a. die Veröffentlichungen von Schmitt und Illgen, 2001, Sitzmann, 2001, sowie Schmitt et al., 2008, ausgewertet.

6.1.5.2 Elten

Die Kalibrierung des Simulationsmodells für das Mischwasserkanalnetz des Ortsteils Elten wurde im Rahmen einer Diplomarbeit durchgeführt (Kather, 2009). Vorgehensweise und Ergebnisse sind nachfolgend zusammengefasst.

Es wurden Simulationen für zwei Teileinzugsgebiete und das gesamte Einzugsgebiet berechnet. Da die Gesamtbetrachtung geringere Abweichungen zeigt, wird nur auf sie Bezug genommen.

Im Zuge der Simulation zeigte sich, dass ein mittlerer Anschlussgrad von 64,5 % der befestigten Flächen zu plausiblen Ergebnissen führt. Die Größe des Anschlussgrades wird von der Veranlagung der Stadt für die flächenbezogene Regenwassergebühr bestätigt. Der Abflussbeiwert ergibt sich damit zu 0,79. In Tabelle 4 sind die zugehörigen Anschlussgrade der unterschiedlichen Teilflächen zusammengestellt.

Tabelle 4: Anschlussgrade und Abflussbeiwerte der versiegelten Flächen

Typ	Fläche _{versiegelt}	Anteil	Anschlussgrad α	Fläche _{angeschlossen}	Ψ_m DWA	$\alpha * \Psi_m$
Verkehrsflächen	16,1 ha	30,4%	95,0%	15,3 ha	0,80	0,76
Gebäude	24,2 ha	45,6%	66,0%	16,0 ha	0,80	0,53
privat sauber	9,3 ha	17,6%	20,0%	1,8 ha	0,60	0,12
privat schmutzig	3,2 ha	6,1%	30,0%	1,0 ha	0,75	0,23
Sonstige	0,2 ha	0,3%	60,0%	0,1 ha	0,60	0,36
Gesamt	53,0 ha	100,0%	64,5%	34,2 ha	0,79	0,51

Tabelle 5 zeigt die Ermittlung des Korrekturfaktors für das Simulationsmodell anhand einiger relevanter Niederschlag-Abfluss-Ereignisse. Es wird das Direktabflussvolumen (das um den Trockenwetterabfluss reduzierte gemessene Abflussvolumen) mit dem in der Simulation ermittelten rechnerischen Niederschlagsvolumen, das zum Abfluss kommt, verglichen. Der Korrekturfaktor "x" errechnet sich dann aus dem Verhältnis V_R/V_N .

Tabelle 5: Ereignisbezogene Volumenbilanzierung

	Einheit	Sim 10	Sim 11	Sim 12	Sim 14	Sim 19	Sim 22
Datum	---	17.05.08	31.05.08	02.07.08	17.05.09	24.07.09	10.10.09
Niederschlagsdauer	h : min	6 : 08	2 : 50	4 : 42	3 : 13	1 : 16	5 : 30
gemessenes Abflussvolumen V_{ges}	m ³	1.219	1.250	1.666	1.120	1.229	2.209
Trockenwetterabflussvolumen V_{TW}	m ³	312	117	169	253	83	171
Direktabflussvolumen V_R	m ³	907	1.133	1.497	867	1.146	2.038
gemessene Niederschlagshöhe h_N	mm	7,68	9,44	10,80	5,71	6,93	11,13
effektive Niederschlagshöhe h_{eff}	mm	5,14	6,90	8,26	3,17	4,39	8,59
rechnerisches Niederschlagsvolumen V_N	m ³	1.757	2.359	2.824	1.083	1.501	2.937
Korrekturfaktor x	---	0,52	0,48	0,53	0,80	0,76	0,69
Rechenwert für Parameter $A_e = x * \alpha$	---	0,33	0,31	0,34	0,52	0,49	0,45

Der Endabflussbeiwert A_e , ein normierter Parameter, stellt in HYSTEM den abflusswirksam werdenden Flächenanteil am Ende der Muldenauffüllung dar. Die Korrekturfaktoren x sind Entsprechungen zum mittleren Abflussbeiwert ψ_m als Berechnungsergebnis aus Abflussmodellierungen gemäß ATV-DVWK-A 198 (2003). Im Rahmen dieser Kalibrierung liegen die Korrekturfaktoren zwischen 0,48 und 0,80. Der gewichtete, mittlere Abflussbeiwert gemäß ATV-DVWK-A 198 wurde zu $\psi_m = 0,79$ ermittelt. Er beruht auf Erfahrungswerten und kann ereignisunabhängig für einen Plausibilitätsvergleich genutzt werden.

Von den betrachteten Niederschlag-Abfluss-Ereignissen zeigen nur Sim14 mit $x = 0,80$ und Sim19 mit $x = 0,76$ Werte in vergleichbarer Größenordnung. Bei den weiteren ausgewerteten Niederschlag-Abfluss-Ereignissen (Sim10, 11,12 und 22) ist für ganz Elten von einer geringeren Überregnung als der am Pumpwerk gemessenen auszugehen, da die ereignisbezogenen Korrekturwerte deutlich unter dem ereignisunabhängigen Abflussbeiwert liegen.

Entsprechend der vorangegangenen Betrachtung fällt bei Sim14 der Vergleich von Direktabflussvolumen und den in HYSTEM-EXTRAN errechneten Abflussmengen bei der Simulation mit $A_e = \psi_m * \alpha = 0,52$ sehr gut aus. Wie in Tabelle 6 dargestellt, ergibt sich für Sim14 eine Volumenabweichung von 2 % zwischen dem Simulationsvolumen und dem Direktabflussvolumen. Ein ähnlich gutes Ergebnis zeigt Sim19 mit einer Volumenabweichung von 4 %. Nach ATV-DVWK (2004) sind Volumenabweichungen unter 10 % akzeptabel, d. h. eine weitere Kalibrierung der Modellparameter ist nicht zwingend. Die übrigen Ereignisse sind mit Abweichungen von 14 - 57 % zur weiteren Verwendung in der Kalibrierung ungeeignet.

Tabelle 6: Volumenabweichungen

Abweichungen des mit $A_e = \psi_m * \alpha = 0,51$ simulierten Volumen zu $V_R = 100$ %	Sim 10	Sim 11	Sim 12	Sim 14	Sim 19	Sim 22
	49 %	57 %	50 %	2 %	4 %	14 %

Das Ergebnis der Kalibrierung ist für die Erfordernisse des Projektes in der vorliegenden Form ausreichend. Von Bedeutung ist:

- Die Betrachtung des gesamten Einzugsgebietes führt zu geringeren Abweichungen bei der Simulation als die bei den Teileinzugsgebieten.
- Die angeschlossenen versiegelten Flächen sind deutlich kleiner als die Auswertung der Luftbilder erwarten ließ.

Die große Abhängigkeit der Ergebnisse von den angeschlossenen Einzugsgebietsflächen lässt es geraten erscheinen, einen haltungsbezogenen Abgleich der angeschlossenen Flächen mit den Daten der Regenwassergebühr zu führen, um die Basis für eine differenziertere Betrachtung zu schaffen.

6.1.5.3 Emmerich Stadt- und Außengebiete

Die Vorgehensweise für das Stadtgebiet entspricht der oben dargestellten für den Ortsteil Elten. Nachfolgend werden daher nur noch die Ergebnisse der Berechnungen erläutert.

Das Mischsystem, das die Innenstadt und die Außengebiete von Emmerich entwässert, endet in dem Pumpwerk und RÜB an der Rheinpromenade. Da das Abwasser in das RÜB gehoben werden muss, hat das Kanalnetz keinen freien Abfluss und staut bei Regenwetter ein. Eine Abflussmengenmessung am Ende des Kanalsystems beschreibt daher nur die Förderleistung der Pumpen, lässt aber keine Abflusswelle mehr erkennen. Aus diesem Grund wurden für die Kalibrierung zwei Messstellen (Bremerweg und Grollscher Weg) in Hauptsammlern gewählt, an denen die Bildung der Abflusswellen beobachtet werden konnte und die charakteristisch für das gesamte Netz sind. Da sich die Ergebnisse nicht wesentlich unterscheiden, wird mit den Simulationsergebnissen des Bremerwegs das Stadtgebiet charakterisiert.

Teilbereiche mit generellem Trennsystem sind aus dieser Bilanzierung ausgeklammert. Tabelle 7 zeigt das Ergebnis.

Tabelle 7: Anschlussgrade und Abflussbeiwerte der versiegelten Flächen

Typ	Fläche _{versiegelt}	Anteil	Anschlussgrad α	Fläche _{angeschlossen}	$\Psi_{m \text{ DWA}}$	$\alpha * \Psi_m$
Verkehrsflächen	23,0 ha	30,3%	95,0%	21,8 ha	0,80	0,76
Gebäude	33,2 ha	43,8%	85,0%	28,2 ha	0,80	0,68
privat sauber	12,2 ha	16,0%	50,0%	6,1 ha	0,60	0,30
privat schmutzig	5,5 ha	7,3%	50,0%	2,8 ha	0,75	0,38
Sonstige	1,9 ha	2,5%	80,0%	1,5 ha	0,70	0,56
Gesamt	75,8 ha	100,0%	79,7%	60,4 ha	0,78	0,62

Der Anschlussgrad der Flächen ist im dichter bebauten Stadtbereich wesentlich höher als in Elten, weil hier deutlich geringere Möglichkeiten zur Versickerung bestehen als in den äußeren Bereichen mit höherem Anteil an unbebauten Flächen.

Da nur eine eng begrenzte Zahl gleichmäßiger Überregnungen zur Verfügung stand, wurde das N-A-Ereignis vom 10.07.08 mit der Niederschlagsmessung der KA Emmerich (Sim. 1.1) und der Messung in Elten (Sim. 1.2) simuliert. Die Ergebnisse der geeigneten Simulationen zeigt Tabelle 8.

Tabelle 8: Ereignisbezogene Volumenbilanzierung

	Einheit	Sim 1.1	Sim 1.2	Sim 2	Sim 3	Sim 5	Sim 6
Datum	---	10.07.08	10.07.08	26.07.08	09.02.09	17.05.08	17.05.09
Niederschlagsdauer	h : min	6 : 30	5:56	1:15	7:59	6:09	4:47
gemessenes Abflussvolumen V_{ges}	m ³	5.411	5.411	7.405	4.906	3.362	2.524
Trockenwetterabflussvolumen V_{TW}	m ³	506	506	552	1.372	1.224	840
Direktabflussvolumen V_R	m ³	4.905	4.905	6.853	3.534	2.138	1.684
gemessene Niederschlagshöhe h_N	mm	14,21	12,73	16,70	9,73	7,68	5,97
effektive Niederschlagshöhe h_{eff}	mm	11,78	10,30	14,27	7,30	5,25	3,54
rechnerisches Niederschlagsvolumen V_N	m ³	7.120	6.226	8.625	4.413	3.174	2.140
Korrekturfaktor χ	---	0,69	0,79	0,79	0,80	0,67	0,79
Rechenwert für Parameter $A_e = \chi * \alpha$	---	0,55	0,63	0,63	0,64	0,54	0,63

Die Korrekturfaktoren zwischen 0,69 und 0,80 weisen eine geringe Streuung auf, vier Werte liegen zwischen 0,79 und 0,80 dicht beieinander. Als maßgeblicher Endabflussbeiwert wurde der Faktor 0,62 bestimmt, der letztendlich den repräsentativen Regenereignissen bezüglich Gesamtvolumen und Ausprägung der Abflussganglinie sehr nahe kommt. Bei der Simulation mit diesem Faktor liegen drei Ergebnisse unter 10 % Volumenabweichung (s. Tabelle 9).

Tabelle 9: Volumenabweichungen

Abweichungen des mit $A_e = \psi_m * \alpha = 0,62$ simulierten Volumen zu $V_R = 100$ %	Sim 1.1	Sim 1.2	Sim 2	Sim 3	Sim 5	Sim 6
	12,7%	-0,5%	12,5%	-1,0%	18,2%	9,5%

Das Ergebnis bestätigt die Werte aus Elten. Der Anschlussgrad ist mit 79,7 % aber deutlich größer als in Elten mit 64,5 %. Die Größenordnung wird auch hier durch die Flächen aus der Erhebung der Regenwassergebühr bestätigt.

Die mit der Kalibrierung gewonnenen Erkenntnisse sind als Basis für eine Aktualisierung des Generalentwässerungsplanes noch nicht ausreichend. Da die Messungen fortgesetzt werden,

wird in absehbarer Zeit mit weiteren Niederschlag-Abfluss-Beobachtungen eine ausreichend große Datenbasis zur Verfügung stehen.

Für die Steuerung des Kanalnetzes sind die Aussagen zur Größe der zu erwartenden Abflüsse aufgrund gemessener Niederschlagsereignisse aber ausreichend sicher belegt.

6.1.5.4 Übertragung der Kalibrierung auf die Industriegebiete

Bei den Industriegebieten stellt sich die Situation etwas anders dar. Für die Mischsysteme der Siedlungsgebiete kann von unter Berücksichtigung einer geringen Zuwachsrates bzw. Reduzierung durch Abkoppelung von konstanten angeschlossenen Flächen ausgegangen werden.

In den Industriegebieten besteht ein größeres Veränderungspotential. Betriebserweiterungen können kurzfristig zu einer Ausnutzung der zulässigen Versiegelung führen und die Abflussverhältnisse verändern. Perspektivisch sollte daher für die Kanaldimensionierung von der gemäß Bebauungsplan versiegelbaren Fläche ausgegangen werden.

Die Abflusssteuerung muss ebenfalls eine entsprechende Flexibilität berücksichtigen.

6.2 Modell in MATLAB/Simba

6.2.1 Anwendung der Simba-Software

Da eine detailgetreue Abbildung der Sonderbauwerke und Regenbecken in der Software HYSTEM-EXTRAN nur bedingt möglich ist, dies aber zur Entwicklung und Optimierung der Steuerungsstrategie zwingend notwendig ist, erfolgte eine Abbildung des Emmericher Kanalnetzes (inkl. der Sonderbauwerke) mit Hilfe der Softwarekombination MATLAB/Simba.

Bei der Software MATLAB handelt es sich um eine technische Programmierumgebung, mit Hilfe derer technische Gegebenheiten abgebildet werden. Die Software Simba (**S**imulation **b**iologischer **Ab**wasseranlagen) stellt dabei eine vorgefertigte Toolbox für die MATLAB-Entwicklungsumgebung dar. Mit Hilfe von Simba können abwassertechnische Anlagen, also Kläranlage, Kanalnetz und Sonderbauwerke, detailgetreu nachgebildet werden, wobei die Abbildung der Kläranlage kein Bestandteil des Forschungsprojekts war.

Die im Rahmen des Projekts genutzten Simba-Versionen (Versionen 5 und 6) bieten dabei die Möglichkeit, das Kanalnetz mit Hilfe vom SWMM (**S**torm **W**ater **M**anagement) hydrodynamisch, also inklusiver aller Haltungen und Schächte, zu berechnen. Der Vorteil gegenüber HYSTEM-EXTRAN besteht dabei in folgenden Punkten:

- Abbildung der Sonderbauwerke mit Hilfe von vorgefertigten Modulen;
- Abbildung von Steuerungsstrategien durch Kombination anderer MATLAB-Toolboxen (z. B. Fuzzy-Logic-Toolbox);
- offene Schnittstellen, um beispielsweise mit anderen Programmen kommunizieren zu können;
- Datenimport verschiedenartiger Messdaten und Kanalnetzdaten möglich;
- Abbildung von Frachtparametern, Abbau- und Sedimentationsvorgängen im Kanalnetz (kein Bestandteil des Forschungsprojekts);
- weitestgehend offene Entwicklungsumgebung, d. h. Module können für spezielle Problemstellungen angepasst oder komplett neu entwickelt werden.

Allerdings ergeben sich durch diese Programmstruktur auch diverse Nachteile:

- sehr rechenaufwendig, daher nur begrenzte Möglichkeiten bei der Simulation von beispielsweise mehrjährigen Niederschlagsreihen;
- nur Grundkonfigurationen vorhanden, daher ist das Erstellen des Modells sehr zeitaufwendig.

Bei der Erstellung des Kanalnetzmodells in Simba wurde auf den Daten und Erkenntnissen des HYSTEM-EXTRAN-Modells aufgebaut. Die im ISYBAU-96-Format vorliegenden Kanalnetzdaten konnten übernommen und dementsprechend das Kanalnetz abgebildet werden.

Entsprechend der vorliegenden Bestandspläne und in Abstimmung mit dem Kanalnetzbetrieb wurden im Anschluss die Regenbecken in das Modell integriert.

6.2.2 Kalibrierung und Vereinfachung des hydrodynamischen Simba-Modells

Nach der Abbildung des Emmericher Kanalnetzes, basierend auf den Bestandsdaten und ISYBAU-96-Daten, wurde das Modell entsprechend der vorherrschenden Bedingungen kalibriert.

Da es in Simba nur bedingt möglich ist Zeitreihen zu simulieren, wurden im ersten Schritt Einzelniederschlagsereignisse ausgewählt, die eine maximale Wiederkehrhäufigkeit von kleiner zwei Jahren aufweisen. Als Datengrundlage dienten dabei die im Einzugsgebiet installierten PLUVIO-Geräte. Durch Export dieser aufgezeichneten Daten nach Simba konnten die Niederschlagsereignisse mit einer hohen zeitlichen Auflösung simuliert werden.

Die sich im Simulationsmodell einstellenden Abflusskurven wurden anschließend mit den gemessenen Ablaufkurven der im Einzugsgebiet installierten Durchflussmessgeräte verglichen. Basierend auf den Ergebnissen wurden die Einzugsgebietsparameter im Simulationsmodell angepasst und die neuen Einstellungen durch Simulation anderer Niederschlagsereignisse validiert. Durch diese mehrmalige Optimierung der Gebietsparameter konnte das Niederschlags-Abfluss-Verhalten für die Teileinzugsgebiete sehr gut abgebildet werden (siehe Abbildung).

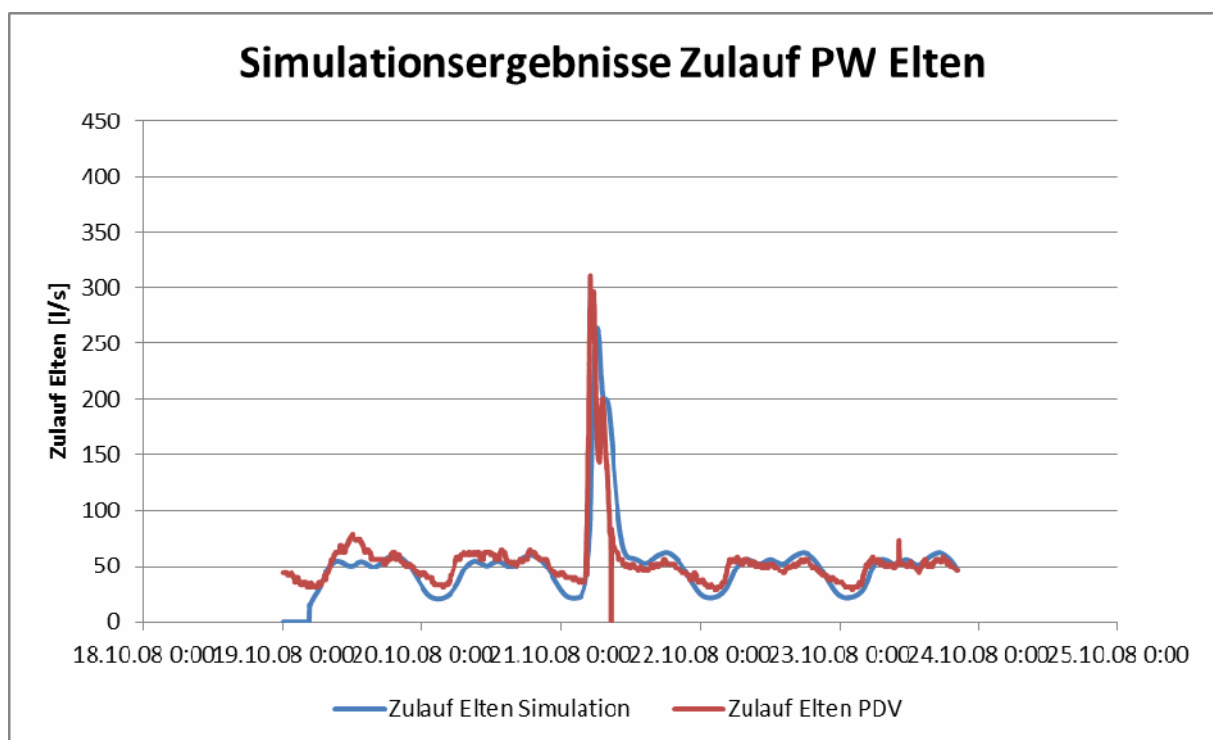


Abbildung 18: Simulationsergebnisse am Beispiel des Pumpwerks Elten

Obwohl das Verhalten innerhalb der Einzugsgebiete sehr gut nachgebildet werden konnte, erwies sich die Detailkalibrierung der Regenbecken inklusive der Pumpwerke als problematisch. Dies hatte zwei grundlegende Ursachen.

Zum einen verfügt nicht jedes Regenbecken/Pumpwerk über eine Zulaufmessung, was eine Kalibrierung anhand von Messdaten nicht möglich machte. Da diese Werte aber von enormer Wichtigkeit sind, insbesondere für den späteren Steuerungsalgorithmus, wurden die Zuläufe der entsprechenden Becken aus anderen Messwerten berechnet. Mit Hilfe der Bestandspläne wurden für alle Becken Stützkurven erstellt. Über diesen Stützkurven konnte nun anhand der Änderung des Füllstands sowie der Ablaufmessung der Pumpwerke der Zulauf der Regenbecken berechnet werden. Diese Methode erwies sich als sehr effektiv und zuverlässig, so dass

diese Berechnungen auch Bestandteil des Kanalnetzsteuerungssystems für die entsprechenden Becken sind. Für folgende Becken erfolgt eine Berechnung des Zulaufs:

- Station RRB Hafenstraße (RRB 1),
- Station RRB Werftstraße (RRB 2),
- Station RRB Duisburger Straße.

Als weiteres Problem stellte sich die Struktur des Emmericher Kanalnetzes dar. Die größtenteils im Freispiegelgefälle entwässernden Teileinzugsgebiete fließen alle direkt in Pumpwerke, die direkt Richtung Kläranlage fördern. Dieser Wechsel zwischen Freispiegelabfluss und Pumpenförderung stellt einen Bruch im Abflussverhalten dar.

Eine Abbildung des Kläranlagenzulaufs im Simulationsmodell, welcher nur aus Druckrohrleitungen besteht, war daher ohne Einbindung der Pumpwerke im Modell nicht möglich.

Aus Gründen der Vereinfachung wurden im ursprünglichen Ansatz die Pumpwerke als einfache Speicherbecken mit einer vom Höhenstand abhängigen Entleerung abgebildet, die wiederum entsprechend der maximalen Förderleistung der installierten Pumpen agierten. Allerdings stellte sich dieser Ansatz als nicht optimal heraus, da die Differenzen zwischen Simulationsmodell und Messwerten, besonders im Bereich des Kläranlagenzulaufs, zu groß waren. Da aber gerade der Kläranlagenzulauf eine maßgebende Größe für die Entwicklung des Kanalnetzsteuerungssystems war (Zielstellung "Optimierung des Kläranlagenzulaufs"), wurden zwei Möglichkeiten ermittelt dieses Problem zu lösen bzw. zu umgehen:

1. detailgetreue Implementierung der Pumpen (inkl. der Pumpenkennlinien),
2. weitergehende Vereinfachung des Simulationsmodells - Änderung in ein hydraulisches Modell.

Prinzipiell ist es möglich, innerhalb von Simba Pumpwerke inklusive Pumpenkennlinien abzubilden. Allerdings stellte sich bei der Analyse heraus, dass nicht für alle relevanten Pumpen die entsprechenden Pumpenkennlinien vorlagen und auch Recherchen beim Hersteller nicht zum Erfolg führten. Daher wurde die zweite Variante bevorzugt und umgesetzt.

Der erste Schritt der Vereinfachung war die Reduzierung des aktuellen Modells um den hydrodynamischen Anteil, also der Schächte und Haltungen. Aufgrund der Tatsache, dass nur Niederschlagsereignisse untersucht wurden, die eine Wiederkehrhäufigkeit kleiner zwei Jahre haben, konnte sichergestellt werden, dass der Bemessungsabfluss des Kanalnetzes (Wiederkehrhäufigkeit von fünf Jahren) deutlich unterschritten ist und somit keine Überstauereignisse auftreten. Dieser Sachverhalt konnte im HYSTEM-EXTRAN-Modell bestätigt werden.

Die ursprünglich durch den hydrodynamischen Teil ermittelten Zulaufmengen wurden im vereinfachten Modell durch Messwerte der Durchflussgeräte bzw. durch die anhand der Stützkurven berechneten Daten ersetzt. Da alle Pumpwerke der relevanten Außenstationen über Abflussmessungen verfügen und diese als Messdaten vorlagen, wurden die aufgezeichneten Förderleistungen der Pumpwerke vereinfacht, in Form einer Datenbank, in das hydraulische Modell integriert. Die Darstellung der Regenbecken im Modell konnte beibehalten werden. Mit diesem vereinfachten Ansatz war es nun möglich, obwohl ohne hydrodynamischen Anteil des eigentlichen Kanalnetzes, das hochdynamische Verhalten des Kläranlagenzulaufs detailgetreu abzubilden. Ebenfalls war es nun möglich, die sich in den Becken einstellenden Füllstände entsprechend des Ist-Zustands (Vergleich mit gemessenen Höhenständen) darzustellen. Durch dieses vereinfachte Modell war es nun also möglich, den Ist-Zustand des Kanalnetzes Emmerich für die relevanten Niederschlagsereignisse ohne Qualitätsverlust der Simulationsergebnisse darzustellen und diese wiederum als Referenz für die spätere Entwicklung des Kanalnetzsteuerungssystems zu nutzen.

Durch die Vereinfachung des Modells ergab sich ein weiterer Vorteil: Der eigentliche Steuerungsalgorithmus war ohne größeren Aufwand in das Modell implementierbar. Die in Form einer Datenbank vorliegenden Förderleistungen der Pumpwerke des Ist-Zustands wurden durch die vom Kanalnetzsteuerungssystem berechneten Fördergrößen ersetzt. Im Anschluss daran konnte das Prozesssteuerungssystem im hydraulischen Modell getestet und sukzessive optimiert werden, wobei ein ständiger Abgleich der simulierten Niederschlagsereignisse mit dem Ist-Zustand erfolgte.

7 Erarbeitung des Prozesssteuerungssystems

Während der Voruntersuchung stellte sich heraus, dass durch die hydraulische Optimierung des Kläranlagenzulaufs ein Großteil der erhofften Verbesserungen des Betriebsverhaltens der Kläranlage erreicht werden. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde sich dafür entschieden, entgegen des Projektantrags, die Frachtkomponente aus dem PSS auszugliedern und einen separaten Frachtregler zu entwickeln. Für den hydraulischen Anteil des PSS wurde ein Softwareagentensystem, welches für zukünftige Anwendungen um die Frachtkomponente erweitert werden kann, entwickelt, der Frachtregler basiert auf einer sogenannten Zustandsmaschine. In den folgenden Kapitel werden beide Ansätze, hinsichtlich der Entwicklung und Umsetzung erläutert.

7.1 Einleitung regelungstechnische Regelungsansätze

Der Einsatz innovativer Steuer- und Regelungstechnik kann einen großen Beitrag für die effiziente Weiterentwicklung bestehender Abwasserwasseranlagen eröffnen. Intelligenten Regelungs- und Optimierungsmethoden (die auch unter dem Begriff der Computational Intelligence zusammengefasst werden), wie zum Beispiel Fuzzy Logic, Zustandsmaschinen, Genetische Algorithmen und Softwareagenten, kommt hierbei eine hohe Bedeutung zu. Diese Verfahren sind besonders auf die Lösung komplexer und nicht-linearer Prozesse zugeschnitten, die nicht mit herkömmlichen Ansätzen erfolgreich gelöst werden können. Bei Kanalnetzen und den darin enthaltenen Regenbecken handelt sich um genau solch komplexe, nicht-lineare Systeme.

Optimierungsansätze ergeben sich vor allem für den Fall von kleineren bis mittleren Niederschlagsereignissen, wenn Regenüberlaufbecken gefüllt werden. Lässt der Regen nicht nach bis die Becken gefüllt sind, kann es zu Entlastungsereignissen kommen, bei denen ungeklärtes Abwasser in die Vorfluter abgeschlagen wird. Dies ist insbesondere umweltbelastend, wenn vor dem Regenereignis eine längere Trockenperiode gelegen hat und es insbesondere während der Anfangsphase eines Regenereignisses zu einem Frachtstoß kommt.

Derzeit werden Kanalnetze hauptsächlich **statisch** betrieben. Das bedeutet, dass das Regenüberlaufbecken (RÜB) in der Regel einen festgelegten maximalen Drosselabfluss aufweist. Bei größeren Entwässerungsnetzen kann es daher vorkommen, dass einige RÜB bereits entlasten während andere noch nicht gefüllt sind, die vorhandene hydraulische Kapazität im Gesamtsystem entsprechend schlecht ausgenutzt wird. Die Steuerung eines Entwässerungsnetzes verfolgt daher das Ziel, die hydraulischen Kapazitäten möglichst optimal zu nutzen, indem der Abwasserabfluss bedarfsweise auf mehrere Regenbecken verteilt und zwischengespeichert wird. Damit können insbesondere der ersten Frachtstoß bei Regenereignissen zurückgehalten und andererseits Stoßbelastungen der Kläranlage verringert werden.

Voraussetzung für die Implementierung eines Prozesssteuerungssystems für das Entwässerungsnetz ist die Identifikation von relevanten Netzstrukturen und Sonderbauwerken wie Regenbecken und Pumpstationen, die für eine Bewirtschaftung geeignet sind, sowie die Auswahl eines passenden Steuerungsansatzes. Dies wird für das Emmericher Abwassersystem in den folgenden Kapiteln dargestellt.

7.2 Auswahl relevanter Komponenten im Entwässerungsnetz

7.2.1 Auswahl der Entwässerungskomponenten

Das Entwässerungssystem von Emmerich am Rhein stellt ein komplexes System dar, das aus mehreren voneinander unabhängigen Teileinzugsgebieten besteht (siehe Kapitel 4.1). Die Entwässerung erfolgt im Misch- oder Trennsystem, und jedes dieser Gebiete verfügt über eigene Rückhaltebauwerke für sein Kanalnetz (siehe auch Entwässerungsfließbild in Anlage 2).

Für die Einführung des neuen Prozesssteuerungssystems erfolgte zunächst eine Bestandsaufnahme, bei der die Kanalnetze erfasst und die Abmessungen aller Regenbecken auf Plausibilität überprüft wurden. Eine Nachrechnung der erforderlichen Regenbeckenvolumen ergibt folgendes Bild:

- für das Becken Industriehafen wird, wie in Kapitel 4.5 dargestellt, ein großes nicht genutztes Volumen bestätigt;
- für das Erdbecken Vorwerk wurde auch mit einer deutlichen Reservekapazität gerechnet, die sich aber nicht bestätigte; der Nachweis ergab eine volle Beckenauslastung;
- das Erdbecken in Elten wird seltener als in der Auslegung angesetzt gefüllt;
- für die anderen Becken wurde eine volle Auslastung bestätigt, die sich mit den Betriebserfahrungen deckt.

Aufgrund dieser Ergebnisse sind nur einige Komponenten der Entwässerungsnetze für eine Beeinflussung durch das PSS geeignet (Kriterien siehe Kapitel 5.2). Im Rahmen des Vorhabens wurden neben der Kläranlage die folgenden sieben Regenbecken als wesentliche Komponenten für das Prozesssteuerungssystem festgelegt:

1. Station Elten,
2. Station Rheinpromenade,
3. Station RRB Hafenstraße,
4. Station RRB Werftstraße,

5. Station RRB Industriekontor,
6. Station RRB Duisburger Straße,
7. Station Vorwerk.

Die genannten Becken und ihre Zuordnung untereinander sind in der Abbildung 11 auf S. 39 dargestellt. Die einzelnen Entwässerungskomponenten sind für das Prozesssteuerungssystem in ihrer Funktionsweise teilweise anzupassen, wie nachfolgend beschrieben wird.

7.2.2 Anpassung der hydraulischen Funktionsweise der einzelnen Entwässerungskomponenten

Im Folgenden werden die einzelnen Außenstationen hinsichtlich der Funktionsweise und des Anpassungsbedarfs in Bezug auf das PSS beschrieben. Die Einzelkomponenten der jeweiligen Stationen unterliegen einer SPS-seitigen Überwachung, um jederzeit einen sicheren Betrieb des PSS sicherzustellen. Fällt beispielsweise eine Komponente einer Regelstrecke aus, so wechselt diese Station automatisch in den lokalen Betrieb und steht somit dem PSS nicht mehr zu Steuerung des Abflusses zur Verfügung.

7.2.2.1 Station Elten

Funktionsweise der Regelstrecke im Ausgangszustand:

Über den Zulaufkanal DN 1470 fließt das Abwasser dem Rechen zu. Der Zulaufvolumenstrom wird über eine **Kanalmaus** im Zulaufkanal erfasst. Nach der mechanischen Reinigung durch den Rechen fließt das Abwasser in den Pumpensumpf, wo **zwei Pumpen** das anfallende Abwasser zum Mischwasserpumpwerk fördern. Im Trockenwetterfall fördern die Pumpen abwechselnd in zwei Druckleitungen. In jeder Druckleitung befindet sich eine **Durchflussmessung**, die in Summe die Gesamtfördermenge ergeben. Im bisherigen Betrieb förderten die Pumpen mit einsetzendem Niederschlag mit der maximal möglichen Fördermenge zum MWPW. Erst wenn im Regenwetterfall der Zulauf die maximale Fördermenge deutlich überschreitet, erfolgt ein Einstau des Erdbeckens (Entlastungen erfolgen meist erst im Bereich des Bemessungsregens). Die Entleerung des Erdbeckens Richtung Pumpensumpf kann über einen **Motorschieber** geschlossen werden. Während des Befüllens muss dieser geschlossen sein, um eine Kreislaufförderung zu vermeiden. Durch diese Betriebsweise der Pumpen wurde in der Vergangenheit das vorhandene Speichervolumen des Erdbeckens nicht optimal genutzt.

Geänderte Funktionsweise der Regelstrecke im Prozesssteuerungssystem

Mit Inbetriebnahme des Prozesssteuerungssystems soll zukünftig im Regenwetterfall durch gezieltes Einstauen das Speichervolumen des Erdbeckens effektiver genutzt werden, um somit das MWPW sowie den Kläranlagenzulauf zu entlasten. Zu diesem Zweck wird je nach Zulaufsituation dem Pumpwerk ein gedrosselter Ablaufwert (Soll-Wert) vorgegeben, um somit einen gezielten Einstau im Erdbecken zu erreichen. Grundsätzliche Änderungen in der Betriebsweise dieser Station sind daher nicht notwendig.

Um durch diese Betriebsweise keine Entlastungen hervorzurufen bzw. sicherheitsrelevante Pufferkapazitäten vorzuhalten, werden folgende Punkte durch das Prozesssteuerungssystem überwacht:

- Ausreichend Speicherkapazität im Erdbecken vorhanden,
- gezielter Einstau nur bis Speicherziel,
- Wiederkehrzeit des Niederschlagsereignisses,
- Kommunikation zur Station.

Vorgaben der Regelstrecke/Soll-Werte:

- Förderleistung Pumpwerk Elten.

Bestandteile der Regelstrecke:

- Durchflussmessung Zulaufkanal (FW04 QIR 04.4135),
- Pumpen (3 Stück),
- Durchflussmessgeräte Pumpwerk (FW21 FIR 21.41035 und FW21 FIR 21.41135),
- Höhenstandmessung Erdbecken (FW21_LIRC_21_48_32_NiveauErd),
- Motorschieber Erdbecken (GOS 21.23AA).

7.2.2.2 Station Rheinpromenade

Funktionsweise der Regelstrecke im Ausgangszustand:

Der Zufluss des Mischwasserpumpwerks (MWPW) setzt sich aus drei Einzelzuflüssen zusammen:

- Mischwasser aus Elten,
- Zufluss KLK Oleo (ehemals Uniqema),
- Mischwasser aus dem Stadtgebiet Emmerich.

Die Abwässer aus Elten und von KLK Oleo (ehemals Uniqema) werden i. d. R. vom Pumpwerk direkt Richtung Kläranlage gefördert. Es besteht keine Möglichkeit zur Zwischenspeicherung im Regenüberlaufbecken.

Das Abwasser aus dem Stadtgebiet Emmerich fließt über den sogenannten Kommunalen Sammler DN 2000 dem Pumpwerk zu. In Ausnahmefällen lässt sich der Zulauf aus Elten in den Kommunalen Sammler von Hand umschiebern und könnte dann auch dem RÜB zugeleitet werden. Unmittelbar vor dem Pumpwerk befindet sich im Kommunalen Sammler die eigentliche Regelstrecke, bestehend aus **MID, Motorschieber** und **ASK-Wehr**. Bei Trockenwetter ist der Motorschieber voll geöffnet und das Abwasser aus dem Stadtgebiet Emmerich fließt vollständig dem Pumpwerk zu. Im Regenwetterfall wird der Zulauf des Kommunalen Sammlers zum MWPW durch den Motorschieber auf 230 l/s gedrosselt und das kommunale Mischwasser im Netz eingestaut. Somit ist gewährleistet, dass das Abwasser von KKK Oleo sicher Richtung Kläranlage gefördert wird. Es besteht keine Gefahr eines Überstaus aus dem Pumpensumpf in das Betriebsgebäude. Übersteigt der Zulauf die Menge von 230 l/s über einen längeren Zeitraum, wird der Wasserspiegel im Kommunalen Sammler den Schwellenwert von 13,00 m ü. NN (entspricht Vollfüllung) erreichen und das ASK-Wehr öffnet sich. Das überschüssige Abwasser fließt über eine Leitung DN 2000 in das RÜB, wobei dieser Volumenstrom von einer Kanalmaus mit separater Höhenstandmessung erfasst wird. Im RÜB erfolgt eine Überwachung der eingestauten Wassermenge über eine Höhenstandmessung. Eine direkte Durchflussmessung, die die Entlastungsmengen in den Rhein erfasst, ist aus technischen Gründen nicht vorhanden. Die Abschlagsmenge wird über eine Differenzberechnung zu der über MID gemessenen Ablaufmenge bestimmt. Die Entleerung des RÜB Richtung MWPW wird durch einen **Motorschieber** gesteuert.

Geänderte Funktionsweise der Regelstrecke im Prozesssteuerungssystem:

Um einen gezielten Einstau des RÜB Rheinpromenade zu realisieren, wird der Zufluss aus dem Stadtgebiet Emmerich gezielt eingedrosselt. Dazu wird dem **Kommunalschieber** eine reduzierte Durchflussmenge durch das Prozesssteuerungssystem vorgegeben. Dadurch wird der Wasserspiegel im **Kommunalen Sammler** vorzeitig über den Schwellenwert steigen und somit das ASK-Wehr öffnen. Durch das Prozesssteuerungssystem werden folgende Punkte intern überwacht:

- Speicherkapazitäten im RÜB vorhanden,
- gezielter Einstau nur bis Speicherziel,
- Wiederkehrzeit des Niederschlagsereignisses,
- Kommunikation zur Station.

Vorgaben der Regelstrecke/Soll-Werte:

- Durchfluss Kommunalschieber.

Bestandteile der Regelstrecke:

- MID-Kommunalschieber (FIRC 12.4635),
- Kommunalschieber (GOS 12.27AA),

- ASK-Wehr (GOS 12.29AH),
- Füllstandsmessung RÜB (LIRC 12.4132),
- MID-Entleerung RÜB (FIRC 12.4435),
- Entleerungsschieber RÜB (GOS 12.28AA).

7.2.2.3 Station RRB Hafenstraße (RRB 1)

Funktionsweise der Regelstrecke im Ausgangszustand:

Das Abwasser fließt dem im RRB integrierten Pumpwerk über eine Leitung DN 1000 zu. Übersteigt der Füllstand im Pumpensumpf den Einschaltpunkt, fördern die **Pumpen** mit einer Förderleistung von 20 l/s Richtung Kläranlage (Erfassung über **MID**) solange bis der Füllstand unter den Ausschaltpunkt sinkt. Übersteigt die zulaufende Menge die Förderleistung der Pumpen deutlich und über einen längeren Zeitraum, wird das überschüssige Abwasser im Becken zwischengespeichert. Der Füllstand im Becken wird durch eine **Füllstandsmessung** überwacht.

Geänderte Funktionsweise der Regelstrecke im Prozesssteuerungssystem:

Im Gegensatz zum Ausgangszustand wird auch für diese Station im Regenwetterfall durch das Prozesssteuerungssystem ein gedrosselter Ablaufwert vorgegeben, um einen gezielten Einstau im RRB zu erreichen. Auch hier werden vom Prozesssteuerungssystem verschiedene Punkte überwacht:

- Speicherkapazitäten im RÜB vorhanden,
- gezielter Einstau nur bis Speicherziel,
- Wiederkehrzeit des Niederschlagsereignisses,
- Kommunikation zur Station.

Vorgaben der Regelstrecke/Soll-Werte:

- Förderleistung Pumpwerk.

Bestandteile der Regelstrecke:

- MID-Fördermenge (FIR 81.4035),
- Pumpen (GOS 81.01.AP und GOS 81.02.AP),
- Füllstandsmessung RRB (LIRC 81.43.32).

7.2.2.4 Station RRB Werftstraße (RRB 2)

Aufbau und Funktionsweise der Regelstrecke des RRB Werftstraße ist identisch zur Funktionsweise des RRB Hafenstraße. Gleiches gilt für die Änderungen in der Betriebsweise durch das Prozesssteuerungssystem sowie die damit verbundenen internen Sicherheitsaspekte. Auf bauliche Unterschiede wird an dieser Stelle nicht eingegangen.

Vorgaben der Regelstrecke/Soll-Werte:

- Förderleistung Pumpwerk.

Bestandteile der Regelstrecke:

- MID-Fördermenge (FIR 82.4035),
- Pumpen (GOS 82.01.AP und GOS 82.02.AP),
- Füllstandsmessung RRB (LIRC 82.43.32).

7.2.2.5 Station RRB Industriehafen (RRB 3/4) und Überleitung

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden an dieser Station umfangreiche Baumaßnahmen durchgeführt. Zentraler Bestandteil dieser Baumaßnahme ist das sogenannte Überleitungsbauwerk. Durch dieses Bauwerk ist es in Zukunft möglich, einen Teil des Abwasserstroms der Hauptdruckleitung im RRB Industriehafen zwischenzuspeichern. Im Folgenden wird die Betriebsweise (Beeinflussung durch das Prozesssteuerungssystem) sowie die Funktionsweise der Regelstrecke erläutert.

Betriebsweise:

Ziel ist es, im Regenwetterfall den im MWPW Rheinpromenade entstehenden hydraulischen Stoß so abzuflachen, dass sich eine deutliche Vergleichmäßigung des Kläranlagenzulaufs ergibt.

Durch das Prozesssteuerungssystem erfolgt eine ständige Analyse der Ablaufmenge des MWPW sowie der Niederschlagsintensität der letzten 30 Minuten. Erreichen beide Werte einen definierten Schwellenwert, wird davon ausgegangen, dass ein signifikanter hydraulischer Stoß auf der Kläranlage zu erwarten ist. Das Prozesssteuerungssystem wird ab diesem Zeitpunkt Soll-Werte für den Durchfluss des Überleitungsbauwerks Richtung RRB Industriehafen vorgeben. Während des Befüllvorgangs wird durch das Prozesssteuerungssystem die Ablaufmenge des MWPW weiterhin überwacht. Erreicht diese den Ausschaltpunkt, wird die gezielte Befüllung des RRB eingestellt. Neben diesem Kriterium existieren weitere Kriterien, um das gezielte Befüllen zu beenden:

- Stauziel wurde erreicht,
- Füllstand im RRB 4 erreicht Anschaltpunkt der Regenwetterpumpen (siehe unten zur Funktionsweise der Regelstrecke).

Bedingt durch die baulichen Voraussetzungen unterscheidet sich diese Station hinsichtlich der Regelkreise von den anderen Stationen. Während des Befüllvorgangs müssen die Schmutzwasserpumpen/Entleerungspumpen des RRB ausgeschaltet sein (Kreislaufförderung). Im Einzelnen bedeutet dies, dass ein Regelkreis für den Befüllvorgang und ein Regelkreis für das Entleeren vorhanden ist. Ist der Befüllvorgang beendet, wird durch das Prozesssteuerungssystem umgehend durch die Vorgabe einer Fördermenge der SW-Pumpen die Entleerung des Beckens eingeleitet. In Zukunft könnte es möglich sein, die gespeicherte Wassermenge zeitlich verzögert abzugeben (z. B. bei gering belasteter Kläranlage).

Funktionsweise der Regelstrecke:

Aufgrund der Komplexität dieser Station sind bestimmte Elemente Bestandteile beider Regelstrecken. Daher erfolgt hier keine klare Trennung der Regelstrecken, es wird vielmehr das Zusammenspiel beider erläutert.

Wird durch das Prozesssteuerungssystem ein Soll-Wert für den Durchfluss am Überleitungsbauwerk vorgegeben, öffnet der **Regelschieber** bis der vorgegebene Soll-Wert am **MID** erreicht wird. Reichen Wassermenge und Druck in der Hauptdruckleitung nicht aus, um den Soll-Wert zu erreichen, kann zusätzlich die Durchflussmenge der Hauptdruckleitung Richtung Kläranlage durch Schließen des **Regelschiebers DN 600** reduziert werden. Bevor der Regelschieber im MID-Schacht öffnen kann, müssen drei Kriterien erfüllt sein:

1. Im Pumpwerk Deichstraße, das das RRB Industriehafen befüllt, muss der **Motorschieber DN 800** geschlossen sein. Das Überleitungsbauwerk ist mit der Leitung DN 800 verbunden, über welche auch die im Pumpwerk installierten Regenwasserpumpen ins RRB fördern. Um einen Überstau, verursacht durch das vom Überleitungsbauwerk zufließende Abwasser, zu vermeiden, muss der Regelschieber geschlossen sein. Steigt der Füllstand im Pumpensumpf über den Anschaltpunkt der Regenwasserpumpen, wird der Befüllvorgang beendet. Der Motorschieber DN 800 öffnet und die Regenwasserpumpen fördern in das RRB.
2. Wie im Vorfeld beschrieben, müssen während des Befüllvorgangs die im RRB installierten **Schmutzwasserpumpen** ausgeschaltet sein, um eine Kreislaufförderung zu vermeiden.
3. Da während des Befüllvorgangs die Schmutzwasserpumpen ausgeschaltet sind, muss der **Motorschieber DN 250**, welcher das Becken in Richtung Pumpensumpf schließt, geschlossen sein. Ansonsten würde das aus dem Pumpwerk Deichstraße und das aus

der Überleitung zufließende Abwasser direkt in das Pumpwerk im RRB fließen (Kreislaufförderung).

Wenn alle Kriterien für den Befüllvorgang erfüllt sind, wird der vom Prozesssteuerungssystem vorgegebene Soll-Wert umgesetzt. Der Füllstand im Becken wird durch eine **Höhenstandmessung**, sowie zusätzlich durch die unabhängige zweite Füllstandmessung in Form einer **Huber-Steuerung** überwacht. Der Befüllvorgang wird beendet, wenn mindestens ein Kriterium erfüllt wird (Zusammenfassung):

- Das Niederschlagsereignis ist beendet und der Ablauf des MWPW sinkt unterhalb des Schwellenwerts,
- Wiederkehrzeit des Niederschlagsereignisses übersteigt Schwellenwert,
- Stauziel wird erreicht,
- Zulauf aus dem Einzugsgebiet steigt an und die Regenwetterpumpen beginnen zu fördern (Pumpwerk Deichstraße),
- Kommunikation und/oder Regelkreis sind gestört.

Ist der Befüllvorgang beendet, beginnt umgehend die Entleerung des Beckens. In Zukunft könnte auch eine zeitlich verzögerte Entleerung (zum Schutz der KA) umgesetzt werden.

Vorgaben der Regelstrecke "Befüllen"/Soll-Werte:

- Durchflussmenge Überleitung.

Vorgaben der Regelstrecke "Entleeren"/Soll-Werte:

- Förderleistung Schmutzwasserpumpen.

Bestandteile der Regelstrecken:

- Regelschieber DN 500 Überleitungsbauwerk (GOS 83.292AA),
- Durchflussmessung Überleitungsbauwerk (FIR 83.4435),
- Regelschieber DN 600 Hauptdruckleitung (GOS 83.291AA),
- Motorschieber DN 800 Pumpwerk (GOS 83.28AA),
- Motorschieber DN 250 Pumpwerk Deichstraße (GOS 83.24AA),
- Höhenstandmessung RRB (LIRC 83. 4132),
- Hubersteuerung RRB (LIRC 83.4932),
- MID-Entleerung (FIR 83.4335),
- Schmutzwasserpumpen (GOS 83.01AP, GOS 83.02AP und GOS 83.03AP).

7.2.2.6 Station RRB Duisburger Straße

Die Funktion der Regelstrecke im Ausgangszustand, sowie im angepassten Zustand (Prozesssteuerungssystem) ist identisch zur Station RRB Hafenstraße.

Vorgaben der Regelstrecke/Soll-Werte:

- Förderleistung Pumpwerk.

Bestandteile der Regelstrecke:

- MID-Fördermenge (FIR 71.4135 und FIR 71.4235),
- Pumpen (GOS 71.01.AP und GOS 71.02.AP),
- Füllstandsmessung RÜB (LIRC 71.4632).

7.2.2.7 Station Vorwerk

Das Abwasser aus den angeschlossenen Trenngebieten fließt über einen Stauraumkanal DN 2000 dem Regenwasserpumpwerk zu. Diese Zulaufmenge wird durch eine im Stauraumkanal installierte **Kanalmaus** erfasst. Die Regenwasserpumpen fördern das Abwasser in das Regenzyklonbecken (RZB), wobei die Abwassermenge ebenfalls durch ein **MID** erfasst wird. Bei geringeren Zuflüssen fließt das Abwasser aus dem RZB über den **Entleerungsschieber** direkt dem Regenwasserpumpwerk zu, von dort wird es zur Kläranlage gefördert. Nimmt die Zulaufmenge zu, erfolgt ein Einstau des RZB. Bei Vollfüllung des RZB erfolgt eine Entlastung in den sogenannten Quelltopf, wo sich die Entlastung Richtung Vorfluter befindet. Die Entlastung kann durch einen **Motorschieber** auf 400 l/s gedrosselt werden. Erfasst wird die Wassermenge durch eine **Kanalmaus**. Übersteigt der Wasserstand die Oberkannte des Quelltopfs, beginnt das Erdbecken sich zu füllen. Über eine **Höhenstandmessung** wird das gespeicherte Volumen erfasst. Bei Trockenwetter bzw. in der Entleerungsphase fließt das Abwasser über den Entleerungsschieber im RZB dem **PW** zu, welches direkt Richtung KA fördert. Die Fördermenge wird durch ein **MID** erfasst.

Änderung durch das Prozesssteuerungssystem:

Durch das Prozesssteuerungssystem wird ein gedrosselter **Soll-Wert für die Mischwasserpumpen** vorgegeben, um somit einen gezielten Einstau der Becken zu erzielen.

Vorgaben der Regelstrecke/Soll-Werte:

- Förderleistung Pumpwerk.

Bestandteile der Regelstrecke:

- Zulaufmenge Regenwetterpumpwerk (FIR 05.4135),
- Förderleistung Regenwetterpumpen (FIR 61.4835),
- Füllstandsmessung Quelltopf/Erdbecken (LIRC 61.4932),
- Motorschieber Entlastung Quelltopf (GOS 61.210AA),
- Kanalmaus-Entleerung (FIR 61.4735),

- Pumpen MWPW (GOS 61.04AP und GOS 61.03AP),
- Durchflussmessung MWPW (FIR 61.4235),
- Entleerungsschieber RZB (GOS 61.27AA).

7.3 Auswahl des Regelungssystems für den hydraulischen Anteil

Soll ein Kanalnetz mit einem klassischen Regler optimiert werden, ist es notwendig, das Verhalten des Kanalnetzes sehr genau zu analysieren und den Regler entsprechend auszuwählen und anzupassen. Da es sich bei Kanalnetzen um sehr komplexe, hochgradig nichtlineare Systeme handelt, ist eine seriöse Bewertung ohne ein hydrodynamisches Modell kaum möglich. Auf Basis eines solchen Modells kann ein Regler aufgebaut werden.

Aufgrund der Nichtlinearität des Systems sind stetige **PID-Regler** (Proportional-integral-derivative Controller) wenig geeignet. Ein guter Ansatz ist der Einsatz von nichtlinearen Mehrgrößenreglern (**Fuzzy-Reglern**), wobei in diesem Fall der hohe Konfigurationsaufwand und die damit verbundenen Kosten klar als Nachteil zu werten sind (Hilmer, 2008). Ein Neuro-Fuzzy-System, welches einmal entwickelt, optimiert und umgesetzt ist, lässt sich bei Änderungen der Randbedingungen (z. B. Einbau neuerer Pumpen mit einer höheren Förderleistung) nur mit einem sehr hohen Zeit- und Personalaufwand anpassen.

Abweichend von der Antragstellung für das vorliegende Projekt ist daher, in Absprache mit dem Fördermittelgeber, ein anderer Weg über ein sogenanntes **Agentensystem** gewählt worden. Agentensysteme sind in der Lage, sich selber an ein System anzupassen, ohne dass eine aufwendige Analyse oder Parametrierung eines Reglers notwendig ist.

Für den Bereich der Wasserwirtschaft sind Agentensysteme ein hoch innovativer Ansatz, so dass zum Zeitpunkt der Antragstellung 2006/2007 deren Einsatzfähigkeit noch nicht mit ausreichender Sicherheit abzuschätzen war. Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens ersetzen Agentensysteme die ursprünglich vorgesehenen Komponenten Fuzzy-Logik und Genetische Algorithmen zur Bestimmung der für die aktuelle Situation optimierten Stellgrößen. Sie ermöglichen - wie die im Antrag vorgesehenen Verfahren - die Auswahl optimaler Einstellungen auch bei dynamischen und hochgradig nichtlinearen Prozessen und haben gegenüber diesen jedoch einen entscheidenden Vorteil: Sie sind deutlich einfacher auf individuelle Anlagen zu konfigurieren. Damit ist die mit dem Vorhaben angestrebte Übertragbarkeit auf andere Anlagen erheblich einfacher gegeben als bei den ursprünglich vorgesehenen Ansätzen.

7.4 Erläuterung des Agentensystems

7.4.1 Definition Agentensystem

Häufig wird ein Agent als autonome, in sich abgegrenzte Einheit angesehen, die flexibel die ihr zugewiesenen Aufgaben in einer definierten Umgebung erfüllt. Die Umgebung nimmt der Agent mit Hilfe von Sensoren wahr. Auf Basis seiner Wahrnehmung entscheidet er im Rahmen seiner Entscheidungsbefugnisse, welche Maßnahmen er zu treffen hat, um seine Ziele zu erreichen. Über Aktoren übt er innerhalb eines bestimmten Handlungsrahmens Einfluss auf seine Umgebung aus.

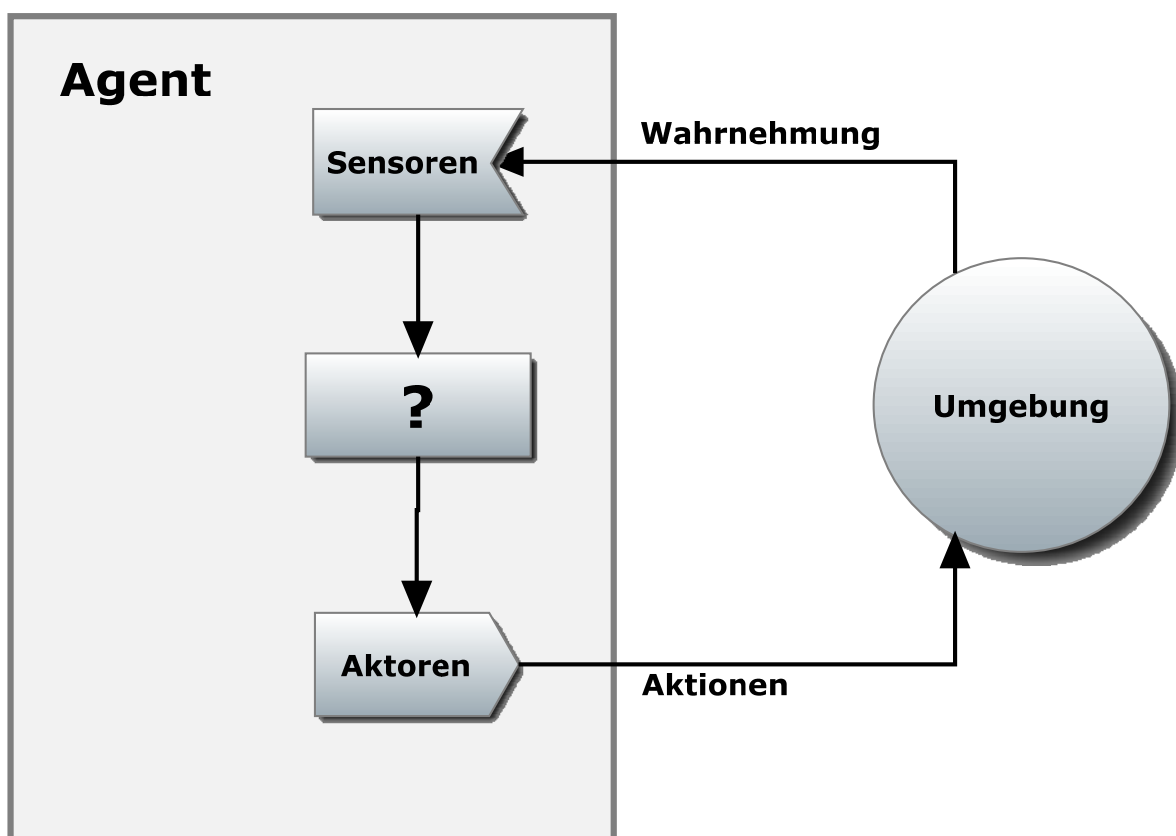


Abbildung 19: Grundmodell eines Agenten

Autonomie

Ein Agent besitzt eine gewisse Entscheidungsbefugnis bzw. einen Entscheidungsrahmen, in dem er operieren kann. Somit ist er in der Lage, weitestgehend selbstständig und ohne Rücksprache mit Dritten zu entscheiden, welche Handlungen er ausführen muss, um seine Ziele zu erreichen. Im Rahmen seiner Handlungsfreiheit übt er Einfluss auf seine Umgebung aus.

Flexibilität

Ein Agent ist in der Lage, auf unerwartete Änderungen in seiner Umgebung zielgerichtet zu reagieren. Er kann die Fähigkeit besitzen vorrausschauend zu planen. Ihm ist also im bestimmten Maße bewusst, welche Folgen sein Handeln auf die Umgebung hat.

Interaktiv

Ein Agent ist in der Lage mit der Umwelt und auch mit anderen Agenten zu interagieren. Diese Interaktion kann auch auf hohem Niveau geschehen. Zur Verfolgung gemeinsamer Ziele kann er mit anderen Agenten kooperieren oder - im Falle gegensätzlicher Ziele - konkurrieren.

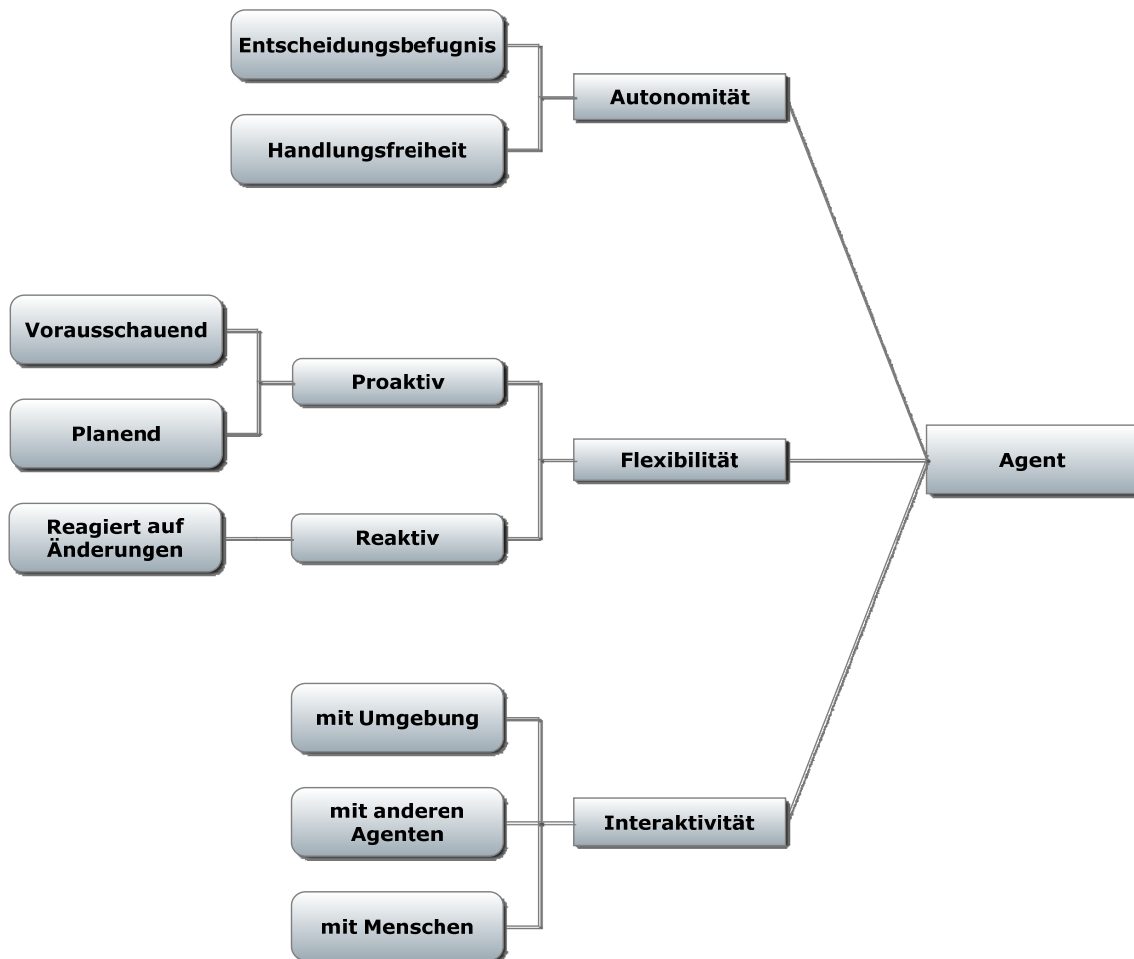


Abbildung 20: Merkmale eines Softwareagenten

7.4.2 Agentenmodelle

Agentenmodelle können in unterschiedliche Gruppen eingeteilt werden. Sie unterscheiden sich in Abhängigkeit von ihrer Komplexität. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Agentenmodelle vorgestellt.

Einfacher reaktiver Agent

Der einfache, reaktive Agent handelt nur auf Basis der aktuellen Sensoreingaben. Liegen Sensorinformationen vor, so bestimmt er eine Aktion auf Basis definierter Aktionsregeln. Treffen mehrere Regeln auf eine Sensorinformation zu, so bestimmt der Agent anhand von Prioritäten, welche Regel in Kraft tritt und welche Aktion somit ausgeführt wird. Probleme entstehen, wenn die Wahrnehmung gestört oder nicht durch eine Regel abgedeckt ist. Dies kann dazu führen, dass der Agent unter Umständen nicht mehr reagiert.

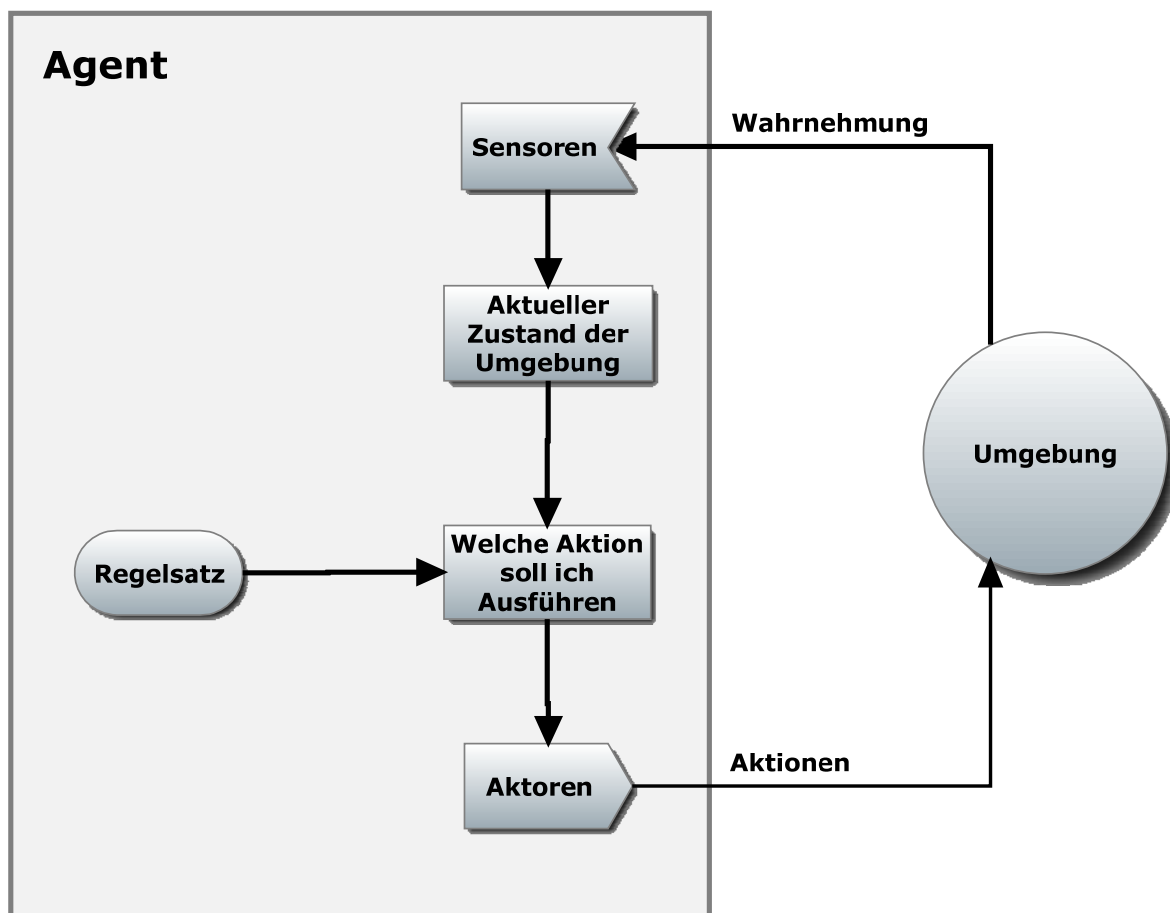


Abbildung 21: Einfacher reaktiver Agent

Modellbasierter reaktiver Agent

Der modellbasierte reaktive Agent besitzt eine interne Erinnerung, um auf eine gestörte oder nur teilweise Wahrnehmung reagieren zu können. Hierbei greift er auf vergangene Wahrnehmungen zurück und ersetzt oder ergänzt zumindest teilweise die fehlerhafte oder unvollständige neue Wahrnehmung. Eine einfache Erinnerung reicht häufig nicht aus, um fehlerhafte Wahrnehmungen zu korrigieren. Der Agent kann zusätzlich die - von ihm unabhängige - Entwicklung der Umgebung (anhand seines internen Modells der Umgebung) vorhersehen, um fehlende Informationsteile zu ersetzen. Der Agent kann zudem die Fähigkeit besitzen, die Veränderung der Umgebung - die durch seine Aktionen ausgelöst werden - abzuschätzen.

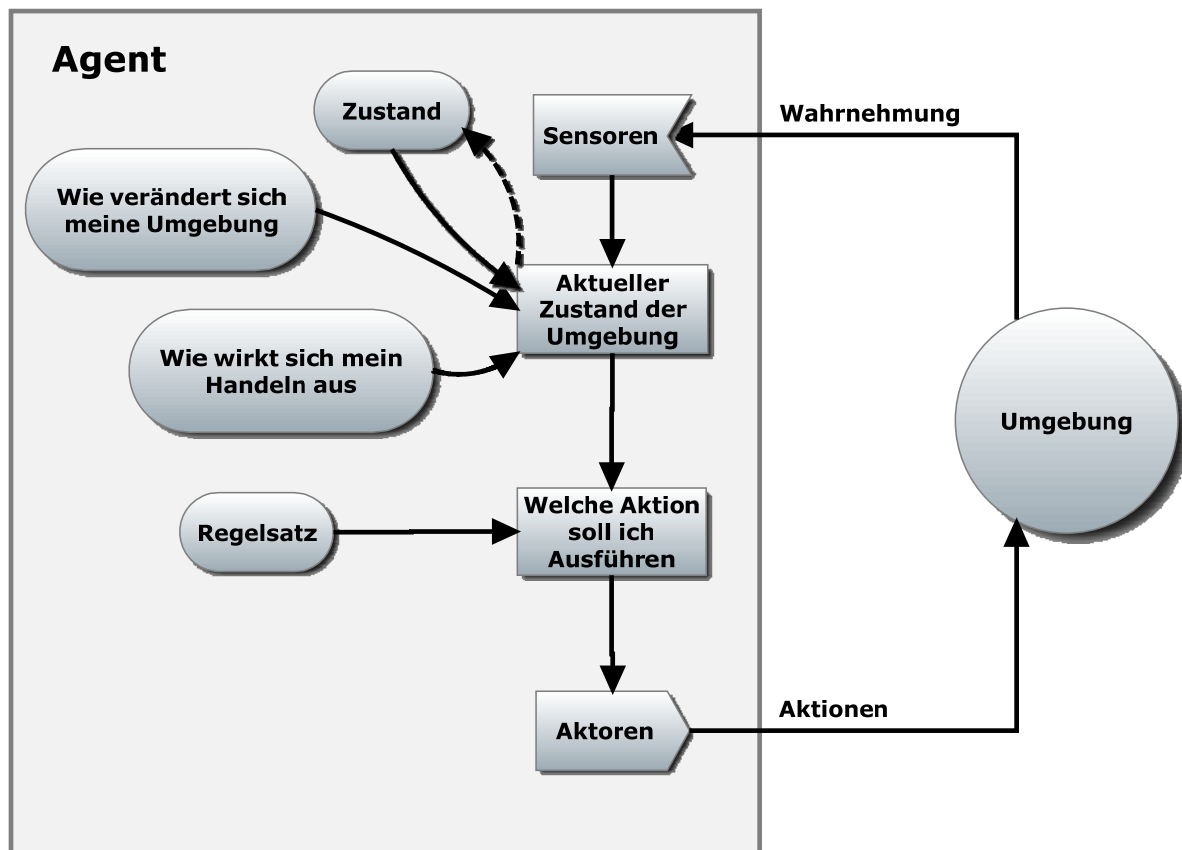


Abbildung 22: Modellbasierter reaktiver Agent

Zielgerichteter Agent

Der zielgerichtete Agent ist eine Erweiterung des modellbasierten Agenten. Zusätzlich zum Wissen und den Eigenschaften des modellbasierten Agenten definiert er Ziele, die er erreichen möchte. Auf Grundlage dieser Ziele entscheidet der Agent über die Aktion, die er als nächstes ausführen wird. Durch sein Wissen, wie sich die Umgebung auf seine Aktionen verändert, besitzt er die Fähigkeit, bei seiner Aktionsbestimmung planend vorzugehen. Ist ein Ziel erreicht, beendet der zielgerichtete Agent in der Regel seine Ausführung.

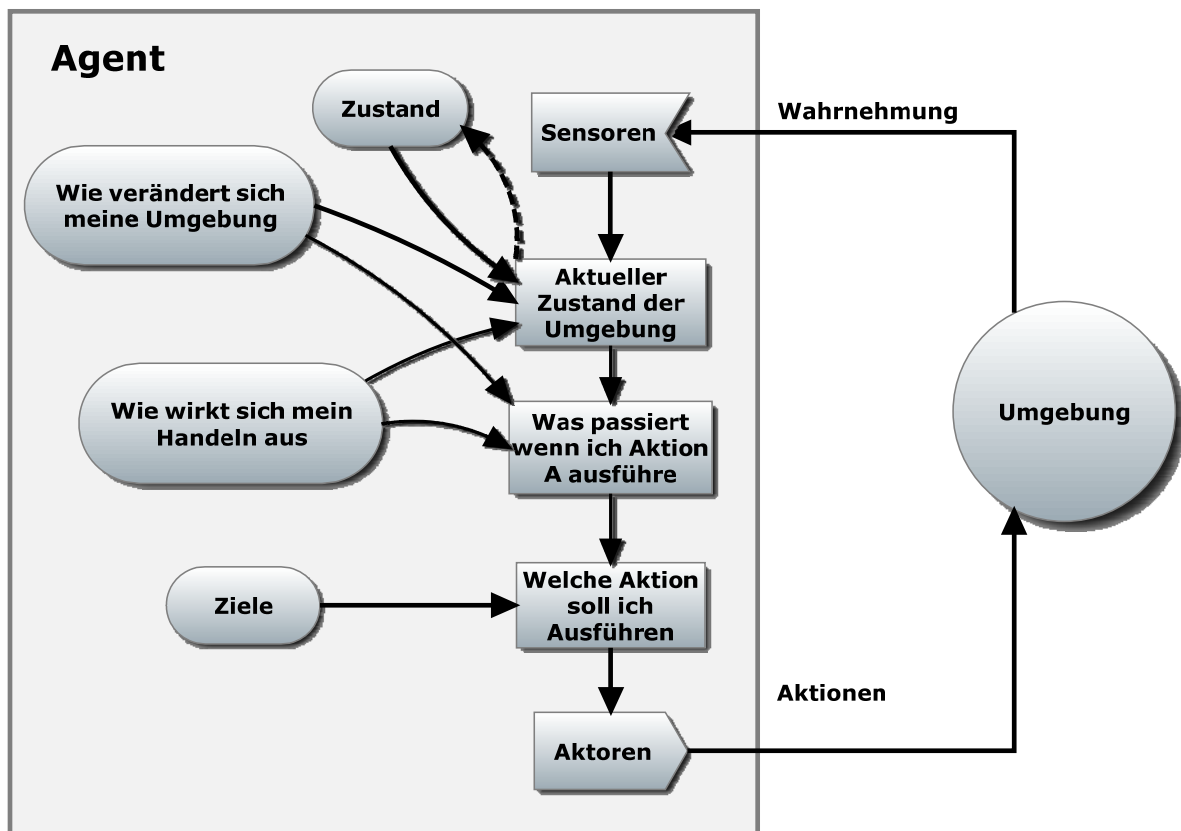


Abbildung 23: Zielgerichteter Agent

Nutzwertbasierter Agent

Ein nutzwertbasierter Agent kann mehrere Hauptziele - oder auch Teilziele - definieren, die er durch entsprechende Aktionen erreichen kann. Häufig kann ein Hauptziel nur über Abarbeitung unterschiedlicher Teilziele erreicht werden. Der Agent bestimmt, welches Teilziel ihm durch entsprechende Abarbeitung den höchsten Nutzen bringt, um ein Hauptziel zu erreichen. Dieser Nutzen kann z. B. durch eine Funktion mit mehreren Parametern bestimmt werden.

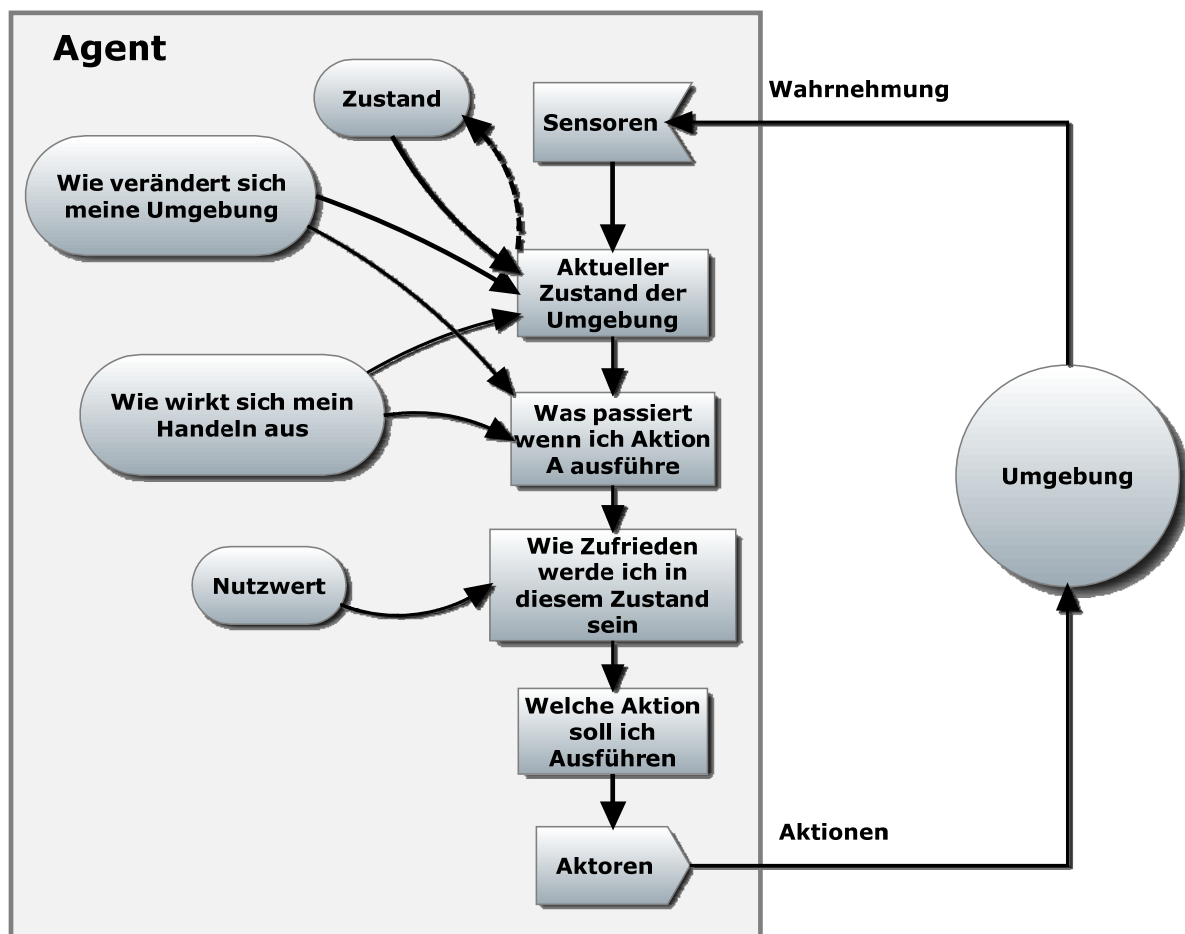


Abbildung 24: Nutzwertbasierter Agent

Lernfähiger Agent

Die bisher beschriebenen Agentenmodelle können über entsprechende Methoden zu einem lernfähigen Agenten erweitert werden. Das Ausführungselement beinhaltet hierbei die Funktionsweise des Agenten. Die letzte Aktion des Agenten wird von einem Bewertungselement unter Berücksichtigung entsprechender Leistungsstandards bewertet und geht als Feedback in das Lernelement über. Die Verbesserung des vorhandenen Wissens geschieht über ein Lernelement, welches zudem Lernziele bestimmt und an den Problemgenerator übergibt. Der Problemgenerator schlägt dem Ausführungselement entsprechende Aktionen vor, um neues Wissen zu erlangen. Die Verbesserung des vorhandenen Wissens geschieht über ein Lernelement, welches zudem Lernziele bestimmt und an den Problemgenerator übergibt. Der Problemgenerator schlägt dem Ausführungselement entsprechende Aktionen vor, um neues Wissen zu erlangen.

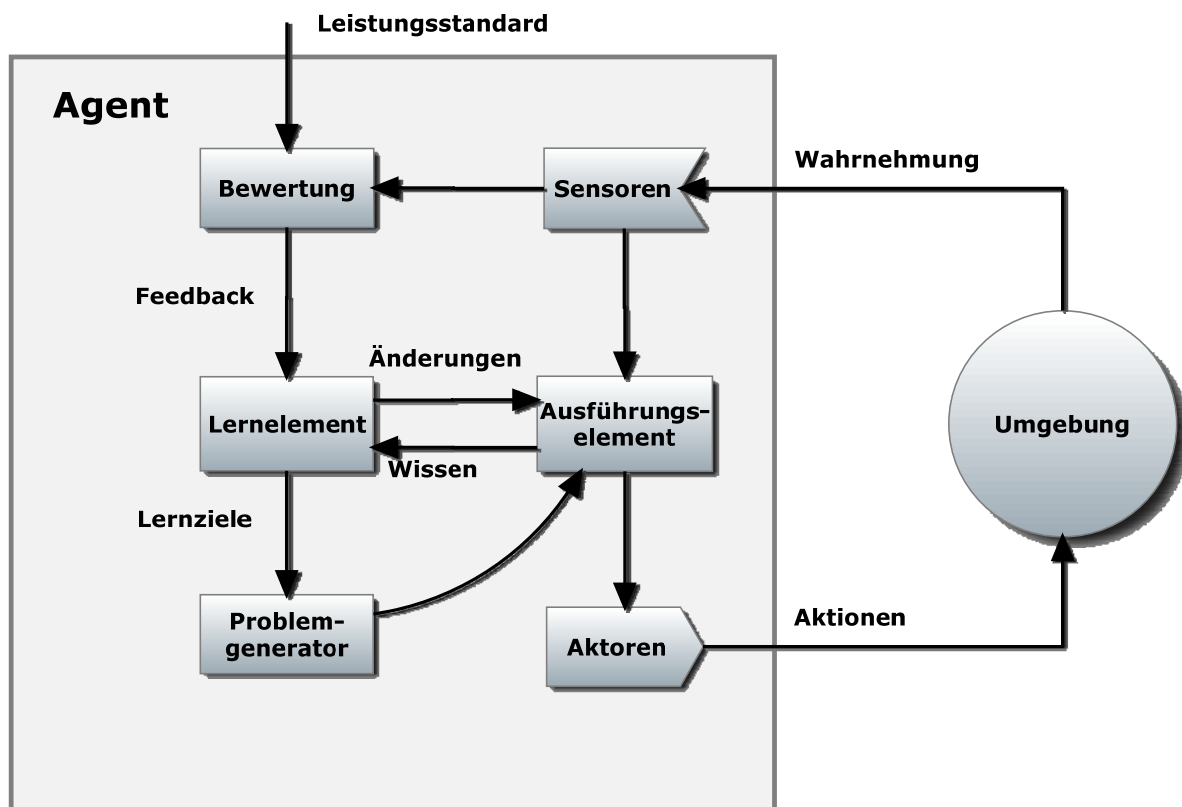


Abbildung 25: Lernfähiger Agent

7.4.3 Entwicklungsansatz des Agentensystems

Zu Beginn der Umsetzung erfolgte eine Analyse verschiedener Ansätze zur Abbildung des Agentensystem. Dabei stellte sich der marktwirtschaftliche Ansatz, also die Abbildung des PSS ähnlich eines Warenmarkts, als optimale Lösung heraus. Dieser Ansatz soll im Folgenden erläutert werden.

Marktwirtschaftlicher Ansatz

Vergleicht man die Funktionen der Hauptkomponenten in einem Abwassersystem mit denen eines Marktes, so erkennt man diverse Analogien. Bei beiden Systemen gibt es ein Erzeugnis, einen Anbieter des Erzeugnisses, einen Abnehmer des Erzeugnisses, Lagerstätten und ein gemeinsames Transportsystem. Diese Ähnlichkeiten lassen den Schluss zu, dass auch ähnliche Systemregeln gelten können. Daraus entstand der Ansatz, das Verhalten eines Marktes mit einem Agentensystem abzubilden. Die einzelnen Teilnehmer des Marktes werden durch Softwareagenten mit unterschiedlichen Funktionen repräsentiert.

Komponenten des Wassermarktes

Der Markt besteht aus unterschiedlichen Komponenten. Zum einen gibt es aktive Komponenten wie Käufer, Verkäufer und Zwischenhändler, zum anderen gibt es passive Komponenten wie die Handelsware, Warenspeicher und das Transportsystem, die von den aktiven Komponenten beeinflusst werden.

Die Ware

Das Erzeugnis bzw. die Ware, die auf dem Wassermarkt von den Agenten gehandelt wird, ist das Abwasser bzw. die sich daraus ergebenden Drosselwassermengen. Es besitzt einen Preis oder eine Gewichtung und kann, je nach Regelungskonzept, eine Qualität besitzen, die sich auf den Verkaufspreis auswirkt. Es wird kein Volumen V sondern ein Volumenstrom V bzw. Q , welcher den Drosselabflüssen entspricht, gehandelt. Produziert wird die Ware durch den Oberflächenabfluss, welcher in den einzelnen Teileinzugsgebieten entsteht.

Das Transportsystem

Das Transportsystem für die gehandelten Waren ist das Kanalnetz. Dieses Transportsystem ist an bestimmte Randbedingungen gebunden, welche an die physikalischen Gegebenheiten von Kanalnetzen gebunden sind.

Der Käufer

Der Käufer stellt grundsätzlich die Kläranlage bzw. den Kläranlagenzulauf dar. Er ist der einzige wirkliche Käufer auf dem Wassermarkt. Der Käufer bestimmt die optimale Zulaufmenge zur Kläranlage und versucht diese anzukaufen. Sein Ziel ist, die Kläranlage optimal mit Abwasser zu versorgen.

Der Verkäufer

Der Verkäufer vertritt die Regenbecken mit den jeweiligen Einzugsgebieten. Jedem Regenbecken ist ein Einzugsgebiet zugeordnet, welches Abwasser produziert. Der Verkäufer hat keinen Einfluss auf die produzierte Abwassermenge. Sein Ziel ist somit, die produzierte Menge so gut wie möglich zu verkaufen, ohne dass Wasser - durch ein Überschreiten der Lagerkapazitäten - verloren geht. Die Speicherkapazitäten der Regenbecken entsprechen hierbei den Lagerstätten für die Wassermengen. Der Startpreis für das Verkaufsgebot wird anhand verschiedener Preisfunktionen berechnet, in die der Füllstand des Lagers, die Entlastungsmenge, die Priorität des Verkäufers und ggf. die Qualität des Abwassers einfließen können. Der Verkäufer hat die Beschränkung, nur einen Teil seines Wassers in einer Verkaufsrunde anbieten zu können. Dies sorgt dafür, dass er nicht sofort in der ersten Runde seine gesamte Wassermenge verkaufen kann. Der Verkäufer hat jedoch das Ziel, so viel wie möglich zu verkaufen. Somit gibt der Verkäufer so lange Angebote ab, bis er keine Waren mehr zu verkaufen hat. Wird er von anderen Verkäufern unterboten, verringert er seinen Verkaufspreis.

Der Zwischenhändler

Der Zwischenhändler ist die Instanz zwischen Käufer und Verkäufer. Physikalisch gesehen kann man dem Zwischenhändler einen Kanalstrang mit seinem Regenbecken zuordnen. Der Zwischenhändler nimmt das Ankaufsgebot des Käufers und versucht die geforderte Menge bei den Verkäufern möglichst preisgünstig zu erhalten. Zu diesem Zweck sammelt er in jeder Handelsrunde die Angebote der Verkäufer und bestimmt anhand des Verkaufspreises das beste Angebot. Der Verkäufer mit dem niedrigsten Preis darf seine angebotene Menge verkaufen. Die Handelsrunden werden abgeschlossen, sobald die geforderte Menge gekauft wurde, oder keine Waren mehr angeboten werden.

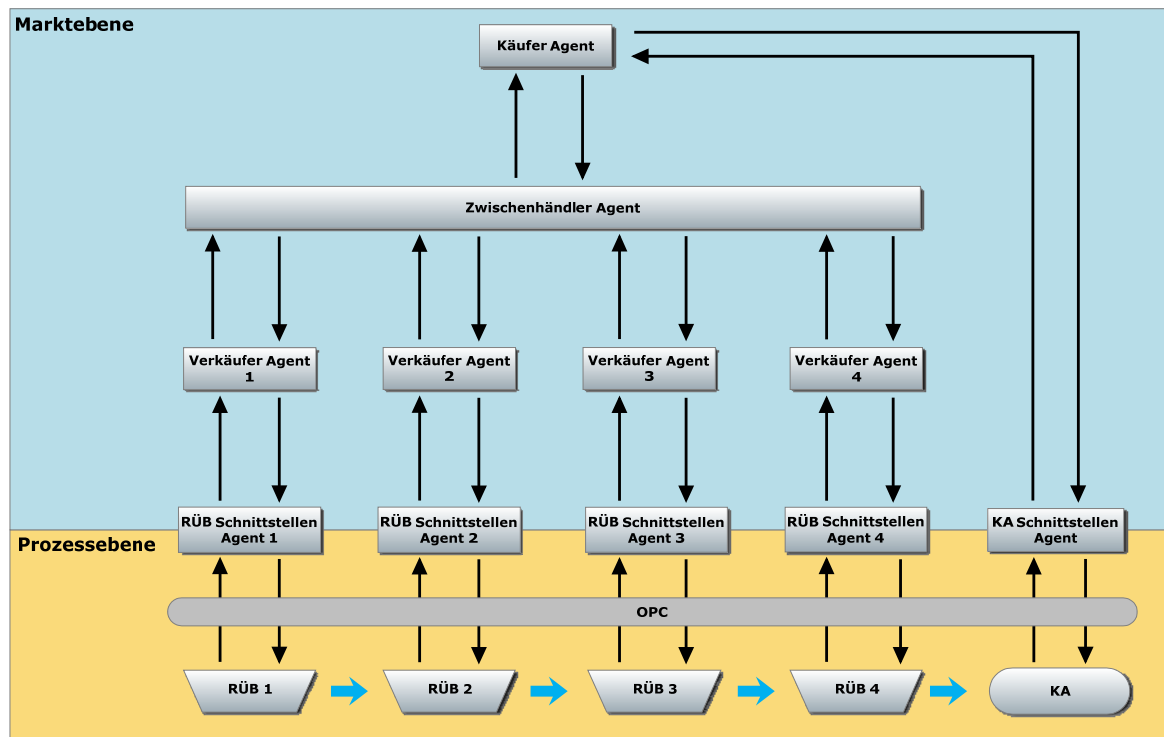


Abbildung 26: Komponenten des virtuellen Wassermarktes

In der Abbildung 26 ist der Grundaufbau des Agentensystems, so wie es im Rahmen des PSS umgesetzt wurde, am Beispiel eines Kanalnetzes mit vier Regenbecken, welche in Reihe liegen, schematisch dargestellt. Grundsätzlich kann das System in zwei Ebenen unterteilt werden:

- Die Prozessebene, welche die Außenstationen sowie die Kläranlage, inklusiver aller technischen Komponenten und Schnittstellen (Pumpen, Schieber, SPS, PLS usw.), enthält.
- Die Markt- bzw. Softwareebene, welche das eigentliche PSS enthält. In dieser Ebene laufen alle Informationen zusammen und die im Kapitel 7.4.5 Preisfunktion beschriebenen Berechnungen werden hier durchgeführt.

Beide Ebenen kommunizieren über eine Schnittstelle, im Rahmen des PSS ist dies die OPC-Schnittstelle.

7.4.4 Physikalische Randbedingungen des Agentensystems

Würde es sich bei dem System um einen vollkommenen Markt handeln, so könnte der Käufer zu jedem Zeitpunkt die maximal verfügbare Menge bei den jeweils günstigsten Verkäufern erwerben. Genau wie bei einem realen Markt unterliegt das System jedoch gewissen Beschränkungen bzw. Randbedingungen, die den physikalischen und topologischen Eigenschaften des Kanalnetzes entsprechen.

Transportrichtung der Ware (Fließrichtung des Wassers)

Die Transportrichtung des Abwassers ist durch die physikalischen Eigenschaften des Kanalnetzes vorgegeben. Das Abwasser kann nur in Fließrichtung transportiert werden.

Maximale Drosselmengen/Fördermengen

Aufgrund der physikalischen Eigenschaften des Kanalnetzes wird jedem Becken eine maximale Drosselmenge berechnet und zugewiesen. Dies ist notwendig, um ein Überstauen des nachfolgenden bzw. des oberhalb liegenden Kanalsystems während eines Regenereignisses zu vermeiden. Für das System bedeutet dies, dass - unabhängig von der vorhandenen Wassermenge - nur die maximal zulässige Drosselmenge verkauft werden darf.

Begrenzung

Sind Becken, in Fließrichtung gesehen, in Reihe angeordnet, so stellt der Ablauf des oberhalb liegenden Beckens gleichzeitig einen Teil des Zulaufs des unterhalb liegenden Beckens dar. Diese Einschränkung dient also vorrangig zur Reduzierung der Zulaufmenge des unterhalb liegenden Beckens, welches somit entlastet wird. Dieser Punkt spielt für das Einzugsgebiet der Stadt Emmerich nur eine untergeordnete Rolle, wurde aber hinsichtlich der Umsetzung für andere Kanalnetze vollständig im PSS integriert.

7.4.5 Preisfunktion

Zentraler Bestandteil des Agentensystems ist die Preisfunktion, mit Hilfe derer letztendlich die Fördermengen der Pumpwerke berechnet werden. Das Verhalten des kompletten Regelungssystems wird durch den Preis der Ware Wasser bestimmt. Dies bedeutet, dass jegliche Einflussnahme auf das System über die Bildung des Preises realisiert wird. Der virtuelle Preis des Abwassers wird dabei von folgenden Parametern beeinflusst.

Beckenfüllstand/Entlastung in den Vorfluter:

Abhängig vom aktuellen Füllstand eines Beckens zu Beginn eines Niederschlagsereignisses ergeben sich unterschiedliche Gewichtungen innerhalb des PSS. Ein Becken, welches mit einsetzendem Niederschlag teilgefüllt ist, hat somit eine höhere Priorität als ein leeres Becken. Sollte ein Becken während des Steuerungsvorgangs schon entlasten oder die als maximal definierte Wassermenge gespeichert haben, so nimmt dieses automatisch nicht mehr am System teil, bzw. es wird die maximale Fördermenge vorgegeben.

Abwasserzusammensetzung/Belastungsgrad des Abwassers

Um einen möglichst geringen Schadstoffeintrag in das Gewässer zu gewährleisten, erfolgt die Überwachung der Frachtbelastung des Abwassers. Entsprechend des Belastungsgrads verändert sich die Gewichtung des jeweiligen Beckens. Somit kann zum einen ein sensibler Vorfluter geschützt werden, indem Entlastungen durch möglichst hohe Fördermengen verhindert werden, oder zum anderen durch gezieltes Einstauen von Becken mit hohen freien Speicherkapazitäten der Kläranlagenzulauf entlastet werden.

Sensibilität des Vorfluters

Diese Komponente stellt eine Weiterführung bzw. Ergänzung zum vorherigen Punkt dar. Entlastet ein Becken beispielsweise in einen aus hydraulischer oder ökologischer Hinsicht sensiblen Vorfluter, so wird dieses Becken eine höhere Priorität bekommen und dementsprechend geschützt.

Vorteil dieses Ansatzes ist, dass sich die entsprechenden Parameter ohne größeren Aufwand im System einstellen lassen und die notwendigen Informationen dazu dem Betriebspersonal bzw. dem Kanalnetzbetreiber vorliegen. Weiterhin lassen sich durch Anpassung der einzelnen Gewichtungen verschiedene Szenarien bzw. Regelziele definieren:

1. Reduzierung der Gesamtentlastung aller Becken,
2. Vergleichmäßigung der Entlastungen,
3. Schutz eines Regenbeckens,
4. Vergleichmäßigung des Kläranlagenzulaufs (für das EZG Emmerich maßgebliches Szenario).

7.4.5.1 Mathematische Beschreibung der Preisfunktion

Das Verhalten des kompletten Regelungssystems wird durch den Preis der Ware Wasser bestimmt. Dies bedeutet, dass jegliche Einflussnahme auf das System über die Bildung des Preises realisiert wird. Grundsätzlich wird zu Beginn jedes Handelsablaufs der Startpreis ($SP_i(t)$) für jedes Becken (i) nach Formel 1 bestimmt.

$$SP_i(t) = f(F_i(t), A_i(t), Q_i(t), P_i) \quad (1)$$

$F_i(t)$:= Füllstand von Becken i zum Zeitpunkt t in Prozent

$A_i(t)$:= Abschlag von Becken i zum Zeitpunkt t

$Q_i(t)$:= Wasserqualität von Becken i zum Zeitpunkt t

P_i := Priorität von Becken i (hohe Priorität bedeutet ein Schutz des Beckens)

Entsprechend der Anwendung sowie der jeweiligen Regelungsziele werden nicht alle in Formel 1 aufgezeigten Abhängigkeiten zur Preisbildung herangezogen.

Während einer Verkaufsrunde (r) wird der Rundenpreis ($RP_i(r)$), in Abhängigkeit vom Verkaufstatus ($VS(r)$) der Becken und des Verringerungsfaktors ($VF_i(r)$), wie folgt berechnet:

$$RP_i(0) = SP_i(t) \quad (2)$$

$$RP_i(r) = f(RP_i(r-1), VS_i(r-1), VF_i), r = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (3)$$

$VS_i(r)$:= Verkaufstatus von Becken i in Runde r

VF_i := Verringerungsfaktor von Becken i

Startpreisfunktion abhängig von Füllstand und Priorität

Bei dieser Preisfunktion wird der Startpreis linear nach folgender Funktion bestimmt:

$$SP_1(z) = K_{\text{maxpreis}} - (P_1 + F_1(z) * K_{\text{verfrachtung}}) \quad (4)$$

Die Standardkonfiguration ist:

$$k_{\text{maxpreis}} = 1000$$

$$k_{\text{verringderung}} = 5$$

Mit steigendem Füllstand verringert sich der Verkaufspreis (Abbildung 27). Jedem Becken können unterschiedliche Prioritätsfaktoren zugeordnet werden. Je höher diese Faktoren desto geringer wird der Startpreis bei gleichem Füllstand berechnet. Zur Vermeidung von zu großen Preisunterschieden, und somit einem dauerhaften Unterbieten eines Verkäufers, ist der Prioritätsfaktor P_{ij} auf den Bereich von 0,7 bis 1,3 begrenzt. Bei geringen Füllständen hat der Prioritätsfaktor nur einen kleinen Einfluss auf den Preisunterschied. Das bedeutet, dass bei geringer Belastung der hydraulischen Speicherkapazitäten die Becken annähernd gleich behandelt werden. Wird die hydraulische Belastung größer, gewinnt die Beckenpriorität an Einfluss. Mit Hilfe des Faktors $k_{\text{verringderung}}$ wird der Füllstand [%] in die virtuelle Preiseinheit umgerechnet. In diesem Beispiel ergibt sich ein Maximalwert von 500 für die Preiseinheit. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass sich bei höchster Priorität und maximalem Füllstand ein minimaler Wasserpreis von $1000 - (1,3 * 500) = 350$ ergibt.

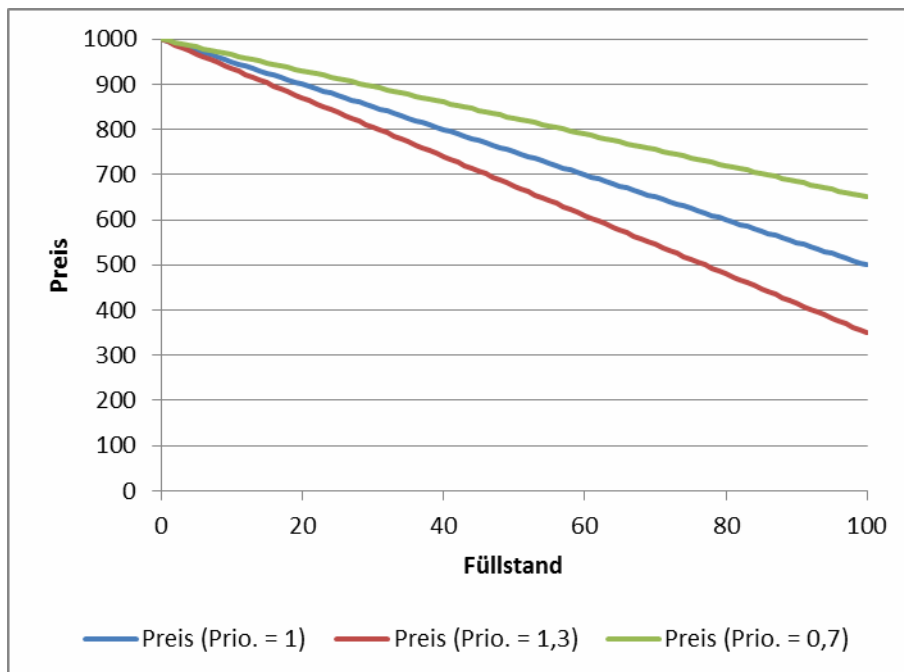


Abbildung 27: Lineare Preisfunktion (Füllstand, Priorität)

Folgende Regelungsziele können durch Verwendung dieser Preisfunktion erfüllt werden:

- bessere Ausnutzung der vorhandenen Speicherkapazitäten
(Durch bessere Ausnutzung der hydraulischen Speicherkapazitäten),
- Vergleichmäßigung des Kläranlagenzulaufs.
(Durch gezieltes Zwischenspeichern des Abwassers).

Bei der Berechnung dieser Preisfunktion wird die Abschlagsmenge nicht mitberücksichtigt. Sobald alle Becken zu 100 % gefüllt sind, haben sie bei gleichem Prioritätsfaktor den gleichen Startpreis. Selbst bei Verwendung unterschiedlicher Prioritätsfaktoren können folgende Ziele bei einem abschlagenden Becken nur bedingt erfüllt werden:

- gleichmäßige Verteilung der Abschlagsmenge,
- gezielter Schutz eines Beckens,
- gezielter Abschlag an einem Becken.

Der Grund hierfür liegt darin, dass keine Information über die Abschlagsmenge vorliegt.

Startpreisfunktion abhängig von Füllstand, Priorität und Abschlagsmenge

Die Hinzunahme der Abschlagsmenge als Einflussgröße bei der Berechnung des Startpreises führt zu einer Startpreisminderung um den Anteil des Abschlagsnachlasses ($AN_i(t)$). Der Abschlagsnachlass wird auf den Preisbereich 0 - 350 skaliert, der nach folgender Formel berechnet wird:

$$AN_i(t) = \left(AP_i * \frac{A_i(t)}{\left(\frac{A_{max_i} - A_{min_i}}{350} \right)} \right) \quad (5)$$

AP_i : = Abschlagspriorität von Becken i

A_{max_i} : = Abschlagsmaximum von Becken i

A_{min_i} : = Abschlagsminimum von Becken i

$A_i(t)$: = Abschlagsmenge von Becken i zum Zeitpunkt t

Durch Erweiterung von Formel 4 ergibt sich folgende Berechnung für den Startpreis:

$$SP_i(t) = k_{\max\text{preis}} - (P_i * F_i(t)) - AN_i(t) \quad (6)$$

Ab einem Füllstand von 100 % sorgt der Abschlagsnachlass für eine weitere Verringerung des Startpreises.

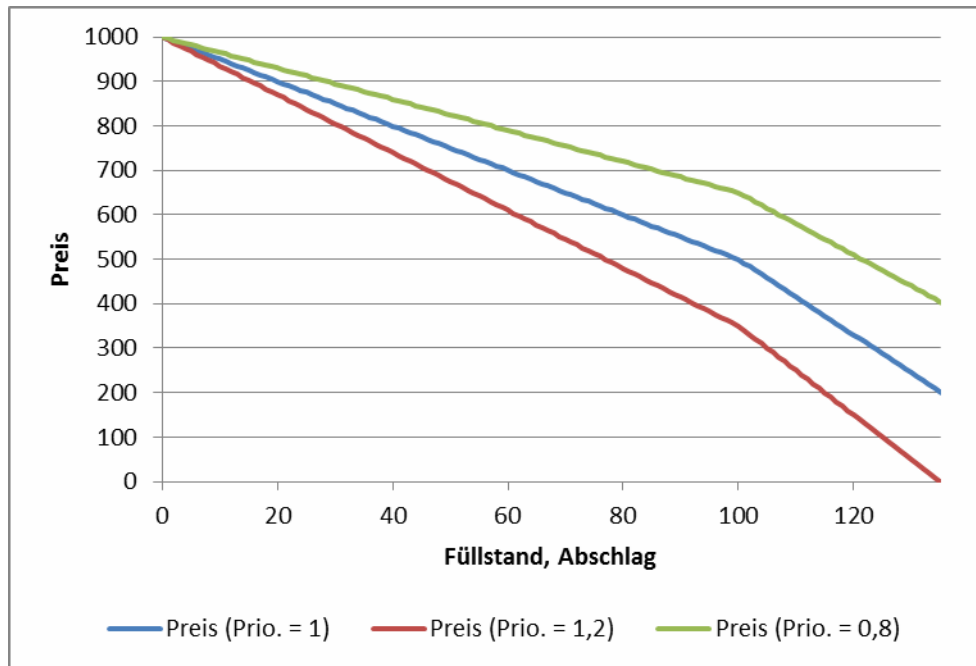


Abbildung 28: Lineare Preisfunktion (Füllstand, Priorität, Abschlagsmenge)

Durch Hinzunahme der Entlastungsmengen bei der Preisberechnung können folgende zusätzliche Regelungsziele erreicht werden:

- gleichmäßige Verteilung der Abschlagsmenge,
- gezielter Schutz eines Beckens,
- gezielter Abschlag an einem Becken.

Startpreisfunktion abhängig von Füllstand, Verschmutzungsgrad und Abschlagsmenge

Der Verschmutzungsgrad (VG(t)) von Becken (i) geht als Verschmutzungsfaktor (VF(t)) in die Bestimmung des Startpreises mit ein und berechnet sich folgendermaßen:

$$VF_i(t) = \frac{VG_i(t)}{\left(\frac{VG_{max_i} - VG_{min_i}}{1,2 - 0,7}\right)} + 0,7 \quad (7)$$

$VG_i(t)$:= Verschmutzungsgrad in Becken i zum Zeitpunkt t

VG_{max_i} := Maximalwert der Verschmutzung in Becken i

VG_{min_i} := Minimalwert der Verschmutzung in Becken i

Dieser Verschmutzungsfaktor ($VF_i(t)$) geht zusätzlich zum Prioritätsfaktor (P_i) sowohl in die Berechnung des Abschlagsnachlasses (AN_i)

$$AN_i(t) = \left(VF_i(t) * P_i * \frac{A_i(t)}{(A_{max,i} - A_{min,i})} \right) \quad (8)$$

als auch in die Berechnung des Startpreises mit ein.

$$SP_i(t) = k_{marginale} - (VF_i(t) * P_i * F_i(t)) * k_{verringern} - AN_i(t) \quad (9)$$

Da der Verschmutzungsgrad kontinuierlich neu bestimmt wird, ändert sich auch die Gesamtpriorität $VF_i(t) * P_i$ der Becken kontinuierlich. Auf diese Weise werden Becken mit höher belastetem Abwasser geschützt und die zu entlastende Frachtmenge wird reduziert.

Preisentwicklung während einer Verkaufsrunde

Während einer Verkaufsrunde passen sich die einzelnen Preise an. Es ist mit einem Handeln der Agenten vergleichbar. Dies geschieht in Abhängigkeit davon, ob ein Verkäufer verkaufen durfte oder nicht. Verkäufer, die in der letzten Runde nicht verkaufen durften, verringern ihren Preis für die nächste Verkaufsrunde um einen Verringerungsbetrag. Der erfolgreiche Verkäufer behält seinen alten Preis bei. Somit nähern sich die beim Verkauf unterlegenen Verkäufer langsam dem Preis des günstigsten Verkäufers an. Abbildung 29 veranschaulicht die Preisbestimmung am Ende einer Verkaufsrunde.

Der neue Rundenpreis ($RP_i(r)$) für die unterlegenen Verkäufer berechnet sich nach folgender Formel:

$$RP_i(r) = RP_i(r-1) - VB_i, \quad r = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (10)$$

VB_i := Verringerungsbetrag von Becken i

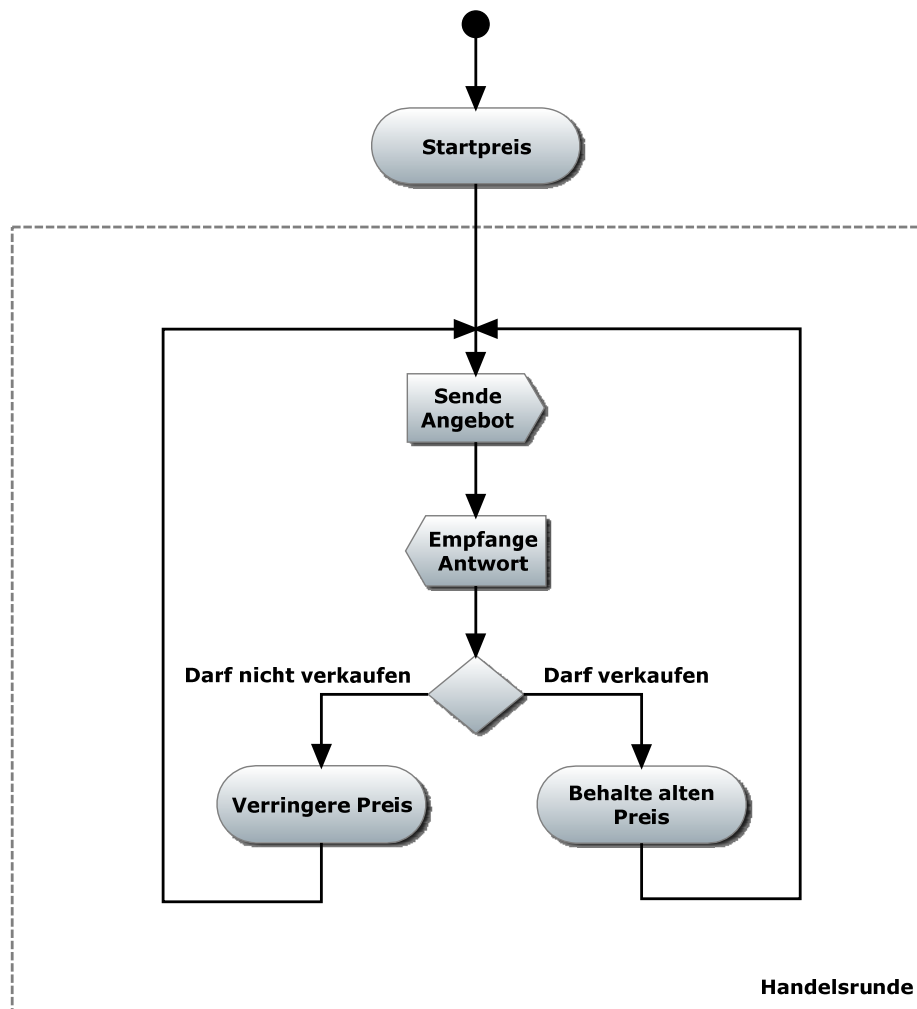


Abbildung 29: Preisänderung eines Verkäufers während einer Verkaufsrunde

Der Verringerungsbetrag VB hat einen großen Einfluss darauf wie schnell sich die Verkäufer im Preis annähern. Abbildung 30 zeigt die Preisentwicklung in zwei Handelsphasen (dargestellt ist ein Ausschnitt der Preisinformation der gesendeten Nachrichten). Die Verkäufer beginnen die Handelsphase mit unterschiedlichen Startpreisen. Man erkennt, dass Verkäufer 2 über mehrere Verkaufsrunden der billigste Anbieter ist. Die anderen Verkäufer verringern ihren Verkaufspreis, um selber verkaufen zu dürfen. Haben sich die Verkäufer auf einen Preis angenähert ergibt sich, dass die Zuschläge sich abwechselnd auf die einzelnen Becken verteilen und der Zuschlagspreis sich kontinuierlich verringert. Die Verkaufsgebote eines Verkäufers enden (Preis geht auf 0), sobald er keine Ware mehr verkaufen kann. Dies kann in zwei Fällen passieren:

1. Es ist keine Ware mehr im System vorhanden (Ende des Regenerereignisses).
2. Es kann keine Ware aufgrund der Transportbeschränkungen (Constraints, Conveyance) mehr verkauft werden.

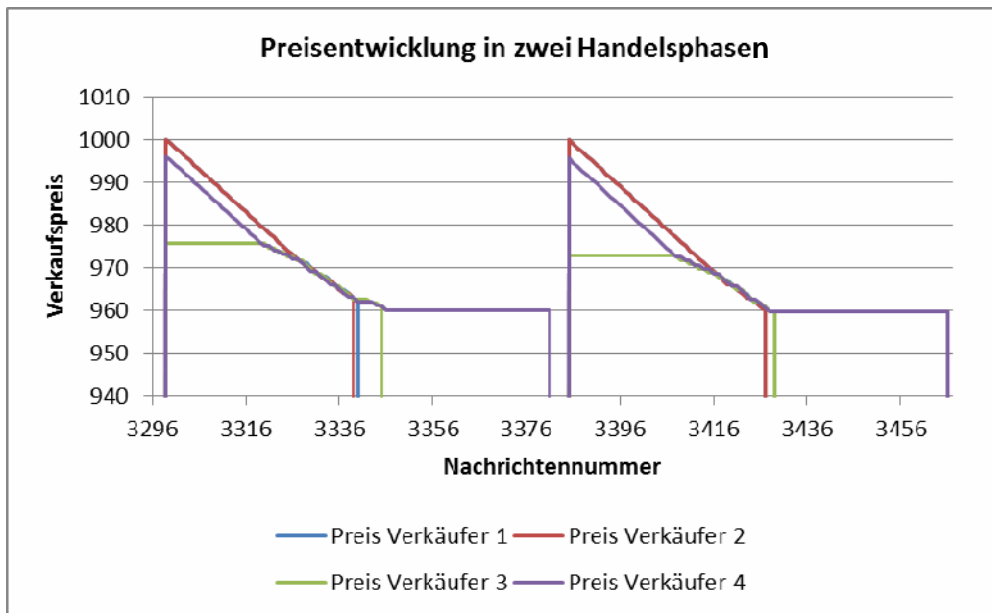


Abbildung 30: Preisentwicklung in zwei Handelsphasen

7.4.5.2 Ablauf einer Handelsrunde

Das Handelssystem basiert auf dem Zusammenspiel vieler einzelner Teilnehmer. Ihr Zusammenwirken (oder vielmehr ihre Kooperation und ihre Konkurrenz) bestimmt das Verhalten des Regelungssystems. Grundsätzlich kann der gesamte Handelsablauf grob in die folgenden Phasen eingestuft werden (vgl. Abbildung 31).

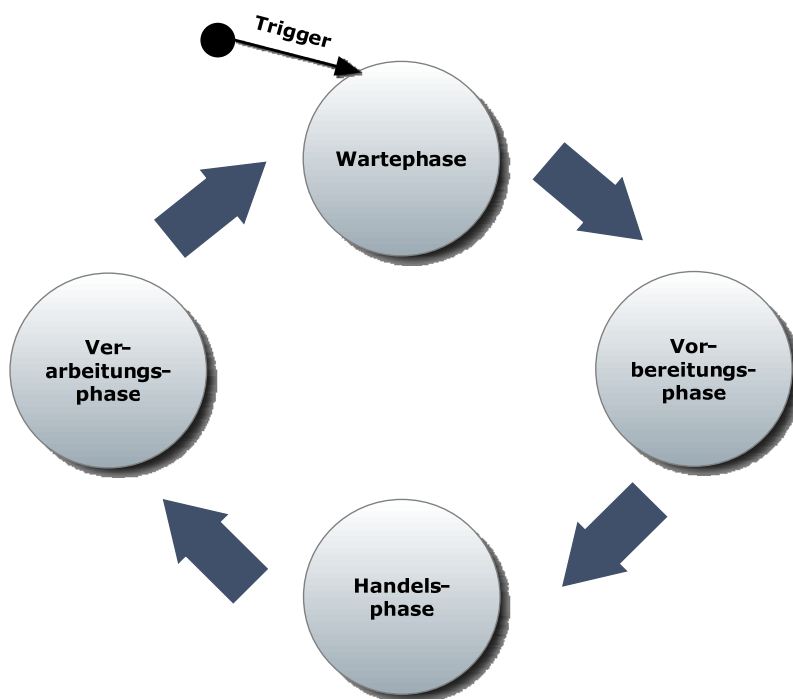


Abbildung 31: Handelsablauf

Wartephase

Im Grundzustand wartet das System auf die erneute Ausführung. Es erfolgt keine Aktion, die einzelnen Teilnehmer sind inaktiv und warten. Durch einen externen Impuls wird das System aktiviert und geht in den Vorbereitungsphase.

Vorbereitungsphase

In diesem Zustand bereiten sich die einzelnen Teilnehmer auf die Handelsphase vor, indem sie Informationen über ihre Umwelt sammeln und interpretieren. Das bedeutet z. B., dass Agenten Informationen über ihre zugewiesenen RÜB abfragen und entsprechend vorverarbeiten oder Informationen an andere Agenten weitergeleitet werden. Eine Vorverarbeitung ist z. B. die Bestimmung eines Startpreises. Sind alle Teilnehmer bereit, geht das System in die Handelsphase.

Handelsphase

Hier erfolgt der eigentliche Ablauf des Handels. Dies geschieht in Verkaufsrunden, in denen die Verkäufer ihre Waren dem Zwischenhändler anbieten und verkaufen können. Der Zwischenhändler kontrolliert die Handelsphase und bestimmt, welcher Verkäufer verkaufen darf. Die Handelsphase wird beendet, wenn entweder keine Waren mehr zum Verkauf angeboten werden oder die Ankaufsmenge erreicht wurde. Ist der Verkaufszyklus beendet, geht das System in die Verarbeitungsphase über.

Verarbeitungsphase

In diesem Zustand werden die Resultate von den einzelnen Teilnehmern - entsprechend ihrer Aufgabe - verarbeitet. Hier werden z. B. aus Verkaufsmengen und Durchleitungen Stellgrößen berechnet und an die RÜB gesendet. Wurden alle Resultate verarbeitet und an die entsprechenden RÜB gesendet, kehrt das System wieder in den Wartezustand zurück.

Der gesamte Ablauf des Handelssystems wird neu gestartet, wenn neue Stellwerte für die Regelung generiert werden sollen.

7.5 Entwicklung der Frachtkomponente des PSS

Neben der hydraulischen Betrachtung und Optimierung von Kanalnetz und Kläranlage wurde für das neue Prozesssteuerungssystem entsprechend des Projektantrags auch eine **Frachtkomponente** berücksichtigt. Ziel des Frachtreglers ist es, den Kläranlagenzulauf im Trockenwetterfall bezogen auf die Fracht zu vergleichmäßigen. Weiterhin sollen sogenannte Havariefälle (industrielle Einleitungen mit deutlich erhöhter Fracht) erkannt und die Kläranlage durch gezielte Maßnahmen im Kanalnetz geschützt werden.

Einschränkend ist darauf hinzuweisen, dass das Regelungspotential einer Frachtregelung nach zwischenzeitlich gewonnenen Erfahrungen des Projektpartners FH Köln nur wenige Prozent von dem der hydraulischen Regelung ausmacht, weil die verfügbaren Speichervolumina im Regulationsfall meist schon durch die hydraulische Regelung weitgehend ausgelastet sind. Eine Frachtregelung ist daher im Wesentlichen für den Trockenwetterfall relevant, wenn ausreichende Volumina zur Pufferung von Frachtspitzen zur Verfügung stehen.

Zunächst war angedacht, die Frachtregelung vollständig mit im Agentensystem zu implementieren. Während der Entwicklung des Agentensystems und aufgrund der Analyse der teilweise schwierig sicherzustellenden Konzentrationsmessungen (siehe Kapitel 9.1.1 zur Bewertung der technischen Umsetzung) stellte sich heraus, dass eine vollständige Einbindung der Frachtkomponente wegen wiederkehrender Unsicherheiten bei den Messdaten zu einer Verschlechterung des allgemeinen Reglerverhaltens geführt hätte. Daher wurde der Frachtregler von der Entwicklung des eigentlichen Agentensystem teilweise entkoppelt und erst in einem zweiten Schritt implementiert.

Dies hat auch hinsichtlich des Projektziels "Übertragbarkeit auf andere Kanalnetze" Vorteile gegenüber der ursprünglichen Variante, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass bei anderen Kanalnetzen eine ähnlich umfangreiche Ausstattung an Messtechnik vorhanden ist. Allerdings bestehen oftmals grundsätzliche Aussagen zur allgemeinen Belastungssituation von Teileinzugsgebieten und den entsprechenden Regenbecken.

Daher findet im Agentensystem die Frachtkomponente in Form von Gewichtungen der einzelnen Regenbecken Beachtung - die eigentlichen Messwerte der Konzentrationen gehen also nur indirekt in das Agentensystem ein. Ein Becken welches beispielsweise aufgrund industrieller Einleitungen als höher belastet eingestuft ist, würde dementsprechend eine höhere Gewichtung bekommen als ein Becken mit rein kommunalem Zulauf.

Während eines Niederschlagsereignisses ist der Frachtregler dem hydraulischen Regler (Agentensystem) untergeordnet. Nur bei freien Speichervolumen bekommt der Frachtregler die Freigabe, diese Volumina zur frachtmäßigen Vergleichmäßigung des Kläranlagenzulaufs zu nutzen.

Auf Grundlage der beschriebenen Randbedingungen wurde ein separater Frachtregler entwickelt, in dem die im Einzugsgebiet und auf der Kläranlage installierten Konzentrationsmessungen berücksichtigt werden.

7.5.1 Verfügbare Eingangsdaten und Analyse der Messwerte

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden an ausgewählten Punkten Messungen zur Bestimmung der Frachtbelastung installiert. Dabei handelt es sich um folgende Messungen:

- | | |
|--------------------------------|--|
| Station Elten: | - NH ₄ -N Messung |
| | - S::Can-Sonde (CSB, BSB, AFS, NO _x) |
| | - pH, LF und Temperatur |
| Station Rheinpromenade: | - S::Can-Sonde (CSB, BSB, AFS, NO _x) |
| | - pH, LF und Temperatur |
| Station Vorwerk: | - S::Can-Sonde (CSB, BSB, AFS, NO _x) |
| | - pH, LF und Temperatur |
| Zulauf Kläranlage: | - S::Can-Sonde (CSB, BSB, AFS, NO _x) |
| | - pH, LF und Temperatur |

Erster Schritt bei der Entwicklung des Frachtreglers war die Datenanalyse aller verfügbaren Messwerte. Vorrangiger Parameter zur Beurteilung der Frachtbelastung ist für alle Stationen der Messwert für CSB. Aufgrund der Abwasserzusammensetzung und Komplexität der Messeinrichtung kann es während des Betriebs zu Fehlmessungen und Ausfällen der Messapparatur kommen. Daher sollten die Parameter pH-Wert, Leitfähigkeit und Temperatur als zusätzliche Informationen in die Beurteilung einfließen. Bei der Datenanalyse stellte sich allerdings heraus, dass zwischen dem CSB-Messwert und den restlichen Parametern kein eindeutiger Zusammenhang besteht. So kann beispielsweise eine steigende bzw. fallende Leitfähigkeit durch Niederschläge verursacht worden sein - ein eindeutiger Zusammenhang mit einer erhöhten Fracht (bezogen auf CSB) kann nicht hergestellt werden.

Da sich während des Untersuchungszeitraums die Messeinrichtungen der Station Elten und Vorwerk außer Betrieb bzw. im Umbau befanden, konnten diese Stationen nicht zur Analyse herangezogen werden und wurden aktuell nicht im Frachtregler integriert. Eine Erweiterung ist in Zukunft möglich und vorgesehen.

Aus den genannten Gründen basiert der Frachtregler in der aktuellen Fassung nur auf den CSB-Messwerten der Station Rheinpromenade sowie der Messung im Zulauf der Kläranlage. Zur mengenmäßigen Beurteilung (Trockenwetter/Niederschlag) werden die Abflussmessung des Mischwasserpumpwerks Rheinpromenade sowie die Zulaufmessung der Kläranlage herangezogen.

7.5.2 Beschreibung des Frachtreglers

Schwerpunkt des Frachtreglers ist, den Kläranlagenzulauf im Trockenwetterfall, bezogen auf die Fracht, zu vergleichmäßigen. Weiterhin sollen sogenannte Havariefälle (industrielle Einleitungen mit deutlich erhöhter Fracht) erkannt und die Kläranlage durch gezielte Maßnahmen im Kanalnetz geschützt werden.

Zu diesem Zweck sollen freie Speicherkapazitäten im Kanalnetz genutzt werden, um Abwassermengen mit erhöhter Fracht zwischenzuspeichern. Durch die Verteilung der Messgeräte im Kanalnetz und Verfügbarkeit von freien Speicherkapazitäten können 3 Becken zur Zwischenspeicherung genutzt werden:

- RÜB Elten I,
- RKB Vorwerk,
- RRB Industriehafen.

Aufgrund der im vorstehenden Kapitel 7.5.1 beschriebenen Problematik der Messwerte im Bereich der Stationen Elten und Vorwerk, werden die entsprechenden Becken vorerst nicht hinzugezogen. In der aktuellen Version des Frachtreglers wird daher nur das RRB Industriehafen zur Vergleichmäßigung des Kläranlagenzulaufs genutzt.

Der Frachtregler ist dem hydraulischen Regler/Agentensystem untergeordnet, d. h. steigen die Zulaufmengen im Einzugsgebiet, werden die Soll-Werte des Frachtreglers durch die des Agentensystems ersetzt.

Der Frachtregler wurde als **Zustandsmaschine** definiert, wobei die Regeln innerhalb der Zustände bzw. die Übergänge der Zustände als einfache Fuzzy-Regler ausgelegt sind.

In der Abbildung 32 ist ein Schema der entwickelten Zustandsmaschine dargestellt.

Die Zustandsmaschine besteht aus vier Zuständen:

- Start,
- Einstau,
- Entleerung,
- Ausstieg.

Für jeden dieser Zustände sind Aktionen in Form von Regeln definiert. Ein Wechsel zwischen den Zuständen ist in alle Richtungen möglich, wobei dies in der Regel über Zwischenzustände (z. B. Start - Einstau) erfolgt.

Überblick der Zustände "Frachtreger Emmerich PSS"

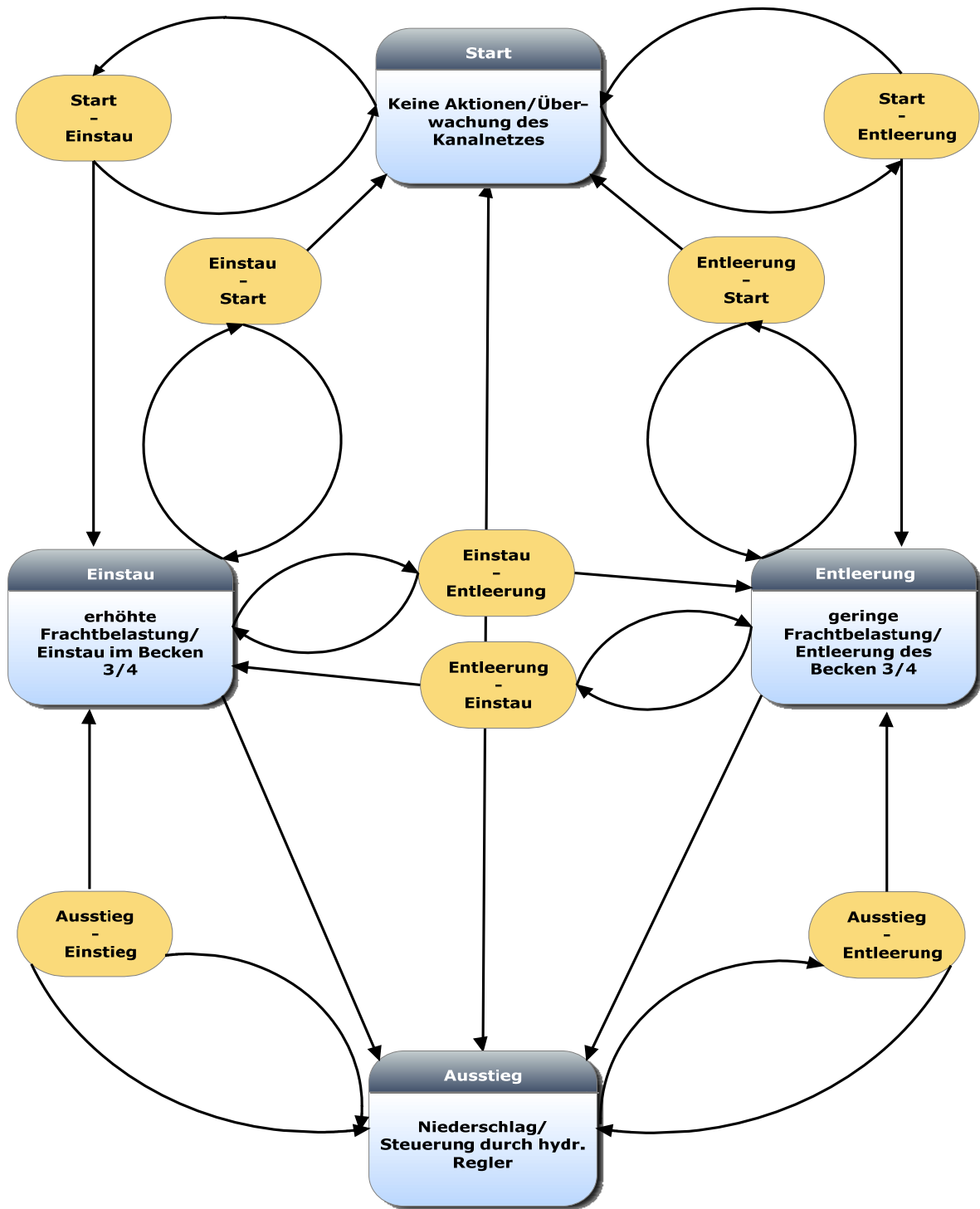


Abbildung 32: Übersicht der Zustände des Frachtregers

Diese Zwischenzustände sind notwendig, um unnötige Wechsel zwischen den Zuständen, verursacht durch kurzzeitige Messfehler (insbesondere im Bereich der CSB-Messungen), zu vermeiden. Erreichen die als Eingangsdaten definierten Messwerte einen Bereich, der den Wechsel in einen anderen Zustand notwendig macht, erfolgt eine Überprüfung der Messwerte hinsichtlich ihrer Plausibilität über einen festgelegten Zeitraum. Die Zwischenzustände können daher als Pufferzustände betrachtet werden, die während des Überprüfungszeitraums die Aktionen des Ausgangszustands beibehalten und erst nach der Freigabe bzw. erfolgreicher Plausibilitätsprüfung der Messwerte die Aktionen des Folgezustands freigeben. Im Folgenden werden die einzelnen Zustände, Zwischenzustände und Zustandswechsel, inklusive aller Aktionen, sowie Schwellen- und Soll-Werte erläutert.

Mess-, Soll- und Schwellenwerte

Um ein optimales Zusammenwirken der einzelnen Zustände zu garantieren ist es notwendig diese klar voneinander abzugrenzen. Zu diesem Zweck wurden für die Eingangsdaten verschiedene Schwell- und Grenzwerte definiert, welche an dieser Stelle aus Gründen der Übersicht aufgezählt werden.

- Q_R Ablaufmenge Pumpwerk Rheinpromenade (Messwert)
- Q_K Zulaufmenge Kläranlage (Messwert)
- Q_{Soll1} Soll-Wert 1 Durchfluss Überleitungsbauwerk (Soll-Wert)
 - RRB Industriehafen wird eingestaut
- Q_{Soll2} Soll-Wert 2 Durchfluss Überleitungsbauwerk (Soll-Wert)
 - Soll-Wert beträgt 0 l/s
- Q_{Entl} Soll-Wert Entleerung RRB Industriehafen (Soll-Wert)
 - Maximale Entleerungsmenge
- Q_{hydr} Soll-Wert hydraulischer Regler (Soll-Wert)
 - Steuerung erfolgt durch Agentensystem
- H_{In} Füllstand RRB Industriehafen (Messwert)
- CSB_R CSB-Konzentration Rheinpromenade (Messwert)
- CSB_K CSB-Konzentration Kläranlage (Messwert)
- SW_{Q_R} Schwellenwert Ablaufmenge Pumpwerk Rheinpromenade
 - Bei Überschreitung liegt Niederschlagsereignis vor
- SW_{Q_K} Schwellenwert Zulaufmenge Kläranlage
 - Bei Überschreitung liegt Niederschlagsereignis vor
- $SW_{H_{In1}}$ Unterer Schwellenwert Füllstand RRB Industriehafen
- $SW_{H_{In2}}$ Oberer Schwellenwert Füllstand RRB Industriehafen
 - Maximal erlaubtes Einstauvolumen für den Frachtreger - Verhinderung von Überstauereignisse bei einsetzendem Niederschlag; niedriger als zulässiges Speichervolumen des hydraulischen Reglers

- $SW_{H_{In3}}$ Füllstand RRB Industriehafen = 0 m
- $SW_{CSB_{R1}}$ Unterer Schwellenwert CSB-Konzentration Rheinpromenade
- $SW_{CSB_{R2}}$ Oberer Schwellenwert CSB-Konzentration Rheinpromenade
- $SW_{CSB_{K1}}$ Unterer Schwellenwert CSB-Konzentration Kläranlage
- $SW_{CSB_{K2}}$ Oberer Schwellenwert CSB-Konzentration Kläranlage

Zustand "Start":

Hierbei handelt es sich um den Ausgangszustand bzw. "Überwachungszustand". Die Belastungssituation von Kläranlage und Kanalnetz liegt im Bereich "Trockenwetter". Folgende Regeln gelten:

1. $Q_R < SW_{Q_R}$ und $Q_K < SW_{Q_K}$,
2. $CSB_R < SW_{CSB_{R1}}$ und $CSB_K < SW_{CSB_{K1}}$,
3. $H_{In} = SW_{H_{In3}}$.

Bei aktivem Zustand "Start" erfolgt lediglich eine Überwachung der Gesamtsituation - Aktionen werden nicht vorgenommen.

Zustand "Einstau":

Die Frachtbelastung aus dem Einzugsgebiet und/oder auf der Kläranlage ist erhöht. Bezogen auf die Zulaufmengen liegt Trockenwetter vor. Folgende Regeln gelten:

1. $Q_R < SW_{Q_R}$ und $CSB_R \geq SW_{CSB_{R2}}$ und $H_{In} \leq SW_{H_{In1}}$ dann Q_{Soll}
 - Am Ablauf des MWPW Rheinpromenade wird eine **sehr hohe** Ablaufkonzentration erkannt. Es soll ein Einstau im RRB Industriehafen erfolgen. Diese Regel tritt auch in Kraft, wenn die aktuelle Belastung der Kläranlage **nicht erhöht** ist die Belastungssituation der Kläranlage ist untergeordnet.
2. $Q_R < SW_{Q_R}$ und $CSB_R \geq SW_{CSB_{R1}}$ und $CSB_K \geq SW_{CSB_{K1}}$ und $H_{In} \leq SW_{H_{In1}}$ dann Q_{Soll}
 - Am Ablauf des MWPW Rheinpromenade sowie im Zulauf der Kläranlage wird eine **hohe** Frachtbelastung erkannt. Es soll ein Einstau im RRB Industriehafen erfolgen.
3. $Q_K < SW_{Q_K}$ und $CSB_K \geq SW_{CSB_{K2}}$ und $H_{In} \leq SW_{H_{In1}}$ dann Q_{Soll}
 - Im Zulauf der Kläranlage wird eine **sehr hohe** Frachtbelastung erkannt. Es soll ein Einstau im RRB Industriehafen erfolgen. Diese Regel tritt auch in Kraft, wenn die aktuelle Belastung im Ablauf des MWPW Rheinpromenade **nicht erhöht** ist - die Belastungssituation im Ablauf des MWPW Rheinpromenade ist untergeordnet.

4. $H_{In} \geq SW_{H_{In2}}$ dann Q_{Soll2}

- Durch den gezielten Einstau im RRB Industriehafen wird der **maximal zulässige Füllstand** im Becken des Frachtreglers erreicht. Ein weiteres Einstauen ist **nicht** zulässig. Die aktuelle frachtmäßige und hydraulische Belastungssituation von Kläranlage und Kanalnetz lässt **keinen Wechsel** in einen anderen Zustand (z. B. "Entleerung") zu - das gespeicherte Abwasser wird gezielt im RRB Industriehafen zwischengespeichert.

Zustand "Entleerung":

Dieser Zustand dient zur Entleerung des RRB Industriehafen, um das vorhandene Speichervolumen zum Einstau zukünftiger Niederschlagsereignisse und Frachtbelastungen nutzen zu können. Erreicht wird dieser Zustand bei Trockenwetter (bezogen auf die Zulaufsituation) und gleichzeitiger geringer Frachtbelastung. Folgende Regeln und Aktionen gelten:

1. $Q_R < SW_{Q_R}$ und $Q_K < SW_{Q_K}$ und $CSB_R < SW_{CSB_{R1}}$ und $CSB_K < SW_{CSB_{K2}}$ und $H_{In} > SW_{H_{In3}}$ dann Q_{Entl}

- Entsprechen die Zulaufmengen dem Trockenwetterzulauf, und weist die frachtmäßige Belastung keinen erhöhten Wert auf, soll das RRB Industriehafen schnellstmöglich entleert werden, um das komplette Speichervolumen nachfolgenden Ereignissen (Niederschlag oder Frachtbelastung) vorzuhalten.

Zustand "Ausstieg":

Der Schwerpunkt bzw. Einsatzbereich des Frachtreglers liegt aus hydraulischer Sicht nur im Bereich des Trockenwetters. Die Steuerung der einzelnen Pumpwerke im Einzugsgebiet während eines Niederschlagsereignisses erfolgt weiterhin durch das Agentensystem. Wird dieser Zustand erreicht, kann die ausgelöste Aktion des Zustands mit einem Schalter verglichen werden, der zwischen den Soll-Werten des Frachtreglers und denen des Agentensystems wechselt. "Ausstieg" bedeutet in diesem Fall also nicht, dass der Frachtreger komplett deaktiviert wird - ein Rückwechsel in die Zustände des Frachtreglers ist, vorausgesetzt es liegt bezogen auf die Zulaufmengen Trockenwetter vor, möglich. Die Regel dazu wurde wie folgt definiert:

1. $Q_R > SW_{Q_R}$ oder $Q_K > SW_{Q_K}$ dann Q_{hydr}

Der Wechsel von den Zuständen "Einstau" und "Entleerung" in den Zustand "Ausstieg" erfolgt nicht über Zwischenzustände. Dies ist sinnvoll, da bei einsetzendem Niederschlag durch das Zusammenspiel der Pumpen im Einzugsgebiet innerhalb weniger Minuten ein hydraulischer Stoß (dreifach Trockenwettermenge) auf der Kläranlage zu verzeichnen wäre. Durch die

zeitliche Verzögerung eines Zwischenzustands wären diese hydraulischen Stöße nicht optimal zu vermeiden bzw. könnten nicht optimal minimiert werden. Bei dieser Herangehensweise wird davon ausgegangen, dass die im Kanalnetz installierten Durchflussmessgeräte eine sehr hohe Verfügbarkeit und Messgenauigkeit haben und auf eine Plausibilitätsprüfung verzichtet werden kann. Wartung wird vorausgesetzt.

Zwischenzustände:

Alle Zwischenzustände sind identisch aufgebaut und definiert. In den Zwischenzuständen werden alle für den Zustandswechsel definierten Messgrößen über einen Zeitraum von 10 Minuten hinsichtlich ihrer Plausibilität überprüft. So soll verhindert werden, dass Fehlmessungen (insbesondere beim Messwert CSB, z. B. Überschreitung des Messwerts, wie die in der Realität mehrfach aufgetretenen Werte > 2.000 mg CSB/l) oder Ausfälle von Messgeräten zu unnötigen und falschen Zustandsänderungen führen. Sind nach dem 10-minütigen Überprüfungszeitraum die Messwerte als plausibel gekennzeichnet und befinden sie sich in Wertebereichen, die eine Zustandsänderung erforderlich machen, erfolgt letztendlich der Wechsel in den entsprechenden Zustand. Während der Überprüfung bleiben die Aktionen des Ausgangszustands aktiv. Werden nach dem Überprüfungszeitraum die Messwerte als nicht plausibel gekennzeichnet bzw. ein Zustandswechsel ist nicht mehr nötig, wird dementsprechend der Ausgangszustand beibehalten.

Sicherheitsaspekte:

Einstau und die Entleerung (auch bei Erweiterung um die Becken Elten und Vorwerk) im Rahmen des Frachtreglers basieren auf den bekannten Mechanismen des hydraulischen Reglers. Kommunikations- und Regelstreckenüberwachung sind ebenso eingebunden wie die übergeordnete Rolle der lokalen Steuerungen der Außenstationen. Aus diesem Grund sind keine weiteren Maßnahmen und Überlegungen im Bereich des PLS und der Außenstationen notwendig.

Die Unterscheidung bzw. das Umschalten der Soll-Wertquellen (Frachtreger oder hydraulischer Regler) erfolgt durch die Reglersoftware der Fachhochschule Köln.

Interne Sicherheitsaspekte/-maßnahmen:

Neben den im vorherigen Kapitel beschriebenen Zwischenzuständen und der damit verbundenen Messwertüberwachung ist die Reduzierung des verfügbaren Speichervolumens eine weitere Sicherheitsmaßnahme. Ist der Frachtreger aktiv, so stehen diesem nur begrenzte Speichervolumen zur Verfügung. Für das RRB Industriehafen wurde z. B. das für den Frachtreger verfügbare Speichervolumen im Vergleich zum hydraulischen Regler um 50 % reduziert.

8 Umsetzung des Prozesssteuerungssystems in Emmerich

8.1 Einbindung des Kanalnetzsteuerungssystems in vorhandene Infrastruktur und zentrales Prozessleitsystem

Die im Folgenden beschriebene technische Einbindung des PSS in die vorhandene Infrastruktur umfasst sowohl den hydraulischen Anteil als auch die Frachtkomponente.

Das neu entwickelte Kanalnetzsteuerungssystem mit allen dazugehörigen Komponenten ist auf einem RAID-Server installiert worden. Der Vorteil einer Serverlösung gegenüber konventionellen PC-Systemen ist die deutlich höhere Ausfallsicherheit und die im Falle einer Störung automatisierte Systemwiederherstellung.

Über Ethernet und die sogenannte OPC-Schnittstelle (Open Process Control), über welche die komplette Kommunikation des Prozesssteuerungssystems mit dem Prozessleitsystem und den Außenstationen läuft, ist dieser Server direkt mit dem Leitsystem verbunden.

Durch diese Konfiguration stellt das Prozesssteuerungssystem eine externe Lösung dar. Daraus ergeben sich folgende Vorteile gegenüber einer direkten Implementierung mit speicherprogrammierbarer Steuerung (SPS) und Prozessleitsystem (PLS):

- Bei Störungen und/oder Defekten gibt es eine Rückfallebene,
- während der Optimierungsphase und während des laufenden Betriebs sind ohne größeren Aufwand Anpassungen und Wartungen möglich,
- alle Anwendungen basieren auf Standardsoftwarelösungen (MS Windows, MS Office usw.) und sind daher intuitiv zu bedienen,
- es gibt eine klare Trennung zwischen den einzelnen Komponenten (Prozesssteuerungssystem - PLS - SPS - Außenstation).

Die Entwicklung und Optimierung des Softwareagentensystems bzw. Kanalnetzsteuerungssystems erfolgte mit Hilfe der Softwarekombination MATLAB/Simba. Da diese Softwarekomponenten lediglich als Entwicklungsumgebung dienen und nicht für den regelungstechnischen Einsatz in der Praxis geeignet sind, erfolgte eine Implementierung des Agentensystems, inklusive aller Randbedingungen, in der Software "IPCoin". Diese Software stellt eine Eigenentwicklung der Fachhochschule Köln dar und konnte in der Vergangenheit durch vielfältige Einsätze im Bereich der Automatisierung im Abwasserbereich ihre Praxistauglichkeit nachweisen. Die Software ist im "Drag & Drop"-Verfahren aufgebaut und kann intuitiv bedient werden. So können die wichtigsten Einstellungen des Agentensystems, wie z. B. Beckengrößen, Gewichtungen und Zielstellungen vom Endnutzer, selbstständig angepasst werden. Ne-

ben dem eigentlichen Prozesssteuerungssystem sind auf dem Prozesssteuerungsserver eine Datenbank sowie eine eigene Visualisierung installiert. Die Datenbank hat dabei zwei grundsätzliche Aufgabenstellungen. Zum einen dient dies zur Erfassung und Archivierung aller relevanten Messdaten und reglerspezifischen Größen (Stellgrößen, interne Überwachungswerte usw.). Bei der zweiten Aufgabenstellung der Datenbank handelt es sich um die Umsetzung der Lernfähigkeit und Selbstadaption des Agentensystems (siehe Kapitel 7.4).

8.2 Datenübertragung und Kommunikationsüberwachung

Um die ständige Funktionsbereitschaft der entsprechenden Außenstationen und des Prozesssteuerungssystems sicherzustellen, wurden zwei Sicherheitsmechanismen eingeführt.

- **Kommunikationsüberwachung:** Stellt sicher, dass die Datenübertragung zwischen Außenstation und Prozesssteuerungssystem vorhanden und funktionsfähig ist.
- **Regelstreckenüberwachung:** Stellt sicher, dass die Regelstrecken der entsprechenden Außenstationen bzw. die Bestandteile dieser Regelstrecke funktionsfähig sind.

In der folgenden Grafik ist schematisch dargestellt, wie beide Sicherheitsmechanismen funktionieren (für alle Außenstationen identisch).

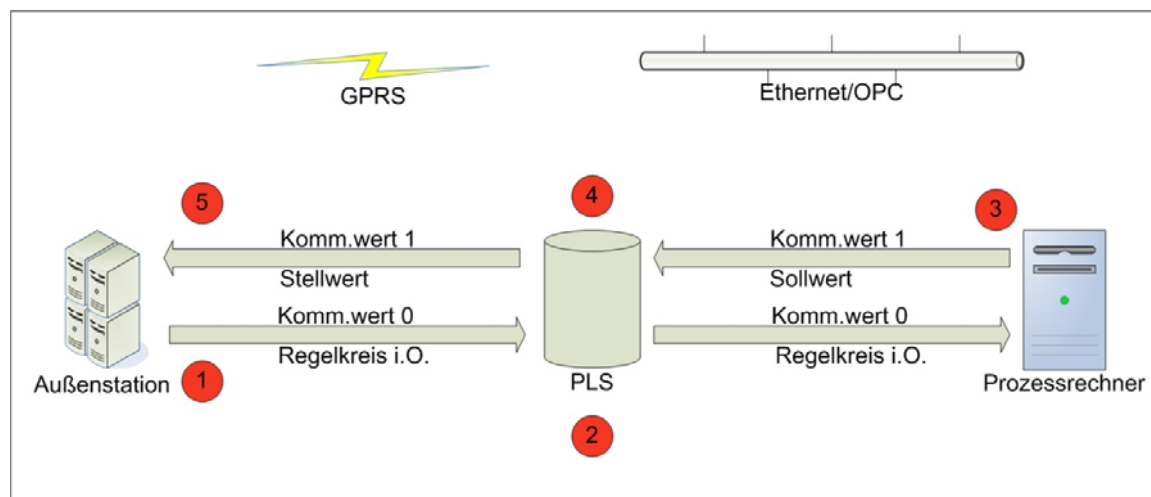


Abbildung 33: Schema Kommunikationsüberwachung

1. In den SPS-Programmen der Außenstationen werden alle relevanten Bestandteile der hydraulischen Regelstrecken (z. B. Pumpen, Schieber, Durchflussmessgeräte) überprüft (Störmeldung vorhanden/nicht vorhanden). Liegen keine Störungen vor, gilt die Regelstrecke als bereit. Zusammen mit der Bereitmeldung der Regelstrecke übermit-

telt die Außenstation dem Leitsystem (PLS) einen Kommunikationswert, das sogenannte Livebit. Für die Außenstationen hat dieses Livebit den Wert 0.

2. Im Leitsystem werden diese beiden Informationen in einer vorher festgelegten Adresse (die sogenannten OPC-Items) gespeichert.
3. Die auf dem Prozessrechner installierten Projekte des Prozesssteuerungssystems lesen diese OPC-Items aus. Da der Wert des Livebits 0 beträgt, gilt für das Prozesssteuerungssystem der Kommunikationsweg zur Außenstation als vorhanden und funktionsfähig. Durch das Prozesssteuerungssystem wird daher der Wert des Livebit auf 1 gesetzt. Da auch die Regelstrecke als *bereit* definiert ist, wird zusammen mit dem Livebit ein Soll-Wert für die entsprechende Außenstation an das Leitsystem gesendet.
4. Im Leitsystem wird der Wert des Livebits von 0 (kam von der Außenstation) mit dem Wert 1 (vom Prozesssteuerungssystem) überschrieben. Gleichzeitig liegt dem Leitsystem die Bereitmeldung der Regelstrecke vor. Da alle Kriterien erfüllt sind, wird vom Leitsystem der Soll-Wert freigegeben und zusammen mit dem Livebit (Wert 1) an die entsprechende Außenstation weitergeleitet.
5. In der SPS der Außenstation wird der Wert des Livebits auf 1 gesetzt, womit die Außenstation über die Funktionsfähigkeit von PLS und Prozesssteuerungssystem "informiert" ist. Da auch die Regelstrecke als *bereit* gilt, wird der vom Prozesssteuerungssystem berechnete Soll-Wert (Durchflüsse in m³/h) in Stellwerte (z. B. Drehzahl von Pumpen) umgewandelt.

Dieser Überwachungsalgorithmus wird einmal in der Minute durchgeführt. Fällt bei einer Außenstation die Kommunikation und/oder die Regelstrecke aus, wird diese Station aus dem Gesamtsystem entnommen (automatische Umschaltung auf lokale Steuerung) und nicht mehr durch das Prozesssteuerungssystem geregelt. Da durch die Art der Datenübertragung (GPRS oder auch bei DSL-Verbindungen) es zu kurzen Ausfällen der Kommunikation kommen kann (z. B. Zwangstrennung des Providers), erfolgt eine automatische Umschaltung auf lokale Steuerung erst nach einer dauerhaften Störung von mehr als 10 Minuten.

Eine Besonderheit stellt die Station 83 "RRB Industriehafen" dar. Diese Station verfügt über zwei Regelstrecken ("Befüllen" und "Entleeren"), die getrennt voneinander überwacht werden.

8.3 Interne Sicherheitsmechanismen des Prozesssteuerungssystems

Neben den übergeordneten Sicherheitsmaßnahmen auf Seiten des Leitsystems verfügt auch das Prozesssteuerungssystem selber über vier interne Sicherheitsmechanismen, welche für die hydraulische und die frachtmäßige Komponente gilt.

1. Überwachung des Füllstands:

Intern wird die gespeicherte Wassermenge über den Zulauf ins Becken bzw. über die Differenz zwischen Zulauf und Ablauf einer Pumpstation berechnet. Dieser Wert wird intern als zusätzlicher "Messwert" genutzt. Sollte eine Füllstandsmessung fehlerhafte Werte liefern, die nicht durch die Regelstreckenüberwachung abgefangen werden, steht somit ein zusätzlicher Sicherheitsmechanismus zur Verfügung.

2. Festlegung eines Speicherziels:

Um Entlastungsereignisse zu vermeiden, wurde für jedes Becken ein Speicherziel definiert. Wird dieses Speicherziel während des Einstauvorgangs erreicht, wird von dem Prozesssteuerungssystem für die entsprechende Station der max. Soll-Wert (max. Förderleistung der Pumpstation) vorgegeben.

3. Überwachung der Niederschlagsintensität:

Diese Überwachung stellt einen weiteren Sicherheitsmechanismus dar, mit dem Entlastungen vermieden bzw. die Entlastungsmengen verringert werden sollen. Auf Basis von Niederschlagsreihen der Station Emmerich (KOSTRA-Regenatlas) erfolgt eine ständige Überwachung des aktuellen Niederschlagsereignisses hinsichtlich der Wiederkehrzeit. Erreicht ein Niederschlagsereignis während der Überwachung die Niederschlagsintensität einer bestimmten Wiederkehrzeit (aktuell 5 Jahre), wird durch das Prozesssteuerungssystem für alle Stationen der max. Soll-Wert vorgegeben.

4. Überwachung der Regelstreckenkomponenten und der Kommunikation

Alle Komponenten wie Schieber, Pumpen oder Messgeräte, welche innerhalb der Regelstrecke sicherheitsrelevante Bedeutungen haben, unterliegen einer SPS-seitigen Überprüfung. Fällt eine dieser Komponenten aus oder weist fehlerhafte Messdaten auf, so wird die entsprechende Außenstation für alle weiteren regelungstechnischen Aufgaben aus dem System genommen - eine Umschaltung auf den lokalen Betrieb, also den Grundzustand erfolgt. Die restlichen Stationen, sofern keine Störung anliegt, bleiben davon unberührt.

9 Technische Bewertung des Prozesssteuerungssystems

9.1 Bewertung der technischen Umsetzung

9.1.1 Messtechnik

Grundvoraussetzung für einen Steuerungsansatz, wie er im Forschungsprojekt umgesetzt wurde, ist eine umfangreiche Ausstattung an Messtechnik in Kanalnetz und Kläranlage. Dabei muss grundsätzlich zwischen der Erfassung hydraulischer Parameter (vor allem Durchfluss) und der Erfassung von Frachtparametern (wie CSB- und Stickstoffbelastung) unterschieden werden.

Die Messung der hydraulischen Parameter lässt sich oftmals mit vergleichsweise geringem Aufwand realisieren, da **Durchflussmessgeräte** technisch ausgereift und teilweise sogar schon vorhanden sind. Dies bestätigte sich auch im vorliegenden Vorhaben. Der Betrieb der Durchfluss- und Niederschlagsmessgeräte stellte keine wesentlichen Probleme dar, nachhaltige Ausfälle und Störungen waren kaum vorhanden.

Ganz anders stellt sich die Erfassung von Frachtparametern über **Konzentrationsmessungen im Kanalnetz** dar, die in der Praxis noch große Herausforderungen birgt. Dies hat verschiedene Gründe:

- sehr hohe Investitionsvolumen,
- kosten- und zeitintensive Wartung,
- je nach Abwasserzusammensetzung oftmals ungenaue Messergebnisse,
- insbesondere bei hohem Anteil industrieller Abwässer oftmals hohe Ausfallquoten.

Diese Erfahrungen konnten auch im Verlauf des Forschungsprojektes gemacht werden. Es zeigte sich vor allem, dass ein hoher Material- und Personalaufwand nötig ist, um akzeptable Messgenauigkeit und Verfügbarkeit der Frachtmessungen zu erreichen.

Trotz des Aufwandes konnte eine ausreichende Zuverlässigkeit der Messungen insbesondere bei den CSB-Messungen mittels optischer Sensoren nicht kontinuierlich sichergestellt werden. Grundsätzliche Ursache dafür ist die Abwasserzusammensetzung im Kanalnetz Emmerich mit einem hohen Anteil an industriellen Einleitern, der die Verschmutzungsvorgänge der Sensoren und vor allem der Probenaufbereitung (Pumpen, Filter usw.) stark intensiviert hat. Die damit verbundenen Verstopfungs- und Verzopfungsvorgänge machten eine regelmäßige, manuelle Grundreinigung der Messeinrichtungen notwendig. Dies lässt sich trotz im Betriebsablauf vorgesehener regelmäßiger Reinigungsrouninen aufgrund der räumli-

chen Verteilung über das Entwässerungsnetz und bei Störfällen oder hoher Auslastung des Personals nicht immer zeitnah sicherstellen.

Die Erfahrungen aus dem Vorhaben zeigen auch, dass z. B. die CSB-Messung mit den angewendeten, handelsüblichen optischen Sonden aufgrund partikulärer Bestandteile und Tenside im Abwasser nicht zuverlässig ist. Ähnliches gilt für die NH_4 -Messung, vor allem aufgrund der Tensidbelastung. Mittlerweile räumen auch die Sonden-Hersteller die Probleme beim Einsatz im Abwasserbereich ein. Es besteht noch weiterer Entwicklungsbedarf auf Herstellerseite im Hinblick auf zuverlässige und wirtschaftliche Sondenlösungen für den Rohabwasserbereich.

Ein weiteres Problem stellt der Messbereich bzw. das Messverfahren dieser Geräte dar. Bei starken Schwankungen der Abwasserzusammensetzung aufgrund von Industrieabwassereinleitungen kann es vorkommen, dass die Kalibrierung der Messgeräte nicht mehr mit der Abwassermatrix übereinstimmt und die Messwerte unplausibel werden. Sehr hohe, stoßweise Belastungen oberhalb des gerätebedingten Messwertbereichs können teilweise nicht erfasst werden, da die Geräte bei Messwertüberschreitungen lediglich Fehlermeldungen oder voreingestellte Werte (z. B. Nullwerte) absetzen, die von dem angeschlossenen Prozesssteuersystem nicht eindeutig identifiziert werden können.

Die Entwicklung der separaten Messbehälter mit automatisiertem Reinigungssystem für die spektrometrischen Messungen (siehe Kapitel 5.5.4) konnte zwar eine erhebliche Verbesserung der Zustände bewirken, allerdings kommt es immer noch zu unplausiblen Messwerten bzw. durch Veränderung der Abwasserzusammensetzung verursachten Messbereichsüberschreitungen.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde davon abgesehen, die Messwerte der Frachtkomponenten als Absolutwert in das Agentensystem einfließen zu lassen, da dies zu einer Verschlechterung des Regelverhaltens geführt hätte. Die Messwert-Tendenz, die sich aus den Messergebnissen ergibt, stellte sich allerdings als so zuverlässig heraus, dass eine Nutzung dieser Werte im Bereich des Frachtreglers vertretbar ist.

Eine pauschale Übertragung der Probleme und Erkenntnisse zur Messtechnik ist aufgrund der spezifischen Randbedingungen, z. B. der Abwasserzusammensetzung, nicht möglich. Für Kanalnetze mit rein kommunalem Abwasser kann der Aufwand durchaus geringer sein, als für das Kanalnetz Emmerich. Aufgrund der Projekterfahrungen ist jedoch für eine dauerhaft zuverlässige Bestimmung von Konzentrationsparametern im Rohabwasser ein hoher materiel-ler und personeller Betriebs- und Wartungsaufwand zu berücksichtigen.

Für das entwickelte Prozesssteuerungssystem ist der aktuelle Zustand, bedingt durch die Anpassung der Regelstrategien, ausreichend gut, um einen praxistauglichen Betrieb zu gewährleisten. Legt man allerdings die ursprüngliche Planung zugrunde, konnten diese im Bereich der Messung von Frachtkomponenten nur bedingt umgesetzt werden.

9.1.2 Datenübertragung

Die Umsetzung der Datenübertragung zwischen Außenstationen und zentralem PLS auf der Kläranlage mittels GPRS-Technik stellte zu Projektbeginn, bezogen auf Investitions- und Betriebskosten, die kostengünstigste Alternative zu Standleitungen und DSL-Anschlüssen dar. Allerdings kam es im Einzugsgebiet des Kanalnetzes Emmerich vermehrt zu Verbindungsunterbrechungen (vor allem während Niederschlagsereignissen), die dazu führten, dass das Agentensystem nicht mit den Außenstationen kommunizieren konnte und dementsprechend keine Steuerung durch das Agentensystem erfolgte. Diese Problematik konnte auch durch Einsatz leistungsfähiger GPRS-Antennen nicht vollständig behoben werden. Deshalb wurden die stör anfälligsten Außenstationen mittels DSL-Anschlüssen an das PLS angebunden. Dies bedeutete zusätzliche Investitionskosten, die Verbindungsausfälle wurden aber auf ein Minimum reduziert.

Die Umsetzung der Datenübertragung mittels GPRS oder ähnlicher Technik bietet sich grundsätzlich vor allem für Außenstationen an, die aufgrund ihrer Lage nicht an die öffentliche Infrastruktur angebunden sind (Verlegung von Standleitungen bzw. DSL-Anschlüssen ist zu kostenintensiv). Bei Stationen, die aber über die entsprechende Infrastruktur oder Anschlussmöglichkeit verfügen, sollte jedoch geprüft werden, inwieweit die Umsetzung über DSL oder Standleitung möglich ist, da diese Verbindung nachweislich über eine höhere Verfügbarkeit verfügen.

In den letzten Jahren sind zudem die Entgelte für DSL-Anschlüsse so stark gesunken, dass sie sich den Tarifen für die GPRS-Übertragung nahezu angeglichen haben.

9.1.3 Kommunikations- und Regelstreckenüberwachung

Die in Kapitel 8.2 beschriebene Kommunikations- und Regelstreckenüberwachung stellt einen sehr wichtigen Sicherheitsmechanismus innerhalb des Prozesssteuerungssystems dar.

So besteht beispielsweise die Gefahr, dass bei einem Kommunikationsabbruch zu einer Außenstation während eines Niederschlagsereignisses ein vom Agentensystem vorgegebener Soll-Wert über einen längeren Zeitraum gehalten wird. Handelt es sich dabei z. B. um einen

sehr niedrigen Soll-Wert, da das entsprechende Becken aufgrund freier Kapazitäten eingestaut werden sollte, kann ein Entlastungsereignis in den Vorfluter oder Überstau im Kanalnetz verursacht werden. Diese Störfälle können mit Hilfe der entwickelten Sicherheitsmechanismen Kommunikations- und Regelstreckenüberwachung sicher ausgeschlossen werden.

Anfänglich kam es zu zahlreichen Problemen mit der Kommunikationsüberwachung, verursacht durch Verbindungsstörungen im Bereich der GPRS-Datenübertragung (siehe vorstehendes Kapitel 9.1.2), die jeweils zu einem Abbruch der Regelung führte. Nach weitgehender Behebung der Kommunikationsprobleme und Einführung der Prüfung, ob eine dauerhafte Störung von mehreren Minuten vorliegt, sowie Routinen zum automatischen Wiederanlauf der Systeme nach Unterbrechungen, agiert der Sicherheitsmechanismus weitgehend fehlerfrei und effektiv.

Die Regelstreckenüberwachung, die sicherstellt, dass plausible Messwerte vorliegen, war im Gegensatz zur Kommunikationsüberwachung größtenteils unproblematisch umsetzbar.

Fazit

Die beiden Mechanismen sind bei dieser Art von Steuerung von enormer Wichtigkeit. Bei der Umsetzung muss aber zwingend eine ausführliche Voranalyse stattfinden, bei der alle Randbedingungen beachtet werden. Es muss beachtet werden, dass bei dem Ausfall einer Einzelkomponente die ganze Außenstation nicht mehr für den Regelalgorithmus verfügbar wäre.

Es muss daher eine detailgenaue Abwägung stattfinden, welche Einzelkomponenten zwingend erforderlich sind, um die Regelstrecke aufrechtzuerhalten. Die Einbindung von Frachtmessungen beispielsweise ist nicht zu empfehlen, da diese sich als störanfälliger als hydraulische Messungen darstellten - was zu einer Reduzierung der Verfügbarkeit der einzelnen Regelstrecken geführt hätte.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Überprüfung, Wartung und Instandsetzung der Einzelkomponenten. Ist eine hohe Verfügbarkeit des Prozesssteuerungssystems gefordert, so ist zu jedem Zeitpunkt sicherzustellen, dass alle Bestandteile der Regelstrecken fehlerfrei arbeiten.

Die im Forschungsprojekt erlangten Erfahrungen und Erkenntnisse sind durchaus auf andere Kanalnetze übertragbar, wobei der jeweilige Aufwand abhängig von der Komplexität der Regelstrecken ist.

9.1.4 Wahl des Reglersystems

Prognosesysteme

Im Projektantrag war die Berücksichtigung von **Prognosesystemen** auf Basis von neuronalen Netzen vorgesehen, um vorausschauend in das Kanalsystem eingreifen zu können. Umfangreiche Untersuchungen mit dem für das Kanalsystem entwickelten Simulationsmodell ergaben, dass mit Einsatz von Prognosewerten über das Agentensystem keine Verbesserung der Regelgüte zu erzielen war. Dies ist auch verständlich, da das Agentensystem noch flexibler und dynamischer auf Zustandsänderungen reagiert als beispielsweise Fuzzy und Generische Algorithmen.

Die entscheidende Einflussgröße für das Verhalten des Kanalnetzes ist die Niederschlagsmenge. Diese Größe ist gut messbar und auch mit sogenannten virtuellen Regenschreibern für beliebige geografische Koordinaten berechenbar. Allerdings hat sich ihre Abschätzung mehrere Stunden in die Zukunft hinein nach gegenwärtigem Stand der Technik als zeitlich und räumlich zu ungenau erwiesen. Dies wurde im Rahmen des Projektes mit statistischen Untersuchungen ausführlich analysiert und dokumentiert. Damit wäre eine auf diesen Größen basierende Prognose des Zustandes im Kanalnetz mit großen Ungenauigkeiten verbunden und für eine Steuerung unbrauchbar.

Lernfähigkeit des Steuerungsansatzes

Das Steuersystem sollte die Eigenschaft der Lernfähigkeit besitzen, um sich automatisch und selbständig an veränderliche Randbedingungen anzupassen, die im Antrag über selbst lernende neuronale Netze erreicht werden sollten.

Die im Projekt durchgeführten simulationstechnischen Untersuchungen zeigen eine hohe Flexibilität des Agentensystems, so dass es in einem sehr weiten Bereich der Zustandsgrößen gute Ergebnisse liefert. Eine zusätzliche Lernkomponente kann aktiviert werden: Basierend auf einer Datenbank mit den vom Agentensystem ermittelten Stellgrößen und den daraus generierten Zustandsgrößen des Kanalnetzes kann das Steuerverhalten analysiert und die Gewichtungparameter des Agentensystems in regelmäßigen Intervallen dem Anlagenverhalten angepasst werden.

Adaption und Übertragbarkeit des Steuerungsansatzes

Der größte Vorteil gegenüber den klassischen Steuerungsansätzen ergibt sich für die Projektziele "Übertragbarkeit auf andere Kanalnetzsysteme" und "Adaption gegenüber Zustandsänderungen". Die Anpassung eines Neuro-Fuzzy-Systems ist mit einem erhöhten Zeit- und Arbeitsaufwand verbunden, wo hingegen die Berechnungsalgorithmen des Agentensystems fest im PSS eingebunden sind und die Anpassung der Berechnungsparameter (Preisfunktion) intu-

itiv durch den Nutzer erfolgen kann. So ist es möglich, ohne größeren Aufwand das entwickelte Agentensystem auf andere Kanalnetze zu übertragen bzw. um weitere Randbedingungen zu erweitern.

Um diesen Sachverhalt nachzuweisen, wurde das Agentensystem in ein hydrodynamisches Simulationsmodell eines anderen Kanalnetzes integriert. Durch Anpassung der Gewichtungen und Fließwege konnte das Agentensystem innerhalb kürzester Zeit auf die geänderten Randbedingungen angepasst werden und erzielte innerhalb der Simulation sehr gute Ergebnisse gegenüber dem Ist-Zustand. In der Abbildung ist zu erkennen, dass das Agentensystem im Vergleich zum ungesteuerten Zustand, für ein ausgewähltes Regenereignis, die Entlastungsmenge um ca. 10 % reduzieren konnte.

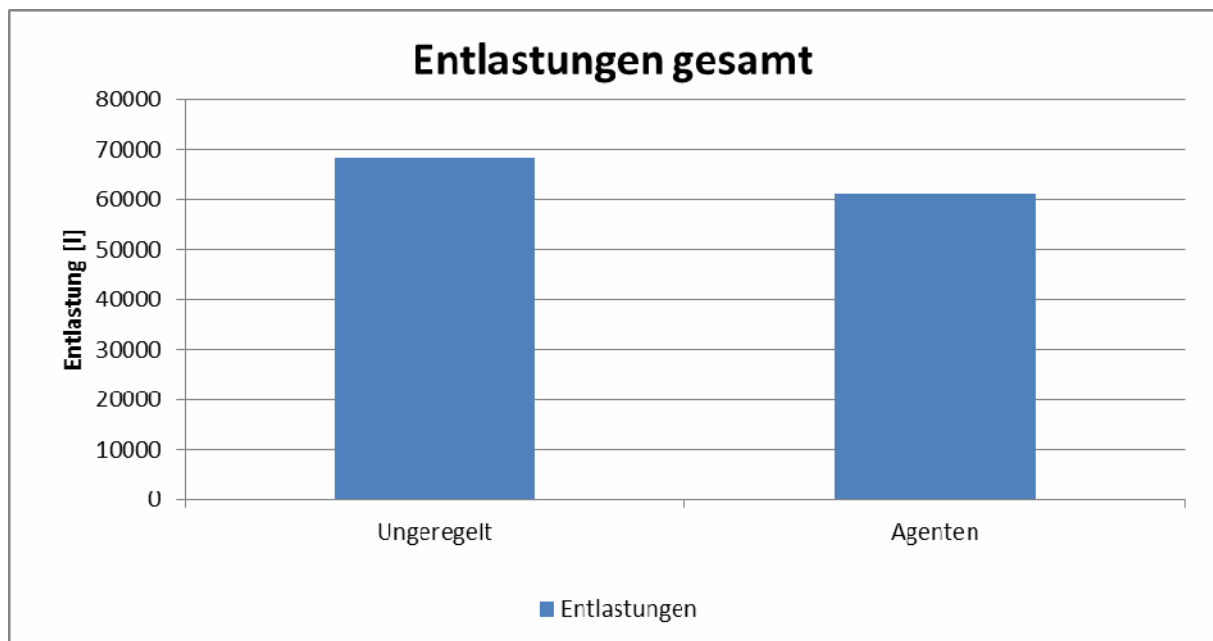


Abbildung 34: Simulationsergebnisse Agentensystem mit der Zielstellung "Entlastungsminimierung"

Fazit

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Austausch der im Projektantrag ursprünglich vorgesehenen Verfahren Fuzzy-Logik und Genetische Algorithmen durch das Agentensystem bei gleicher oder besserer Leistung die Übertragbarkeit der im Projekt entwickelten Lösung auf andere Kanalnetze entscheidend verbessert hat. Auf die Prognose von Anlagenzuständen kann verzichtet werden, da dies keine Verbesserung des Steuerverhaltens bewirkt.

9.1.5 Einbindung des Reglersystems

Für die Einbindung des Reglersystems stehen grundsätzlich zwei Verfahrensvarianten zur Verfügung: die **zentrale** oder die **dezentrale** Realisierung. Im vorliegenden Fall wurde eine zentrale Lösung gewählt.

Ein Vorteil der zentralen gegenüber einer dezentralen Lösung ist, dass der Arbeitsaufwand für jede einzelne Außenstation geringer ist. Bei einem dezentralen Steuerungsansatz müssten die Regelalgorithmen beispielsweise auf der SPS einer jeden Außenstation installiert werden. Dadurch erhöht sich der Arbeits- und Optimierungsaufwand. Bei der zentralen Lösung hingegen wurde der Grundalgorithmus auf dem Prozesssteuerungsserver implementiert und ist mit relativ geringem Arbeitsaufwand um weitere Außenstationen erweiterbar. Die nötigen Arbeiten an den Außenstationen selber sind unabhängig von der Variante umzusetzen.

Voraussetzung der zentralen Lösung ist allerdings das Vorhandensein eines Kommunikationsweges zwischen Außenstation und zentraler SPS/PLS. Diese Voraussetzung war für das Kanalnetz Emmerich gegeben und ist auch bei anderen Kanalnetzen oftmals schon vorhanden. Die technische Einbindung erfolgt über Standardschnittstellen wie Ethernet und OPC. Diese beiden Schnittstellen sind im Regelfall in vorhandenen SPS vorhanden und ohne größeren Aufwand konfigurierbar.

Ein weiteres Kriterium bei der Abwägung der Varianten waren die Investitionskosten hinsichtlich zusätzlicher notwendiger Hardware. Bei einer dezentralen Lösung wäre es teilweise notwendig, zusätzliche Hardware (z. B. Kleinst-SPS) für einzelne Stationen anzuschaffen.

Nach Abwägung der jeweiligen Vor- und Nachteile beider Varianten wurde die Umsetzung einer zentralen Lösung ausgewählt. Entsprechend basiert das im Forschungsprojekt entwickelte Agentensystem in der aktuellen Version auf einem zentralen Ansatz. Je nach Aufgabenstellung und Randbedingung ist aber eine Umstellung auf einen dezentralen Ansatz möglich.

9.2 Hydraulischer Einfluss des PSS auf das Entwässerungssystem

Bei Bewertung der hydraulischen Situation des Entwässerungssystems nach der Einführung des neuen Prozesssteuerungssystems spielt vor allem die Frage von Überstau- und Entlastungsereignissen eine zentrale Rolle.

Durch das neue Prozesssteuerungssystem werden nur Niederschlagsereignisse mit einer Wiederkehrhäufigkeit von weniger als zwei Jahren gesteuert, da bei höheren Jährlichkeiten die Becken so weit gefüllt werden, dass nicht ausreichend Volumen für eine sinnvolle Prozess-

steuerung zu Verfügung steht. Unter dieser Prämisse wurden im Vorfeld der eigentlichen Umsetzung Analysen mit Hilfe der verwendeten Simulationsmodelle durchgeführt. Aus den Ergebnissen konnten Randbedingungen ermittelt werden, mit denen Überstau- und Entlastungsereignisse ausgeschlossen werden:

- Steuerung kleinerer Niederschlagsereignisse, die deutlich unter dem Bemessungsregen liegen,
- das für das Agentensystem verfügbare Speichervolumen eines Beckens wurde auf maximal 80 % des Gesamtspeichervolumens reduziert,
- im Niederschlagsfall ist die minimale Förderleistung auf eine Grundfördermenge begrenzt - die Vorgabe einer Förderleistung von 0 m³/h ist ausgeschlossen,
- wird ein kritischer Füllstand erreicht (Füllstandsüberwachungen der Regenbecken), wird die vorgegebene Förderleistung der Pumpwerke in Richtung Maximum erhöht.

Während des Betriebs konnten die Erkenntnisse und die Ergebnisse aus den Voruntersuchungen und hydrodynamischen Simulationen bestätigt werden. Vermehrte Überstau- und Entlastungsereignisse traten nicht auf. Eine Erhöhung der Entlastungsrate durch das neue System konnte nicht nachgewiesen werden.

Im Bereich des Füllverhaltens der Regenbecken traten, wie zu erwarten, Änderungen ein, da diese mit Inbetriebnahme des Prozesssteuerungssystems gezielt eingestaut werden. Allerdings konnte auch dort keine negative Beeinflussung der Betriebsstabilität nachgewiesen werden. Bei den im Rahmen des Forschungsvorhabens beobachteten Niederschlagsereignissen stellte sich der Sachverhalt eher so dar, dass durch das Agentensystem oftmals nur ein Teil des zur Verfügung stehenden Speichervolumens genutzt wurde - das zur Sicherheit reduzierte Speichervolumen wurde nicht erreicht.

Im Bereich der Haltungen kam es zu Vollfüllungen bei Regenabfluss, was ebenso im früheren Zustand der Fall war.

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass die Änderung der Betriebsweise in Bezug auf die Betriebssicherheit der einzelnen Regenbecken und des Kanalnetzes als neutral anzusehen ist.

Eine Quantifizierung der Ergebnisse stellt sich als schwierig dar, da die Betriebsweise grundsätzlich geändert wurde und durch die Anbindung des RRB Industriehafen an die Hauptdruckleitung eine neue Entwässerungssituation geschaffen wurde. Durch diese Anbindung wurde dem Hauptabwasserstrom der Hauptdruckleitung ein zusätzliches Retentionsvolumen zur Verfügung gestellt, welches in der ursprünglichen Steuerung nicht vorhanden war.

Die hydraulischen Haupteffekte wurden in den Zulaufverhältnissen des Kläranlagenzulaufs ermittelt, wie nachfolgend erläutert wird.

9.3 Hydraulische und frachtmäßige Betrachtung des Kläranlagenbetriebs

9.3.1 Qualitativer und quantitativer Ansatz

Die Auswertung bzw. Betrachtung der hydraulischen Einflüsse des PSS auf den Kläranlagenbetrieb können quantitativ als auch qualitativ erfolgen. Da die hydraulischen Effekte direkten Einfluss auf die Fracht im Zulauf der Kläranlage haben, erfolgte für beide Ansätze keine strikte Trennung von Fracht und Hydraulik.

Quantitative Betrachtung

Bei der quantitativen Betrachtung der Einflüsse auf den Kläranlagenbetrieb wurden verschiedene Parameter zur Beurteilung herangezogen. Primär waren dies Konzentrationsmessungen von Ammoniumstickstoff und Orthophosphat in den Belebungsbecken. Durch das Abflachen und Vergleichmäßigen der Zulaufkurve, vor allem zu Beginn eines Niederschlagsereignisses, soll sich ein stabileres Betriebsverhalten und damit verbunden ein sicheres Einhalten der Ablaufgrenzwerte einstellen. Vor Inbetriebnahme des PSS traten gerade in diesem Bereich Probleme im Betriebsverhalten auf. Diese Probleme äußerten sich beispielsweise bei Regenereignissen mit vorherigen längeren Trockenperioden. Die sprunghaft ansteigende Zulaufwelle, in Verbindung mit einem Frachtstoß, wurde in der Vergangenheit oftmals durch die Belebungsbecken "durchgeschoben", was wiederum zu teilweise erheblichen Problemen in den Nachklärbecken führte.

Eine Schwierigkeit bei der quantitativen Analyse der Betriebsergebnisse ist das Fehlen von Validierungsdaten bzw. Vergleichsdaten. Ein Niederschlagsereignis, für welches eine Abflusssteuerung stattgefunden hat, ist bezogen auf seine Randbedingungen (zeitlicher Verlauf, Gesamtniederschlagsmenge, Vorereignisse usw.) einzigartig. Möchte man diese Regenereignisse mit dem ungesteuerten Zustand vergleichen, so ist neben den vorhandenen Simulationsmodellen für das Kanalnetz ein sehr gut kalibriertes Simulationsmodell der Kläranlage notwendig. Dieses war zum einen kein Bestandteil des Projektes, zum anderen ist die Kalibrierung eines dynamischen Kläranlagenmodells (z. B. in SIMBA) mit einem enormen Aufwand im Bereich der Messtechnik verbunden, weshalb auf die Erstellung eines solchen Modells verzichtet wurde.

Allerdings ist es möglich, bedingt durch die technischen Randbedingungen des Kanalnetzes Emmerich, ähnliche Niederschlagsereignisse miteinander zu vergleichen. Vor Projektbeginn stellte sich die Situation so dar, dass mit einsetzendem Niederschlag und steigenden Höhenständen in den Pumpwerken die Förderpumpen mit der vollen genehmigten Leistung Richtung Kläranlage gefördert haben. Der sprunghafte Anstieg des Kläranlagenzulaufs ist also, unabhängig davon welche Randbedingungen das Niederschlagsereignis aufwies, immer zu erkennen, ebenso wie die vorher beschriebenen Probleme in der Betriebsstabilität.

Ein weiterer Punkt, der bei der quantitativen Analyse zu beachten ist, ist der Sachverhalt, dass während der Praxistests die Kläranlage sich in einem kontinuierlichen Umbau- und Sanierungsvorgang im Bereich der Belebungs- und Nachklärbecken befand. Liegen also Niederschlagsereignisse die für eine Analyse herangezogen werden sollten zeitlich zu weit auseinander, kann davon ausgegangen werden, dass für die Kläranlage keine vergleichbaren Daten vorliegen.

Qualitative Betrachtung

Die qualitative Betrachtung des Kläranlagenbetriebs basiert grundsätzlich auf Erfahrungswerten und Aussagen des Anlagenbetreibers und des Anlagenpersonals. Weiterhin ist zu beachten, dass bei der Analyse keine strikte Trennung zwischen Kanalnetz- und Kläranlagenbetrieb vollzogen wurde. Positive Effekte für das Betriebsverhalten der Kläranlage könnten beispielsweise zu negativen Effekten im Betrieb des Kanalnetzes führen. Negative Effekte könnten dabei sein:

- Vermehrte Einsatzfahrten, um Störungen zu beseitigen, welche durch zusätzliche Automatisierungs- und Antriebstechnik oder durch Ausfälle der Datenübertragung verursacht wurden,
- Mehraufwand im Bereich zusätzlich angeschaffter Messtechnik (Wartung, Reinigung, Kalibrierung usw.),
- zusätzlicher betrieblicher Aufwand im Bereich der Leittechnik und Datenüberwachung; z. B. Überwachung des PSS, Bedienung des PSS-Servers und der entsprechenden Softwareprojekte.

Teilweise werden diese Punkte auch im Kapitel 10 "Ökonomische Aspekte" genauer betrachtet, bzw. werden dort intensiver analysiert. In diesem Kapitel sollen qualitative Aspekte lediglich die im Absatz "Quantitative Betrachtung" erwähnten Punkte unterstützen.

9.3.2 Beschreibung des Ist-Zustands

Bedingt durch die topologischen Randbedingungen des Einzugsgebiets, sowie die Tatsache, dass sich der gesamte Kläranlagenzulauf aus Druckleitungen zusammensetzt, kommt es mit einsetzendem Niederschlag zu einem sprunghaften Anstieg der Zulaufmenge im Bereich der Kläranlage. Dabei kann die Zulaufmenge innerhalb weniger Minuten bis auf die dreifache Menge des Trockenwetterzulaufs ansteigen, was zu erheblichen Problemen im Bereich der Betriebsstabilität führt. Besonders signifikant stellt sich dieser Sachverhalt am Mischwasserpumpwerk Rheinpromenade dar. Dort fallen bis zu 70 % des gesamt anfallenden Abwassers an, welches vom Pumpwerk direkt zur Kläranlage gefördert wird.

In der Abbildung 35 ist beispielhaft ein solches Regenereignis dargestellt. Dieses Verhalten lässt sich für jedes Ereignis, unabhängig von Intensität und Dauer, erkennen.

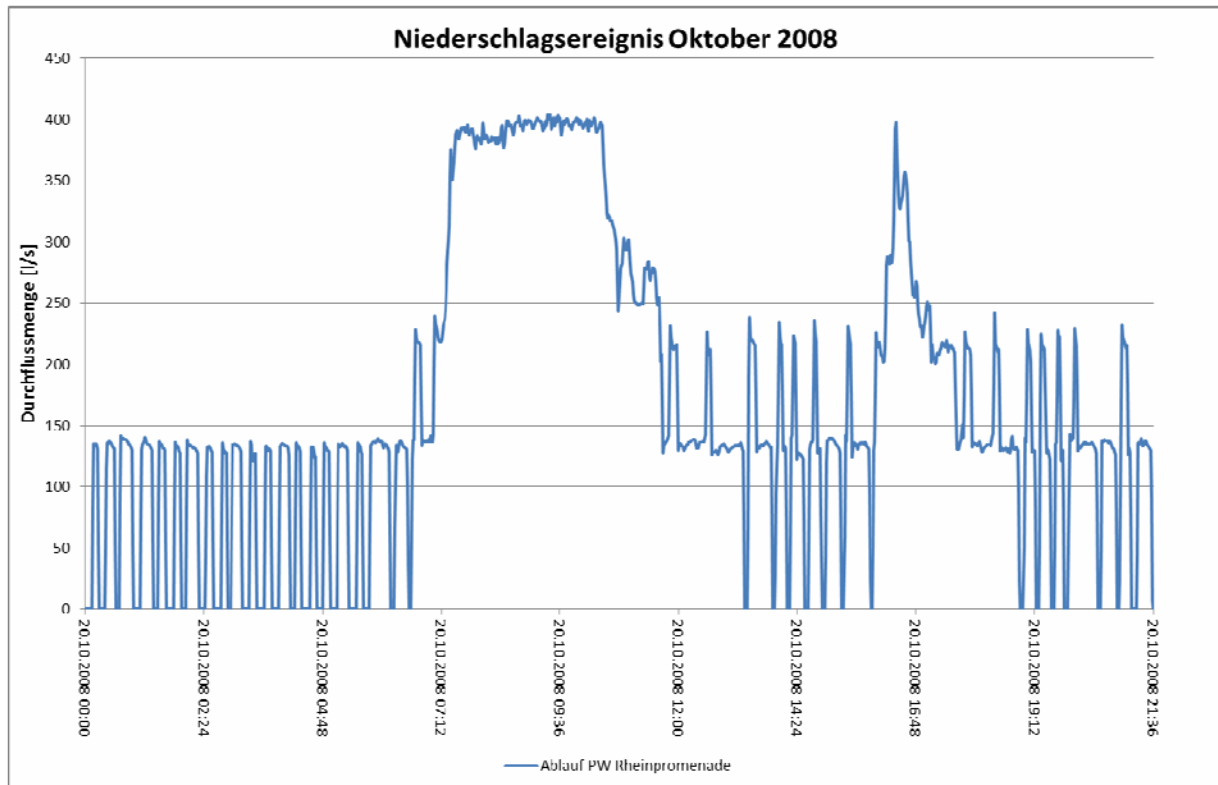


Abbildung 35: Niederschlagsereignis Oktober 2008

In der Abbildung 36 ist ein zweites Ereignis dargestellt, anhand dessen man die Einflüsse des Spül- und Frachtstoßes auf der Kläranlage erkennt. Im Bereich der Belebungsbecken kommt es zu einem erheblichen Anstieg im Bereich des Orthophosphates, wobei der Konzentrationsanstieg sich bis in den Ablauf der Belebung zieht. Der im Beispiel verzeichnete Anstieg auf ca. 2,3 mg PO₄-P/l im Ablauf der Belebung ist in dieser Form bei allen unregelmäßigen Niederschlagsereignissen zu erkennen. Zwar konnten die Ablaufgrenzwerte für Phosphat von 1 mg/l sicher eingehalten werden, da es sich bei der Fällmitteldosierung um eine Nachfällung handelt, allerdings mit einem entsprechend hohen Fällmittelverbrauch.

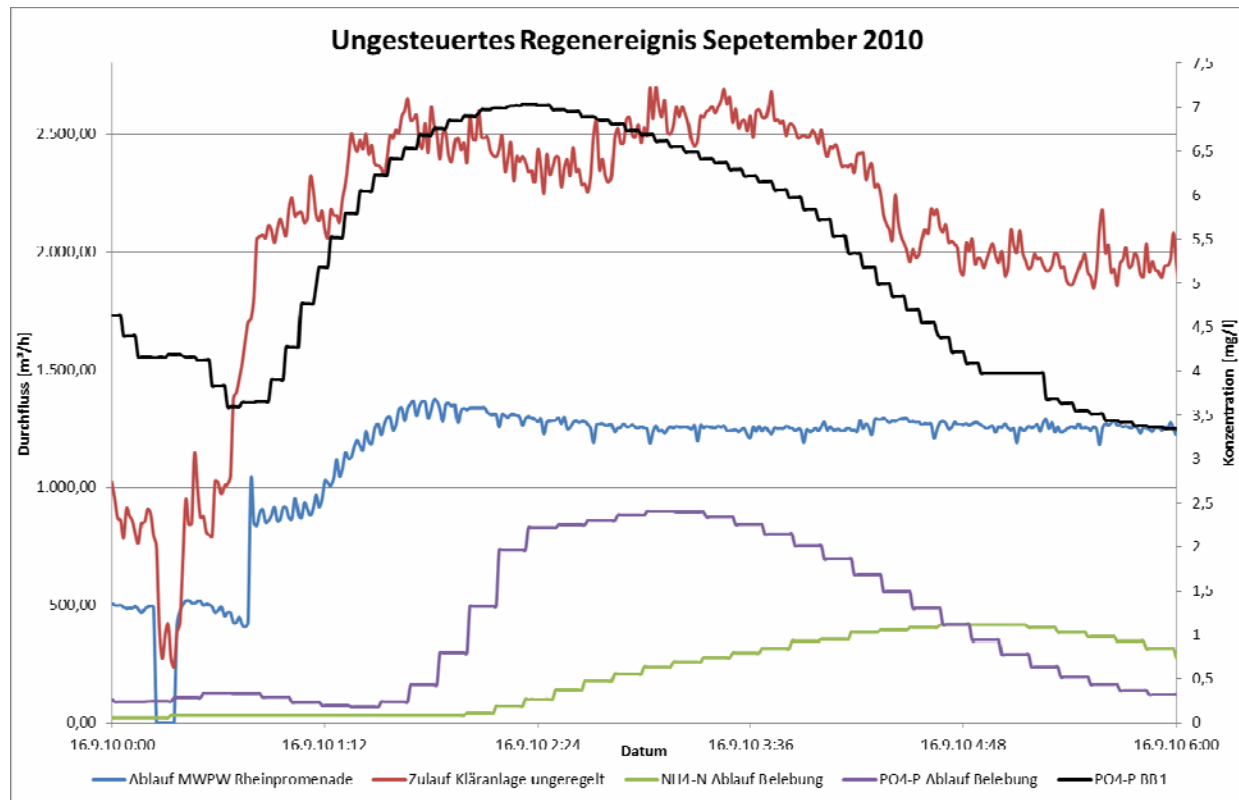


Abbildung 36: Ungesteuertes Regenereignis September 2010

9.3.3 Einfluss des Agentensystems

Zur Darstellung und Analyse des Einflusses des Agentensystems auf das Betriebsverhalten, wurde ein Niederschlagsereignis gewählt, welches ebenfalls im September 2010 stattgefunden hat. So ist sichergestellt, dass ähnliche klimatische Bedingungen vorgeherrscht haben und die Zustände auf der Kläranlage (Messtechnik, Sanierungsarbeiten) identisch waren. In der Abbildung 37 ist dieses Regenereignis zu sehen.

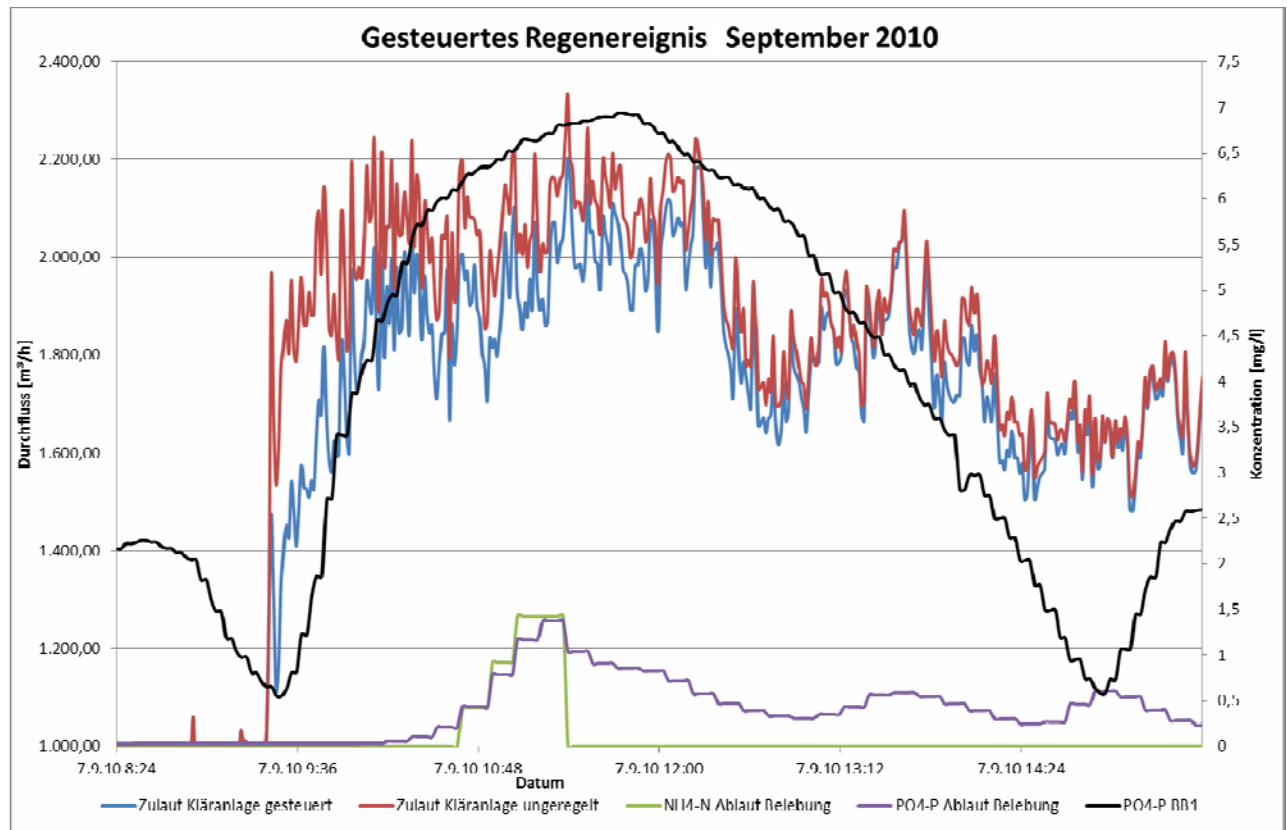


Abbildung 37: Gesteuertes Regenereignis September 2010

Bei der Abbildung ist zu beachten, dass es sich bei dem Grafen "Zulauf Kläranlage gesteuert" um den eigentlichen Messwert handelt. Der Wert "Zulauf Kläranlage ungesteuert" ist dabei ein berechneter Wert, welcher sich aus dem gemessenen Wert zuzüglich der vom Agentensystem vorgegebenen Soll-Werte ergibt. Dieser Wert kann also vereinfacht mit dem Kläranlagezulauf gleichgesetzt werden, welcher sich im unregulierten Zustand eingestellt hätte.

Es ist zu erkennen, dass gerade zu Beginn des Niederschlagsereignisses die Zulaufkurve deutlich abgeschwächt wird. Mit zunehmender Dauer wird der gezielte Einstau des Agentensystems in den Regenbecken gemindert bzw. in Becken mit einem geringen freien Speichervolumen komplett gestoppt. Dies ist durchaus sinnvoll, da für die hydraulischen Belastungen der Kläranlage vor allem die ersten 30 - 60 Minuten entscheidend sind. Die Zeit benötigt die Kläranlage bzw. die Biologie, um sich auf die deutlich höhere hydraulische Belastung einzustellen - danach ist es der Kläranlage möglich, die maximale Zulaufmenge effektiv und sicher zu verarbeiten. Die in den Becken zwischengespeicherten Wassermengen können somit mit abklingender Niederschlagsintensität aus den Becken Richtung Kläranlage gefördert werden, um die Speichervolumen für mögliche kommende Ereignisse zur Verfügung zu haben.

Wie im Kapitel 9.3.1 erwähnt ist es schwierig, anhand von Konzentrationsmessungen quantifizierte Aussagen über die Effekte hinsichtlich der Reinigungsleistung zu treffen. Dies trifft bei Regenereignissen, größtenteils verursacht durch Verdünnungseffekte, im Bereich der Stickstoffkonzentrationen zu. Die ionenselektiven Sonden für $\text{NO}_3\text{-N}$ und $\text{NH}_4\text{-N}$ in den Belebungsbecken weisen, insbesondere bei Konzentrationen deutlich kleiner 1 mg/l , deutliche Abweichungen zum wirklich vorhandenen Wert auf. Eine Analyse, basierend auf diesen Werten, ist daher nicht möglich. Allerdings wurde durch das Betriebspersonal bestätigt, dass bei allen Regenereignissen, welche durch das PSS gesteuert wurden, die Ablaufgrenzwerte im Bereich Stickstoff deutlich unterschritten wurden. Bei ungesteuerten Regenereignissen ist es dagegen weiterhin so, dass Konzentrationsspitzen teilweise bis in die Nachklärungen gelangen, die Ablaufgrenzwerte zwar nicht überschritten werden, aber die Messwerte teilweise im Bereich dieser Größenordnung liegen. Die Betriebssicherheit hinsichtlich der Ablaufgrenzwerte für Stickstoff konnte durch das PSS deutlich erhöht werden.

Für den Phosphat-Wert im Ablauf der Belebung kann allerdings eine eindeutige Aussage getroffen werden. Zwar steigt der Wert im ersten Belebungsbecken durch den hydraulischen Stoß deutlich an, allerdings wird diese Konzentrationsspitze nicht mehr durch die beiden folgenden Belebungsbecken geschoben. Dies ist für jedes gesteuerte Niederschlagsereignis zu erkennen. Im abgebildeten Beispiel ist zu erkennen, dass das Phosphat im Ablauf der Biologie nur kurzzeitig über 1 mg/l steigt, was wiederum bedeutet:

- deutlich geringerer Fällmittelverbrauch,
- die Gefahr von Grenzwertüberschreitungen im Ablauf der Kläranlage konnte reduziert werden.

Dieser Sachverhalt konnte ebenfalls durch das Betriebspersonal bestätigt werden.

9.3.4 Frachtmäßige Betrachtung des Kläranlagenbetriebs

Das Regelungspotential einer Frachtregelung macht nach zwischenzeitlich gewonnen Erfahrungen auch aus anderen Vorhaben nur wenige Prozent von dem der hydraulischen Regelung aus, weil die verfügbaren Speichervolumina im Regelungsfall meist schon durch die hydraulische Regelung weitgehend ausgelastet sind. Eine Beeinflussung ist nur bei kleinen Regenereignissen möglich, da bei größeren Ereignissen ab Wiederkehrdauer von rd. zwei Jahren eine Frachtregelung nicht mehr möglich ist. Die Frachtregelung ist daher eher für den Trockenwetterfall relevant, wenn ausreichende Speichervolumina zur Vergleichmäßigung der Frachtbelastung und zur Pufferung von Frachtspitzen (z. B. bei Havarien) zur Verfügung stehen. Konsequenter Weise wurde die Frachtregelung im vorliegenden Vorhaben auf den Trockenwetter-

fall und den Zulauf der Kläranlagen sowie die Regenbecken Rheinpromenade und Elten eingegrenzt. Als Problematisch stellte sich der Betrieb der Frachtmessungen, insbesondere der CSB-Messung durch die Spektralsonden dar. Insbesondere während hochbelasteter Zulaufsituationen weisen diese eine erhöhte Messungenauigkeit und Ausfallhäufigkeit auf. Da der Frachtregler aber zwingend auf diese Messergebnisse angewiesen ist, kann für solche Situationen auch keine Steuerung des Trockenwetterabflusses durch den Frachtregler erfolgen. Die Situation konnte durch den aufwendigen Umbau der Messvorrichtungen an den Stationen Pumpwerk Elten, Pumpwerk Rheinpromenade und im Zulauf der Kläranlage zwar verbessert, allerdings stehen aktuell nicht ausreichend Ergebnisse zur Verfügung, um die Effektivität und den Einfluss des Frachtreglers seriös hinsichtlich der Qualität beurteilen zu können.

9.4 Umweltentlastung

Für die Bewertung der Umweltauswirkungen des neuen Prozesssteuerungssystems steht als zentraler Aspekt naturgemäß der Gewässerschutz im Vordergrund, der vor allem über die Frage des Frachtaustrags aus der Kläranlage und die Abschläge aus den Regenbecken definiert wird.

Darüber hinaus ergeben sich durch die Umstellung auf die neue Prozesssteuerung, abgesehen von Einflüssen auf den Energie- und Kraftstoffverbrauch (und daraus ableitbare CO₂-Äquivalente), keine wesentlichen Änderungen in Bezug auf Umweltauswirkungen.

Energie- und Kraftstoffverbrauch

Veränderungen beim Energiebedarf können sich vor allem in folgenden Bereichen ergeben:

- Betrieb der zusätzlichen EMSR-Technik für das Prozesssteuerungssystem:

Der Umfang des Energieverbrauchs für zusätzliche Rechnerleistung und Messtechnik kann als vernachlässigbar im Vergleich zum Gesamtverbrauch der Abwasseranlagen gesehen werden.

- Betrieb der durch das Prozesssteuerungssystem geregelten Pumpen:

Die Frage eines möglichen Energiemehrverbrauchs durch erhöhte Pumpenleistung aufgrund von Steuerungsvorgängen ist stark standortabhängig. Für das Emmericher Entwässerungsnetz entstehen an den meisten Stationen keine nennenswert höheren Pumpleistungen, da die Regenbecken im Freigefälle gefüllt und die in die Ablaufleitungen zu pumpende Wassermenge unverändert bleibt, lediglich die Schaltzyklen und Zeitpunkte der Pumpvorgänge werden verändert. Zu einem Mehrverbrauch gegenüber

der ursprünglichen Konfiguration kommt es allerdings für die Entleerung des RRB Industriehafen. Von April 2009 bis Juli 2011 sollten 127.814 m³ durch das Prozesssteuerungssystem zusätzlich in das Becken eingeleitet werden. Durch anfängliche Betriebsstörungen wurde dieser Wert in der Praxis nicht ganz erreicht. Für die Entleerung ist von etwa 6.700 kWh/a auszugehen (abhängig von der Zahl der Regenereignisse), die im Verhältnis zum Gesamtenergieverbrauch der Kläranlage im gleichen Zeitraum mit ca. 2.350.000 kWh/a nur 0,3 % ausmachen.

- Veränderungen im Kläranlagenbetrieb:

Im Bereich der Kläranlage zeigt die Umstellung auf die Kanalnetzsteuerung nur einen geringen Einfluss auf den Energieverbrauch für den Reinigungsprozess: Da die zu behandelnde Abwassermenge in Summe gleich bleibt, ergeben sich auch keine wesentlichen Änderungen beim Energieverbrauch für Pumpen und Belüfter.

- Fahrleistungen der Mitarbeiter zu den Betriebspunkten:

Durch die für das Prozessleitsystem zusätzlich installierte Technik entstehen zusätzliche Betriebspunkte für das betreuende Personal. Während der Inbetriebnahmephase hat dies zu zahlreichen Mehrfahrten für Kontroll- und Einstellarbeiten geführt. Im laufenden Regelbetrieb werden zusätzliche Wartungsarbeiten an der neuen Ausrüstung jedoch weitgehend zusammen mit ohnehin anfallenden Routinearbeiten erledigt. Es entsteht ein Zeitbedarf von durchschnittlich drei Arbeitsstunden pro Woche für zwei Mitarbeiter mit Fahrzeug.

Frachtaustrag aus der Kläranlage

Durch das neue Prozesssteuerungssystem ist es gelungen, den Zulauf zur Kläranlage zu gleichmäßigen und damit den Betrieb im Hinblick auf eine konstante Reinigungsleistung der Kläranlage zu verbessern. Hydraulische und Frachtspitzen mit Auswirkungen auf die Ablaufqualität können so verringert werden. Dies eröffnet ggf. auch Möglichkeiten für eine Herabsetzung der Einleitwerte zur Bemessung der Abwasserabgabe, mit positiven ökonomischen wie ökologischen Folgen. Die Auswirkungen lassen sich bisher jedoch nicht quantifizieren, da während der Projektlaufzeit auch andere Maßnahmen auf der Kläranlage erfolgt sind und für eine seriöse Bewertung der bisherige Zeitraum des unterbrechungsfreien Betriebs der neuen Prozesssteuerung zu kurz ist.

Abwasser-Abschläge aus den Regenüberlaufbecken

Einen zentralen Aspekt bei der Bewertung des Einflusses der neuen Prozesssteuerung auf den Gewässerschutz stellt die Frage der Entlastung aus den Regenbecken dar, in deren Füll- und Leerungsregime eingegriffen wird.

Wie im vorstehendem Kapitel 9.2 erläutert, haben sich für die spezifische Emmericher Situation bisher keine nennenswerten Veränderungen bei der Entlastungsrate nachweisen lassen (weder positive noch negative). Grundsätzlich kann die Entlastungsrate aus den Becken nicht über das zulässige Maß erhöht werden, da vornehmlich freies Beckenvolumen zur Bewirtschaftung genutzt wird und die neue Prozesssteuerung bei Starkregenereignissen (mit Vollfüllung der Becken) zudem nicht mehr wirksam ist. Eine deutliche Verminderung gegenüber der vorherigen Entlastungsrate ist jedoch ebenfalls nicht zu erwarten, da die Ziele der Vergleichmäßigung des Kläranlagenbetriebs und der Senkung der Entlastungsrate konträr sind, weil beide um freies Beckenvolumen konkurrieren. Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wurde jedoch für die spezifische Emmericher Situation der Vergleichmäßigung des Kläranlagenzulaufes als vorrangig definiert, da hier die größten Optimierungspotentiale in der Gesamtabwägung gesehen wurden.

Ein positiver Effekt ergibt sich beim RÜB Rheinpromenade. Die Entleerung des Beckens in das Mischwasserpumpwerk erfolgte bisher mit einer konstanten Wassermenge von 300 m³/h, sobald der Zulauf aus dem Kanalnetz dies erlaubte. Das neue Steuerungssystem ermöglicht in Abhängigkeit vom Wasserspiegel im Pumpensumpf Entleerungsmengen bis zu 600 m³/h. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Regenereignis auf ein weniger gefülltes oder leeres Becken trifft, wird dadurch deutlich erhöht.

Fazit

Die Umweltauswirkungen des neuen Prozesssteuerungssystems lassen sich bisher kaum seriös beziffern.

Der Einfluss auf den Energie- und Kraftstoffverbrauch ist stark standortabhängig. Für die Emmericher Situation ergibt sich nur für das RRB Industriehafen ein eindeutiger Mehrverbrauch durch vermehrte Pumpenlaufzeiten.

Für den Bereich des Gewässerschutzes konnte in Summe bisher keine eindeutige Verbesserung, aber auch keine Verschlechterung nachgewiesen werden. Es ist jedoch festzuhalten, dass für das Prozesssteuerungssystem, im Hinblick auf den Frachtaustrag der Kläranlage durch Verbesserung des Reinigungsbetriebs, tendenziell ein positiver Beitrag erwartet wird und sich in Bezug auf die Entlastung aus den Regenbecken nach ersten Auswertungen ein neutrales Verhalten zeigt.

10 Ökonomische Aspekte

10.1 Einführung

Wie in vielen anderen Gebietskörperschaften stellen auch in Emmerich am Rhein kapitalintensive Investitionen in den Gewässerschutz eine stetige Aufgabe dar. Mittel müssen unter anderem in folgenden Bereichen eingesetzt werden:

- zur Vervollständigung der Regenwasserbehandlung,
- zur funktionalen Modernisierung und Sanierung des Abwasserkanalsystems,
- zur Modernisierung der Kläranlage, insbesondere hinsichtlich verbesserter Prozessstabilität.

Gleichzeitig stehen die TWE als Betreiber der Abwasserinfrastruktur unter erheblichem Kostendruck und damit vor der Notwendigkeit, alle Möglichkeiten neuer und rationeller Technologien auszuschöpfen, um die Kosteneffizienz der Abwasserentsorgung insgesamt zu verbessern und finanzielle Risiken zu minimieren.

Dies gilt auch für das vorliegende Projekt. Die Einführung des neuen Prozesssteuerungssystems ist mit erheblichen Investitionen verbunden. Eines der Projektziele war daher eine Bewertung der ökonomischen Auswirkungen des neuen Systems.

Zur umfassenden Charakterisierung von Projektkosten werden meist CAPEX und OPEX herangezogen (Rudolph, K.-U.; Harbach, M., 2010). Die CAPEX (= CAPital EXpenditures) fassen dabei alle jährlichen Ausgaben zusammen, die für die (Re-)Finanzierung eines Projektes anfallen (Zinszahlungen, Abschreibungen). Die OPEX (= OPERational EXpenditures) umfassen die laufenden Ausgaben innerhalb eines Jahres, die nötig sind, um beispielsweise das Reglersystem zu betreiben (also für Personal, Energie, Betriebsmittelverbräuche etc.). Grundsätzlich lassen sich Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen zu Projektalternativen im Abwassersektor nicht nur auf den Vergleich der Investitionskosten verschiedener alternativer Verfahrenskonzepte (in diesem Fall: mit und ohne dem neuen Reglersystem) beschränken, sondern müssen die gesamte Projektlaufzeit umfassen (Life Cycle Assessment). Scheinbar kostengünstigere Lösungen, die bei ganzheitlicher Betrachtung häufige und hohe Reinvestitionen und andere laufende Ausgaben erfordern, verlieren so ihren vermeintlichen komparativen Kostenvorteil.

Neben monetären Aspekten spielen im vorliegenden Vorhaben die nicht-monetären ("weichen") Faktoren für den Wirtschaftlichkeitsvergleich eine sehr wichtige Rolle, auch wenn sie nicht immer auf den ersten Blick mit den Investitions- und Betriebskosten gesehen werden (Rudolph, K.-U.; Harbach, M.; Kehl, O.; Schmidlein, F., 2010). Hierzu sind beispielsweise Veränderungen bei der Betriebssicherheit bzw. eine veränderte Risikogestaltung, erhöhter Personalaufwand, eine vorweggenommene Anpassung an zukünftige Ereignisse (z. B. rechtliche Rahmenbedingungen, ökologische und klimatische Veränderung) etc. zu zählen.

Die konkreten monetären und nicht-monetären Auswirkungen für die Technischen Werke Emmerich, die aus der Einführung des neuen Prozesssteuerungssystems resultieren, werden in Kapitel 10.4 und 10.5 beschrieben.

10.2 Datenlage

Insbesondere für die Untersuchung der ökonomischen Aspekte des vorliegenden Projekts war laut ursprünglicher Vorhabenplanung ein Vergleich von Betriebsparametern der Abwasserinfrastruktur wie Betriebsmittel- und Energieverbräuchen, Ablaufwerten etc. anhand von Jahresperioden vor und nach der Inbetriebnahme des neuen Reglers vorgesehen.

Grundsätzlich hat sich die Erhebung von belastbaren Daten für einen Vergleich des Zustandes nach der Regler-Implementierung jedoch als sehr schwierig herausgestellt, da ein Großteil der Projektlaufzeit durch sukzessive Entwicklungsarbeit am neuen Prozesssteuerungssystem gekennzeichnet war und die Regelbetriebsphasen mehrfach durch Anpassungsarbeiten an Software und Hardware unterbrochen worden sind. Wie in Kapitel 9.1.1 beschrieben, gab es zudem bei den Konzentrationsmessungen über längere Zeiten Unsicherheiten zur Zuverlässigkeit der Messdaten, sodass die Frachtkomponente erst für die spätere Projektphase als belastbar einzustufen ist. Zusätzlich sind auf der Kläranlage während der Laufzeit des vorliegenden Vorhabens verschiedene vom Projekt nicht zu beeinflussende technische Veränderungen vorgenommen worden, die das Vergleichsergebnis verfälschen würden.

Aus diesen Gründen wurde von einem Vergleich von Jahresperioden Abstand genommen, da die Untersuchung von quantifizierbaren Betriebsparametern nicht belastbar möglich wäre. Eine Simulation von längeren Zeitperioden oder Einzel-Regenereignissen mit den bestehenden Modellen schied ebenfalls aus, da diese zwar die veränderte Zulaufsituation zur Kläranlage abbilden könnten, nicht aber viele relevante Betriebsparameter auf der Kläranlage selber. Daher ist alternativ ein gezielter Vergleich von realen Einzel-Regenereignissen mit und ohne Prozesssteuerungssystem vorgesehen worden, der nachfolgend beschrieben wird.

10.3 Vergleich von Regenereignissen mit und ohne Prozesssteuerungssystem

Um die Auswirkungen des neuen Prozesssteuerungssystems insbesondere auf den Kläranlagenbetrieb beschreiben zu können, ist ein Vergleich von Betriebsdaten aus relevanten Betriebsphasen mit und ohne dem neuen Prozesssteuerungssystem vorgenommen worden. Das System greift vor allem bei Regenereignissen kleiner bis mittlerer Größenordnung ein, um hydraulische und frachtmäßige Belastungsspitzen im Kläranlagenzulauf zu verringern. Daher sollten typische Regenereignisse mit und ohne neue Regelung verglichen werden, die jeweils eine hydraulisch und frachtmäßig möglichst ähnliche Belastungssituation darstellen.

Unter diesem Gesichtspunkt wurden bei einer Analyse von mehreren Regenereignissen für die folgende Darstellung zwei charakteristische Ereignisse im September 2010 identifiziert, eins bei abgeschaltetem und eins mit aktiviertem Prozesssteuerungssystem (s. Kapitel 9.3). In den Graphiken in Kapitel 9 sind jeweils die tatsächlichen Zulaufganglinien zur Kläranlage und die rechnerisch aus den Soll-Werten des PSS ermittelten Alternativen dargestellt.

Das Regenereignis vom 16.09.2010 stellt ein typisches Beispiel für den unregelmäßigen Kläranlagenzulauf dar (siehe Abbildung 36). Die Wassermenge steigt innerhalb weniger Minuten vom Trockenwetterzulauf, der bei $600 \text{ m}^3/\text{h}$ liegt, auf die volle Pumpenleistung des MWPW von über $1.800 \text{ m}^3/\text{h}$ an. In der Abwasserdruckrohrleitung vom MWPW Rheinpromenade befindet sich zu Beginn noch Abwasser mit TW-Konzentration. Diese Menge (ca. 900 m^3) wird durch den einsetzenden Regen statt in 1,5 Stunden (TW) in etwa einem Drittel der Zeit gefördert. Die Kläranlage erhält so nicht nur die dreifache Wassermenge, sondern auch die dreifache Fracht. Dazu kommt anschließend die Fracht des Spülstoßes aus dem Mischwasser-Kanalsystem. Der weitere Anstieg der Wassermenge resultiert aus den anderen Pumpwerken, die in separaten Druckrohrleitungen zur Kläranlage fördern. Hier treten ähnliche Effekte auf, die aber durch die sehr viel kleineren Durchmesser der Druckrohrleitungen und den Zeitversatz der Förderung weniger gravierend sind.

Gleichzeitig zur dem hohen Frachteintrag reduziert der hydraulische Stoß die Belebtschlammmenge in den Belebungsbecken. Bis der hydraulische Effekt durch den zunehmenden Zulauf des Rücklaufschlammes ausgeglichen ist, dauert es etwa eine halbe Stunde. Auf diese Weise trifft eine mehrfache Fracht auf eine verminderte biologische Reinigungsleistung. Die normalerweise wenig über Null liegende $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration im Anlauf der Belebungsstufe steigt dadurch für mehrere Stunden auf über $1,0 \text{ mg/l}$ an (siehe Abbildung 36). Die gestufte Kurve ergibt sich durch die Messintervalle des Analysers.

Der Anstieg der Phosphatkonzentration im Belebungsbecken 1 (Bio-P- und Denitrifikationsstufe) belegt ebenfalls den starken Frachtanstieg. Für die Phosphat-Elimination bedeutet die Stoßbelastung eine schnelle Verfrachtung des in der Bio-P-Phase zurückgelösten Phosphats in den Ablauf der biologischen Stufe. Die Folge der Verlagerung ist ein vermehrter Einsatz von

Fällmitteln, um den Überwachungswert von 1 mg/l einzuhalten. Die Dosierung von 200 l/h FeCl_3 beginnt bei 0,35 mg $\text{PO}_4\text{-P/l}$ und endet bei 0,3 mg/l. Im dargestellten Fall folgt daraus eine Fällmittelzugabe über etwa 3,5 Stunden.

Der Einfluss der Steuerung wird im Vergleich mit einem Regen vom 07.09.10 deutlich (Abbildung 37), der allerdings einen etwas kleineren Zulauf bewirkte.

Der schnelle Anstieg des TW-Zulaufs vom MWPW wird durch die Steuerung bereits nach wenigen Minuten gekappt. Der Vergleich mit dem rechnerischen unregulierten Zulauf lässt erkennen, dass die erste Zulaufspitze komplett abgefangen und die Spitze insgesamt um ca. 200 m^3/h gesenkt wurde. Durch die Speicherung von Teilen des Inhalts der Druckrohrleitung und des Spülstoßes wurde die Fracht vergleichmäßigt und wesentlich reduziert.

Der Anstieg der Ammonium-Konzentration lässt die verbliebene Frachtzunahme erkennen, die sich aber weniger als eine Stunde auswirkt, weil sich in der Zwischenzeit der Rücklaufschlammkreislauf verstärkt hat und die vergleichmäßigte Zulaufspitze so auf bereits angepasste Verhältnisse trifft.

Durch den langsameren Anstieg der Stickstofffracht kann die Gebläseleistung früher erhöht werden, so dass der Hauptfrachtstoß bereits auf eine größere Sauerstoffkonzentration trifft. Der Gebläsebetrieb bleibt dadurch in dem gewöhnlichen Intervallbetrieb. Bei unregulierten Stößen gehen die Gebläse über eine längere Zeit in Dauerbetrieb.

Das rückgelöste $\text{PO}_4\text{-P}$ im Belebungsbecken 1 zeigt wieder deutlich die Frachtzunahme. Im Ablauf der Belebungsstufe ergibt sich ein sehr viel kürzerer und niedrigerer Anstieg, der nur für 1,5 Stunden die Dosierung auslöst.

Der qualitative Vergleich der beiden Regenereignisse zeigt deutlich die Wirkung des Prozesssteuerungssystems. Ein quantitativer Vergleich und eine monetäre Bewertung sind aber nicht möglich, da Niederschlag und Zulauffracht nicht identisch sind.

Die Einflussfaktoren der neuen Steuerung sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 10: Einflussfaktoren der neuen Steuerung auf den Klärprozess

Einflussfaktor	ungeregelt	geregelt	ökonomischer Einfluss des PSS
Hydraulik	Anstieg des Zulaufs in wenigen Minuten auf das 3-fache der TW-Menge	Verzögerung und Reduzierung der Zulaufspitze	keiner
Fracht in der Druckrohrleitung vom MWPW	900 m ³ in TW-Konzentration fließen in wenigen Minuten der Kläranlage zu.	Ein großer Teil dieser Wassermenge wird im RRB Industriehafen zwischengespeichert.	zusätzliche Entleerungskosten
Spülstoß aus dem Kanalsystem	Der Spülstoß gelangt in kurzer Zeit vollständig in die Kläranlage.	Der erste Teil des Spülstoßes wird im RRB Industriehafen zwischengespeichert.	zusätzliche Entleerungskosten
Stickstoffabbau	Zulauffracht und Leistungsfähigkeit der Belebungsstufe passen kurzzeitig nicht zusammen.	Leistung der Belebungsstufe kann rechtzeitig angepasst werden.	bessere Ablaufwerte ggf. Reduzierung Abwasserabgabe
Phosphat	Störung der Bio-P-Prozesse durch schnelle Verlagerung in den Ablauf der Belebungsstufe, erhöhter Fällmitteleinsatz.	Bio-P-Effekt bleibt weitgehend erhalten, Fällmitteleinsatz im normalen Umfang.	geringerer Fällmitteleinsatz
Kläranlagenablauf	In Konzentrationsspitzen nähern sich die Ablaufwerte den Überwachungswerten.	Konzentrationsspitzen im Ablauf sind niedriger, Überwachungswerte werden deutlich unterschritten.	primär keiner (ggf. Abwasserabgabe reduzieren)
Pumpen (nur Rücklaufschlammumpen betroffen)	Kein Einfluss, das Schneckenpumpwerk läuft konstant ohne Mengenregelung.		keiner
Gebälse (kein Einfluss auf die Auslegung für max. Belastung)	Hohe Leistungen für die Spitzen erforderlich	gleichmäßigerer Betrieb	geringfügig geringerer Stromverbrauch

Bei allen genannten Einflussfaktoren steht die Erhöhung der Betriebssicherheit im Vordergrund. Die monetären Einflüsse sind mit Ausnahme der Abwasserabgabe als gering zu bewerten.

10.4 Bewertung monetärer Aspekte

Bei der Bewertung monetärer Auswirkungen des neuen Prozesssteuerungssystems spielen folgende Aspekte, die nachfolgend näher erläutert werden, eine wesentliche Rolle:

- Kosten für die Einrichtung des Prozesssteuerungssystems,
- Kosten für den Betrieb des Prozesssteuerungssystems,
- Einfluss auf die laufenden Kosten für das Entwässerungsnetz und die Kläranlage,
- Einfluss auf die Abwasserabgabe,
- Einsparung von Investitionen in die Abwasserinfrastruktur.

Kosten für die Einrichtung des Prozesssteuerungssystems

Prozesssteuerungsansätze für die Abwasserinfrastruktur erfordern ein hohes Niveau an technischer Ausstattung des Gesamtsystems. Dies deckt sich jedoch mit dem durch den technische Fortschritt angetriebenen Trend zu einer verstärkten mess-, regelungs- und kommunikationstechnischen Ausstattung. Moderne Messgeräte und Aggregate (Stellmotoren für Schieber, Pumpen etc.) sind heutzutage in der Regel bereits standardmäßig für den Anschluss an Fernwirktechnik vorausgerüstet.

Auch in Emmerich ist bei den durch die TWE erfolgten Vorarbeiten im Vorfeld zu diesem Vorhaben entsprechende Ausstattung für die neu angeschaffte Ausrüstung vorgesehen worden. Darüber hinaus musste zusätzliche Ausrüstung für die Herstellung des Prozesssteuerungssystems einschließlich der Kommunikationseinrichtungen und lokalen Steuerungen für die sieben Außenstationen beschafft werden. Insgesamt sind folgende Investitionskosten angefallen, die jedoch auch einige zusätzliche Messeinrichtungen einschließen, die vor allem im Hinblick auf die Begleituntersuchungen im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens eingesetzt wurden:

Vorleistungen der TWE:

- Erneuerung Pumpwerk Rheinpromenade 268.404,50 EUR

Das Pumpwerk Rheinpromenade wurde in den Jahren 2005 und 2006 mit neuen Pumpen und einer neuen Steuerung ausgestattet.

- | | |
|--|----------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> • <u>Erneuerung der Leit- und Steuerungstechnik der Kläranlage</u> <p>In den Jahren 2006 und 2007 wurde ein neues Prozessleitsystem auf der Kläranlage installiert, das auch die Einbindung der Außenstationen ermöglichte.</p> | 241.079,00 EUR |
| <ul style="list-style-type: none"> • <u>Modifizierte SPS und Datenfernübertragung</u> <p>Zwischen 2006 und 2007 wurden bei insgesamt 23 Außenstationen (Pumpwerke und Regenbecken) eine Erneuerung bzw. Erstausrüstung der Steuerung in Form einer SPS Siemens S7 vorgenommen.</p> | 208.272,06 EUR |
| <ul style="list-style-type: none"> • <u>Verbindungsbauwerke und -leitungen am RRB Industriehafen</u> <p>Die Verbindungsleitung zwischen dem RRB Industriehafen und der Druckrohrleitung vom MWPW zur Kläranlage wurde 2007/2008 gebaut und in Betrieb genommen und damit die wichtigste Voraussetzung für das Prozesssteuerungssystem geschaffen.</p> | 273.085,99 EUR |
| <ul style="list-style-type: none"> • <u>Regenwasserbehandlung Gewerbegebiet Ost (Vorwerk)</u> <p>Die Überprüfung des Systems ergab, anders als erwartet, keine nutzbaren Speicherkapazitäten.</p> | 1.675,00 EUR |
| <p>Vorleistungen der TWE (ohne MwSt.)</p> | <hr/> 992.516,55 EUR <hr/> |

Investitionen zur Einrichtung des Prozesssteuerungssystems:

- | | |
|--|----------------|
| <ul style="list-style-type: none"> • <u>Frachtmessungen PW Elten, PW Rheinpromenade, PW Vorwerk</u> <p>Aufbau von Messstationen u. a. in Containern, Anschaffung Messgeräte (Spektrometer), Entwicklung der separaten Messbehälter mit automatisiertem Reinigungssystem für die spektrometrischen Messungen des CSB im Rohabwasser.</p> | 336.422,18 EUR |
| <ul style="list-style-type: none"> • <u>Volumenstrommessungen</u> <p>Anschaffung und Installation von vier Messungen</p> | 40.723,20 EUR |

• <u>Lokale Niederschlagsmessungen</u>	9.438,44 EUR
Anschaffung und Installation von zwei Messungen	
• <u>Datenerfassung und Übertragungssysteme und</u>	5.604,93 EUR
<u>Ansteuerung von Pumpen und Schiebern (Vorwerk)</u>	
• <u>Online-Messungen auf der Kläranlage</u>	8.687,34 EUR
Anschaffung und Installation von Messungen u. a. NH ₄ -N	
• <u>Einbindung der Messsysteme ins PLS und Visualisierung</u>	46.131,31 EUR
Anbindung der Außenstationen ans PLS (Fernwirktechnik) und Visualisierung in der Warte	
	447.007,40 EUR
Investitionen insgesamt (ohne MwSt.)	447.007,40 EUR

Zusätzlich zu den Investitionen fielen die Kosten für Personal und Betriebsmittel der TWE sowie die Leistungen der Forschungsinstitute an.

Kosten für den Betrieb des Prozesssteuerungssystems

Durch die für das Prozesssteuerungssystem installierte Technik entstehen zusätzliche laufende Betriebskosten, die sich im Wesentlichen aus den Kosten für die Datenkommunikation mit den Außenstationen, für Energieverbrauch von EMSR-Technik und Pumpen sowie für Wartung und Instandsetzung der Ausrüstung ergeben.

Wie bereits im Kapitel 9.4 zum Energieverbrauch ausgeführt, beschränkt sich der Energie-mehrverbrauch neben geringfügigen Beträgen für Mess- und Regelungstechnik vor allem auf Pumpleistungen im RRB Industriehafen. Es kann, je nach Anzahl der regelbaren Regenereignisse von 560 kWh/Mon. ausgegangen werden.

Für Wartung und Instandhaltung fallen Materialkosten für Ersatzteile und Verbrauchsmaterial sowie Personalkosten für die Durchführung von Wartungsarbeiten, insbesondere Reinigung und Kalibrierung von Messeinrichtungen, an. Im vorliegenden Projekt hat sich ein hoher Personalaufwand vor allem bei den Konzentrationsmessungen für die Frachtregelung gezeigt, insbesondere für die Reinigung und Kalibrierung der Sonden. Dies resultierte vor allem aus dem hohen Anteil an industriellem Abwasser. Die Problematik ist in Kapitel 9.1.1 erläutert. Für Kanalnetze mit überwiegend kommunalem Abwasser kann der Aufwand durchaus geringer sein. Grundsätzlich ist im Rahmen der Einfahrphase eines neuen Prozesssteuerungssys-

tems zu prüfen, inwieweit sich Messintervalle ggf. verlängern lassen, um die Kosten insbesondere bei nasschemischen Untersuchungen zu minimieren.

Zusammenfassend ergeben sich im konkreten Projekt die laufenden Kosten für den Betrieb des Gesamtsystems mit sieben Außenstationen überschlägig wie folgt (es sind nur die für den regelmäßigen Betrieb des neuen Prozesssteuerungssystems notwendigen Kosten berücksichtigt, erhöhter Aufwand für zusätzliche Begleituntersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens sind hier nicht erfasst):

Kommunikationskosten je Außenstelle	GSM:	10,00 EUR/Mon.
	DSL:	20,00 EUR/Mon.
Energieverbrauch (Pumpen, EMSR-Technik)		95,20 EUR/Mon.
Materialkosten (Ersatzteile, Austausch von Sonden etc.):		1.300,00 EUR/Mon.
Personalkosten (Wartung, zusätzliche Kontrollen, Reinigung von Messeinrichtungen etc.):		1.070,00 EUR/Mon.

Die genannten Werte belegen den hohen Aufwand für die Frachtmessungen. Zusätzlich zu beachten sind neben den o. g. direkten Kosten für die EMSR-Technik auch indirekte Kosten, die durch verstärkte Schulungs- und Sensibilisierungsmaßnahmen für das Betriebspersonal, ggf. sogar die Einstellung und Einarbeitung neuer Mitarbeiter mit dem erforderlichen technischen Know-how resultieren können.

Einfluss auf die laufenden Kosten für das Entwässerungsnetz und die Kläranlage

Abgesehen von den o. g. direkt mit dem Steuerungssystem verbundenen Kosten für zusätzliche Wartungs- und Instandhaltungsaufgaben sowie den zusätzlichen Pumpkosten entstehen keine weiteren laufenden Kosten im Kanalnetz.

Auf der Kläranlage ergeben sich die oben beschriebenen Vorteile, die dort keine zusätzlichen Kosten bewirken, aber auch zu keinen nennenswerten Einsparungen führen. Lediglich beim Fällmittelbedarf ergeben sich tendenziell Reduzierungen.

Einfluss auf die Abwasserabgabe

Durch die neue Steuerung gelingt es, den Zulauf zur angeschlossenen Kläranlage zu ver gleichmäßigen. Dadurch wird der Betrieb der Kläranlage verbessert, mit positiven Auswirkungen auf die Reinigungsleistung. Weil die Kläranlage im Hinblick auf Stoßbelastungen bereits teilweise an ihrer Kapazitätsgrenze angelangt war, spielt die Vermeidung von erhöhter Abwasserabgabe bei Überschreitungen des Überwachungswerts, beispielsweise ausgelöst

durch hohe Frachtbelastungen oder gar Havariefälle, eine wichtige Rolle im Risikomanagement der Anlage. Dazu leistet das neue Steuerungssystem einen wichtigen Beitrag.

Bei einer dauerhaften Verbesserung der Ablaufsituation der Kläranlage ist durch die TWE zu überdenken, ob für relevante Parameter eine Absenkung gemäß Abwasserabgabegesetz § 4 (5) erklärt werden kann, um die laufenden Kosten für die Abwasserabgabe zu senken.

Aufgrund der kurzen Betriebsphase mit dem neuen Prozesssteuerungssystem lassen sich diesbezüglich aber gegenwärtig noch keine belastbaren Angaben machen. Eine Heruntererklärung um 20 % für $N_{\text{ges.}}$ von 13 mg/l auf 10 mg/l ist zu prüfen, da sie auch eine Verrechnung der Investitionen mit der Abwasserabgabe erlauben würde.

In Emmerich werden aber durch Industrieeinleitungen unabhängig von den Regenspitzen Konzentrationsschwankungen im Kläranlagenablauf verursacht, die eine Reduzierung der Überwachungswerte erschweren. Entscheidungen zur Abwasserabgabe können daher erst nach längerer Betriebserfahrung mit der neuen Steuerung getroffen werden.

Einsparung von Investitionen in die Abwasserinfrastruktur

Durch die Steuerung des Entwässerungsnetzes können im Bereich der Niederschlagswasserbehandlung vorhandene Reserven an Beckenvolumen im Gesamtsystem aktiviert werden, die bei einem statischen System ohne Steuerung nicht zur Verfügung stehen würden. Dadurch können Investitionen in zusätzliches Beckenvolumen vermindert werden. Im Zuge des Forschungsvorhabens wurden für das Emmericher Entwässerungsnetz insgesamt 2.784 m³ an freiem Volumen ermittelt, die durch das neue Prozesssteuerungssystem bewirtschaftet und für die Verbesserung des Kläranlagenzulaufs verwendet werden. Kostenmäßig macht das aktivierte Volumen bei Baukosten von rd. 300 EUR/m³ Beckenvolumen eine theoretische Summe von 835.000 EUR aus. Dem stehen die o. g. Kosten für die EMSR-Technik und die Baukosten für die Herstellung der Anbindung der Hauptdruckleitung zur Kläranlage an das RRB Industriehafen in Höhe von netto 273.100 EUR gegenüber.

Die Aktivierung des Beckenvolumens erspart mittelfristig durch die Verbesserung des Kläranlagenzulaufes auch Ausbau- oder Modernisierungsmaßnahmen auf der Kläranlage.

10.5 Bewertung nichtmonetärer Aspekte

Im Laufe der Projektlaufzeit haben sich die nichtmonetären Aspekte des Vorhabens zunehmend als dominant erwiesen. Folgende Aspekte spielen eine wesentliche Rolle:

- Betriebssicherheit und Risikominimierung für Grenzwertüberschreitungen,
- Kontrolle des Entwässerungssystems,
- Dokumentation von Betriebszuständen,
- Anpassung an veränderte Entwässerungssituationen,
- Anpassung an Klimawandel (Pufferung von Starkregenereignissen).

Die Aspekte werden nachfolgend einzeln erläutert.

Betriebssicherheit und Risikominimierung für Grenzwertüberschreitungen

Bei hydraulischen Stoßbelastungen braucht die Kläranlage aufgrund von Fließzeiten und Puffervolumen nach Erfahrungen des Betriebspersonals ca. 30 Minuten bis zur Adaption an die neue Situation (bezüglich Hydraulik, Belüftung, Rücklaufschlammförderung etc.). Bedingt durch den Aufbau des Kanalnetzes in Emmerich mit Zuführung der Wassermengen über Pumpwerke steigt im Regenwetterfall der Zulauf zur Kläranlage jedoch innerhalb weniger Minuten um ein Vielfaches an - typisch sind Anstiege auf den dreifachen Trockenwetterzulauf. Obwohl die Kläranlage über ausreichende Kapazitäten verfügt, um die anfallenden Wassermengen zu verarbeiten, treten speziell zu Beginn eines Regenereignisses Betriebsprobleme auf der Anlage auf. Ursächlich können sowohl hydraulische als auch frachtmäßige Stoßbelastungen, beispielsweise nach einer längeren Trockenperiode, genannt werden. Die stoßartigen Änderungen der Zulaufsituation verringern die Betriebsstabilität deutlich. Eine der Motivationen für das vorliegende Vorhaben war die Forderung, diese Situation zu verbessern. Da die betrieblichen Eingriffsmöglichkeiten auf der Kläranlage selber weitgehend ausgeschöpft waren, bietet die Optimierung der Zulaufsituation eine sinnvolle Möglichkeit zur Verbesserung der Situation auf der Kläranlage.

Durch die neue Steuerung des Gesamtsystems wird eine Vergleichmäßigung des Zulaufes ermöglicht. Dadurch konnte die Sicherheit für die Einhaltung der Ablaufwerte für die TWE deutlich erhöht werden, sowohl im Hinblick auf umweltrechtliche als auch wirtschaftliche Risiken, letztere vor allem im Zusammenhang mit der Abwasserabgabe bei Überschreitungen der Überwachungswerte (siehe oben).

Als weiteren positiven Effekt des neuen Systems hat sich die Möglichkeit zur Verringerung von Niedrigtemperaturspitzen beim Winterbetrieb gezeigt, welche zu problematischen Dichteströmungen in der Nachklärung führen können. Durch die neuen Eingriffsmöglichkeiten kann gezielt kaltes Wasser (z. B. Schmelzwasser nach Frostperioden und Schneefall) zurückgehalten und dosiert der Kläranlage zugeführt werden.

Darüber hinaus bietet die Steuerung Puffermöglichkeiten für Störfälle und besondere Betriebszustände, z. B. hohe Frachtbelastungen oder Wartungsarbeiten auf der Kläranlage. Dies hat sich in der Projektpraxis bereits mehrfach bewährt.

Hinzuweisen ist allerdings darauf, dass Überschreitungen bei Ablaufwerten aufgrund von außergewöhnlichen Starkregenereignissen sich durch Abwasser-Prozesssteuerungssysteme i. d. R. nicht vermeiden lassen, da eine Steuerung bei Vollfüllung aller Becken nicht mehr möglich ist.

Kontrolle des Entwässerungssystems

Die Ausstattung des Entwässerungssystems mit Mess- und Datenübertragungstechnik ermöglicht dem Betriebspersonal von der zentralen Warte aus eine durchgängige Übersicht über den Zustand des Gesamtsystems sowie einzelner Außenstationen. Bei Havariefällen bestehen über die Fernwirktechnik zudem Möglichkeiten für einen manuellen Eingriff, um z. B. belastetes Abwasser zwischenzupuffern.

Fehler im System, die früher oft erst mit großer Zeitverzögerung bei Kontrollfahrten oder Wartungseinsätzen festgestellt worden wären, werden nun durch die Überwachungstechnik sofort visualisiert. Zu Beginn des Vorhabens zeigte sich, dass dies zunächst zu vielen Fehlalarmen führen kann, wenn z. B. lediglich die Datenübertragung ausgefallen ist, ohne dass die eigentliche, abwassertechnisch relevante Ausrüstung betroffen war. Durch gezielte Anpassungen der Sicherheitsmechanismen für die Kommunikations- und Regelstreckenüberwachung (Kapitel 8.2) konnten solche Fehlalarme jedoch weitgehend ausgeschlossen werden.

Dokumentation von Betriebszuständen

Anknüpfend an vorgenannten Punkt ermöglicht die zentrale Überwachung des Gesamtnetzes über die EDV auch eine automatisierte, lückenlose Zusammenfassung und Archivierung von Daten über Betriebszustände und Störungen. Diese können sowohl für Dokumentationszwecke im Sinne der Eigenüberwachung (beispielsweise gemäß Anforderungen der SÜwV Kan bzw. SÜwV-kom) und darüber hinaus für gezielte Auswertungen im Hinblick auf Betriebsoptimierungen eingesetzt werden.

Anpassung an veränderte Entwässerungssituationen

Bedingt durch die Einführung der Niederschlagswassergebühr für versiegelte Oberflächen im Rahmen der gesplitteten Abwassergebühr kommt es zu einer zunehmenden Abkoppelung von abflusswirksamen Flächen im Einzugsgebiet. Rechnerisch führt dies zu einer Zunahme von Reservekapazitäten in den Regenbecken, die aufgrund der neuen Steuerungsmöglichkeiten durch einfache softwaretechnische Anpassungen für eine Optimierung des Gesamtsystems genutzt werden können.

Anpassung an Klimawandel (Pufferung von Starkregenereignissen)

Die Möglichkeit einer verbesserten Pufferung bei mutmaßlich zunehmenden Starkregenereignissen konnte im laufenden Vorhaben nicht bestätigt werden. Bei Regenereignissen mit einer Jährlichkeit von über zwei Jahren bestehen wegen des Füllungsgrades der Becken faktisch keine hydraulischen Steuerungsmöglichkeiten mehr. Bei deutlich darüber hinausgehenden Ereignissen ist eine zusätzliche Pufferung mangels freiem Beckenvolumen daher nicht möglich. Einziger Ansatz wäre bei Erwartung eines Starkregenereignisses ein beschleunigtes Entleeren von teilgefüllten Regenbecken, sofern dies pumptechnisch realisierbar und eine zuverlässige Prognose des Regenereignisses möglich wäre.

10.6 Fazit

Grundsätzlich zeigt sich, dass sich die Datenlage für ökonomische Untersuchungen sehr komplex und stark begrenzt darstellt, vor allem weil aufgrund der kurzen Dauer des Regelbetriebs mit dem neuen System derzeit zu wenig belastbare Daten verfügbar sind. In der Tabelle 11 sind die zu berücksichtigenden Einflussgrößen und ihre Wirkung zusammengefasst.

Die Projektergebnisse zeigen in der Tendenz bereits deutlich, dass durch die Einführung des neuen Steuerungssystems bei Berücksichtigung aller Investitions- und Betriebskosten unter den Randbedingungen in Emmerich rein monetär keine Einsparungen erzielt werden, weil das Potenzial in der Verringerung der Abwasserabgabe aus anderen Gründen zurzeit nicht genutzt werden kann. (Ausnahme: Vermeidung des Neubaus eines Speicherbeckens durch Nutzung von vorhandenen Beckenvolumen.) Jedoch treten diverse nichtmonetäre Zielparameter, wie die Steigerung der Betriebssicherheit, die Vergleichmäßigung des Kläranlagenbetriebs, die Verringerung des Abwasserabgaberisikos und eine deutlich verbesserte Kontroll- und Dokumentationssituation in den Vordergrund. Kurzfristig werden keine direkten Auswirkungen durch die neue Steuerung auf die Abwassergebühren bzw. -entgelte erwartet. Langfristig sind jedoch Einsparungen im Bereich der Investitionskosten für zusätzliches Regenbeckenvolumen oder Kläranlagenerweiterungen sowie bei der Abwasserabgabe möglich.

Tabelle 11: Einflussgrößen des PSS und ihre monetären Auswirkungen

Einflussgröße	Beschreibung	monetäre Auswirkungen
monetäre Aspekte		
Kosten für die Einrichtung des PSS : Vorleistungen TWE	Leistungsfähige Leit- und Steuerungstechnik mit Datenfernübertragung ist Voraussetzung für PSS	abhängig vom Anlagenstand, ggf. hohe Kosten
Kosten für die Einrichtung des PSS: Investitionen für das PSS	Frachtmessungen aufwendig, N-A Messung weniger Aufwand, Fernwirktechnik bei vorhandener Datenfernübertragung leicht implementierbar	Frachtmessungen: hohe Kosten, N-A Messungen: geringere Kosten Fernwirktechnik: geringe Kosten
Kosten für den Betrieb des PSS	Kosten für Kommunikation, Pumpenenergie, Wartung und Instandhaltung,	geringe Kosten
Einfluss auf die laufenden Kosten für das Entwässerungsnetz und die Kläranlage	Im Kanalnetz: keine, Bei der Kläranlage: geringe Einsparungen beim Fällmitteleinsatz	sehr geringe Einsparungen
Einfluss auf die Abwasserabgabe	Ein stabilerer Ablauf erlaubt Herunterklärung mit deutlichen Einsparungen (in Emmerich Einschränkung durch Einflüsse aus Industrieabwasser)	ggf. sehr hohe Einsparungen
Einsparung von Investitionen in die Abwasserinfrastruktur	Statt eines Ausbaus der Kläranlage Nutzung der vorhandenen Potenziale im Kanalnetz	In Emmerich sehr hohe Einsparungen
nichtmonetäre Aspekte		
Betriebssicherheit und Risikominimierung für Grenzwertüberschreitungen	Vermeidung von Stoßbelastungen im Zulauf zur Kläranlage führt zu stabilen Ablaufwerten	kein Einfluss
Kontrolle des Entwässerungssystems	ständiger Überblick in zentraler Warte, sofortiger Eingriff (z. B. Havariefälle)	kein Einfluss
Dokumentation von Betriebszuständen	Verbesserung der Eigenüberwachung und Daten zur Betriebsoptimierung	indirekter Einfluss zur Kostenvermeidung
Anpassung an veränderte Entwässerungssituationen	Abkoppelungen von Flächen vom Kanalnetz führt zu Überkapazitäten im Kanal und bei Regenbecken, die sinnvoll genutzt werden können	volle Nutzung von Investitionen
Anpassung an Klimawandel (Pufferung von Starkregenereignissen)	Bei Ereignissen mit einer Jährlichkeit von mehr als zwei Jahren keine hydraulischen Steuerungsmöglichkeiten mehr	kein Einfluss

11 Zusammenfassung und Gesamtbewertung

Im Rahmen des vom Land NRW geförderten Forschungsvorhabens sollte ein neues Prozesssteuerungssystem zur Optimierung des Abwasserabflusses im Hinblick auf eine Verbesserung der Zuflusssituation und Betriebssituation der Kläranlage sowie die Verbesserung der ökologischen und wirtschaftlichen Situation entwickelt werden. Anhand der in Kapitel 2 dargestellten Projektziele und der Ökonomischen Aspekte in Kapitel 10 ergibt sich folgende Gesamtbewertung:

1) Erarbeitung eines robusten, lernfähigen Steuerungssystems mit selbständiger Anpassung an Veränderungen von Eingangs- und Zustandsgrößen.

Aufbauend auf Vorleistungen der TWE, wie den Einbau fernwirkfähiger Aggregate im Entwässerungsnetz, ist dazu die technische Infrastruktur für das neue Steuerungssystem mit den erforderlichen Mess-, Kommunikations- und Datenverarbeitungseinrichtungen errichtet worden. Parallel erfolgten die softwaretechnische Entwicklung und die Implementierung des Steuerungskonzepts in Form eines innovativen Agentensystems.

Das Agentensystem hat sich grundsätzlich als Steuerungsverfahren bewährt. Es ist sehr flexibel und in der Lage, sich bei entsprechender Konfiguration auf Veränderungen von Eingangs- und Zustandsgrößen selbsttätig anzupassen. Mit dem entwickelten Prozesssteuerungssystem konnten die Projektziele weitgehend erreicht werden. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf die Steuerung des Kläranlagenzuflusses entsprechend der hydraulischen und frachtmäßigen Belastungssituation und die damit verbundene Verbesserung der Betriebsstabilität der Kläranlage. Diese angestrebte optimierte Nutzung der im Vorfeld identifizierten verfügbaren Speichervolumen ließ sich für sieben Regenbecken des Emmericher Entwässerungsnetzes realisieren.

2) Optimierung, d. h. Vergleichmäßigung des Kläranlagenzuflusses entsprechend der hydraulischen und frachtmäßigen Belastungssituation sowie eine damit verbundene Verbesserung der Betriebsstabilität der Kläranlage.

Die verbesserte Zuflusssituation hat zu einer Verbesserung der Betriebssicherheit der Kläranlage und damit zu einer Minimierung des Risikos von Grenzwertüberschreitungen geführt. Dies wird auch dadurch gestützt, dass durch die Modernisierung der Steuerungs- und Leittechnik eine zentrale Kontrolle und Eingriffsmöglichkeiten auf das gesamte Entwässerungssystem sowie eine zentrale Verarbeitung und Dokumentation aller abwassertechnischen Daten im Sinne der Eigenüberwachung möglich wurde.

Als problematisch hat sich der Bereich der Online-Messtechnik für Frachtbestimmungen erwiesen. Über weite Strecken der Projektlaufzeit zeigten sich große Probleme bei der Stabilität und Zuverlässigkeit der Messergebnisse sowie ein hoher Aufwand für Wartungsarbeiten an den Messsonden. Letztlich wurde auf die Nutzung der Absolutmesswerte verzichtet und für die Frachtbestimmungen nur die Messwerttendenz in die Steuerung übernommen.

3) Minimierung der Gewässerbelastung aufgrund von Mischwassereinleitungen durch Verringerung von Abschlagshäufigkeiten und -frachten aus Regenbecken zur Entlastung der schwachen Vorfluter im Stadtrandbereich.

Bezüglich der Auswirkungen des neuen Steuerungssystems auf den Gewässerschutz haben sich für die spezifische Emmericher Situation keine nennenswerten Veränderungen bei der Entlastungsrate der Regenbecken ergeben. Es konnte keine Verbesserung gegenüber der vorherigen Entlastungsrate nachgewiesen werden. Dies resultiert auch daher, dass die Ziele der Vergleichmäßigung des Kläranlagenbetriebs und der Senkung der Entlastungsrate konträr sind, da beide zusätzliches Beckenvolumen beanspruchen. Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wurde die Vergleichmäßigung des Kläranlagenzuflusses als vorrangig definiert, da hier die größten Optimierungspotentiale in der Gesamtabwägung gesehen wurden.

4) Optimale Nutzung des vorhandenen Speichervolumens im Kanalnetz und in den Sonderbauwerken, wobei für jeden Betriebszustand eine optimale Regelstrategie automatisch ausgewählt wird.

Für die bisher durch das PSS gesteuerten Ereignisse konnten im Kanalnetz bisher ungenutzte freie Speichervolumen optimal ausgenutzt werden. Dabei wurden die als Sicherheitsmechanismus hinterlegten begrenzten Speichervolumen von 80 % des Gesamtspeichervolumens bei keinem Becken erreicht. Oftmals lag das genutzte Volumen lediglich im Bereich von 20 % des gesamtvorhandenen Volumens. Lediglich im Bereich des Beckens Industriehafen wurden teilweise bis zu 50 % des Volumens genutzt.

5) Zentrale Zusammenfassung, Archivierung und Verarbeitung aller Daten der abwassertechnischen Anlagen.

Vor Einführung der Datenfernübertragung wurden Betriebsstunden von Pumpen, Durchflussmengen und Störmeldung bei den regelmäßigen Betriebsinspektionen vor Ort handschriftlich in Listen eingetragen. Das Prozesssteuerungssystem erfasst alle diese Daten zentral auf der Kläranlage. Durch redundante Rechner wird eine hohe Sicherheit bei der Speicherung gewährleistet.

Die zentrale Speicherung erlaubt nicht nur jederzeit einen aktuellen Überblick über den Betriebszustand der Kläranlage und aller Außenstationen, sondern auch rückwirkend eine qualifizierte Ursachenforschung bei aufgetretenen Störungen. Damit wird auch im Sinne der SÜwV Kan und SÜwV-kom eine umfassende Dokumentation des Betriebes der Abwasseranlagen ermöglicht und die Qualität des Betriebes durch schnellere Wahrnehmung von Störungen und qualifizierte Behebung deutlich gesteigert.

Zu 1) bis 5) - Ökonomische Aspekte des Projektsteuerungssystems

Insgesamt haben die bisherigen Betriebsergebnisse gezeigt, dass bei der Einführung des neuen Prozesssteuerungssystems nichtmonetären Zielparametern wie die genannte Steigerung der Betriebssicherheit, die Vergleichmäßigung des Kläranlagenbetriebs oder die Risikoverringering von Überwachungswertüberschreitungen eine deutlich höhere Bedeutung zukommt, als einem rein kostenmäßigen Vergleich. Durch die Einführung des neuen Systems lassen sich tendenziell bei Berücksichtigung aller Investitions- und Betriebskosten keine kurzfristigen Einsparungen darstellen. Dies resultiert auch aus dem erforderlichen höheren Wartungsniveau der technischen Infrastruktur, als dies ohne die automatisierte Überwachung üblicherweise erfolgt.

Letztlich führt das neue System zu keinen direkten und kurzfristigen Auswirkungen auf die Abwassergebühren. Langfristig sind jedoch Einsparungen im Bereich der Investitionskosten für zusätzliches Regenbeckenvolumen oder Ausbauten auf der Kläranlage sowie bei der Abwasserabgabe denkbar.

Losgelöst von den monetären Fragen lässt sich in Summe feststellen, dass das Abwassersystem in Emmerich durch die automatische Abwasser-Prozesssteuerung sowie verbesserte Kontroll-, Eingriffs- und Dokumentationsmöglichkeiten eine deutliche funktionale Aufwertung erfahren hat.

6) Übertragbarkeit des entwickelten Systems auf andere Kommunen gleicher Größenordnung.

Die Wahl des Agentensystems als Basis für das neue Prozesssteuerungssystem des Entwässerungssystems in Emmerich erfolgte nicht zuletzt auch im Hinblick auf die Frage der Übertragbarkeit der Projektergebnisse. Gegenüber vergleichbaren Verfahren wie Fuzzy-Logik und Genetische Algorithmen für dynamische und hochgradig nichtlineare Prozesse zur Bestimmung der optimierten Stellgrößen der Kanalnetzsteuerung, hat das Agentensystem den entscheidenden Vorteil, dass es deutlich einfacher auf die individuellen Anlagen und Randbedingungen zu konfigurieren und parametrieren ist.

Ein weiterer Vorteil der gewählten Umsetzung ist die Nutzung von Standard-Industrieschnittstellen (z. B. OPC), durch die eine herstellerunabhängige Realisierung auch in einem anderen Hardware-Umfeld möglich ist.

Das Ziel der Übertragbarkeit des entwickelten Systems auf andere Entwässerungsnetze von vergleichbarer Größenordnung wie in Emmerich wird daher als voll erfüllt angesehen.

Bezüglich des beschriebenen Aufwands bei der Realisierung der Messtechnik für die Frachtkomponente des Steuerungssystems ist eine pauschale Übertragung aufgrund der spezifischen Randbedingungen, z. B. der Abwasserzusammensetzung, nicht möglich. In Emmerich besteht die besondere Situation eines sehr hohen Industrieabwasseranteils von 80 %. Für Kanalnetze mit überwiegend kommunalen Einleitungen kann der Aufwand durchaus geringer sein, als im vorliegenden Fall.

In Summe haben die Projektergebnisse in Emmerich gezeigt, dass sich durch die Einführung des neuen Systems, unter Berücksichtigung aller Investitions- und Betriebskosten tendenziell keine Einsparungen darstellen lassen. Langfristig sind jedoch positive finanzielle Wirkungen im Bereich der Investitionskosten für zusätzliches Regenbeckenvolumen und bei der Abwasserabgabe möglich. Wenn für ein Entwässerungsnetz wasserrechtlich explizit die Schaffung von Regenbeckenvolumen gefordert wird, kann die Verringerung von Investitionskosten durch ein angepasstes Steuerungssystem zu einem wirtschaftlich deutlich positiven Gesamtergebnis führen.

11.1 Ausblick

Die zunehmende Abkoppelung von entwässerten Oberflächen aufgrund der Einführung der gesplitteten Abwassergebühr und Rückbaueffekte durch abnehmende Bevölkerungszahlen aufgrund des demographischen Wandels lassen zukünftig bei der Überrechnung von bestehenden Regenbecken weitere Reserven erwarten, die für die Bewirtschaftung genutzt werden können. Gleichzeitig wird der anhaltende Kostendruck dazu führen, nach Alternativen für Investitionen und Reinvestitionen in Beckenvolumina zu suchen. Hier bieten intelligente Prozesssteuerungssysteme für die optimierte Ausnutzung bestehender Speichervolumina zukünftig einen guten Ansatz.

Zwar erfordern solche Steuerungsansätze für die Abwasserinfrastruktur ein hohes Niveau an technischer Ausstattung des Gesamtsystems. Dies deckt sich jedoch mit dem durch technischen Fortschritt angetriebenen Trend zu einer zunehmenden mess-, regelungs- und kommunikationstechnischen Ausstattung in Entwässerungsnetzen aller Größen. Moderne Messgeräte

und Aggregate (Stellmotoren für Schieber, Pumpen etc.) sind heutzutage zudem in der Regel bereits standardmäßig für den Anschluss an Fernwirktechnik vorausgerüstet. Gleichzeitig sind in den letzten Jahren die Entgelte für kommerzielle Datenübertragung stark gesunken, bei gleichzeitiger Steigerung der Übertragungsraten. Es wird daher erwartet, dass sich langfristig automatisierte Steuerungssysteme für einen optimierten Betrieb von Entwässerungssystemen, wie im vorliegenden Projekt entwickelt und demonstriert, zunehmend etablieren.

Literatur

- AbwAG (2005): Gesetz über Abgaben für das Einleiten von Abwasser in Gewässer, Abwasserabgabengesetz - AbwAG. Vom 18. Januar 2005(BGBl. I, S. 114), zuletzt geändert am 11. August 2010 (BGBl. I, S. 1163).
- Antoni, M.; Bongards, M.; Stockmann, A. (2010): Steuerung des Kanalnetzes der Stadt Emmerich am Rhein durch ein Software-Agentensystem. In: Klar! Information für die Mitglieder des DWA-Landesverbandes NRW, H. 21, S. 26-28.
- Antoni, M.; Stockmann, A.; Trauer, O. (2009): Erfahrungsbericht zur Steuerung des Kanalnetzes der Stadt Emmerich mit einem Software-Agenten-System. In: VDI (Hg.): Mess- und Steuerungstechnik in abwassertechnischen Anlagen. Fachtagung in Wuppertal. VDI-Berichte, 2073, Düsseldorf: VDI-Verlag.
- ATV-A 121 (1985): Niederschlag - Starkregenauswertung nach Wiederkehrzeit und Dauer, Niederschlagsmessungen, Auswertung. Arbeitsblatt 121, Abwassertechnische Vereinigung e. V. (ATV), Hennef, Ausgabe: Dezember 1985.
- ATV-DVWK-A 198 (2003): Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen. Arbeitsblatt 198, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (ATV-DVWK) Hennef, Ausgabe: April 2003.
- ATV-DVWK (2004b): Arbeitsbericht "Bewertung der hydraulischen Leistungsfähigkeit bestehender Entwässerungssysteme" der ATV-DVWK-Arbeitsgruppe ES-2.1 "Berechnungsverfahren", Korrespondenz Abwasser - Abfall, 2004 (51), Nr. 1.
- DWA-A 117 (2006): Bemessung von Regenrückhalteräumen. Arbeitsblatt 117, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef, Ausgabe: April 2006.
- DWA-A 118 (2006): Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen. Arbeitsblatt 118, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef, Ausgabe: März 2006.
- DWA-M 180, Handlungsrahmen zur Planung der Abflusssteuerung in Kanalnetzen. Merkblatt 180, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef, Ausgabe: Dezember 2005.
- Ebel, Bongards, McLoone (2006) State based control of wastewater treatment plants - Evaluation of the algorithm in a simulation study. 6th International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS 06') and the 4th Conference on Neuro-Computing and Evolving Intelligence (NCEI 06'). URL <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/HIS.2006.68>.
- Harbach, M. (2004): Ökonomische Aspekte der Bereitstellung von Wasser. Diplomica.
- Hilmer, T. (2008): Wasser in der Gesellschaft - Integrierte Optimierung von Kanalisationssystemen und Kläranlagen mit Computational Intelligence Tools. Dissertation von T. Hilmer, 2008.
- Hilmer, T. (2008): *Water in Society : Integrated Optimisation of Sewerage Systems and Wastewater Treatment Plants with Computational Intelligence Tools*. Dissertation. Heerlen, Open University Nederland. Dissertation. 2008. URL <http://dnb.ddb.de>. - Aktualisierungsdatum: 2008.

- Hilmer, T.; Bongards, M. (2008): *Integrierte Steuer- und Regelstrategien für Kanalnetz und Kläranlage*. 9. Kölner Kanal- und Kläranlagenkolloquium vom Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen; Tagungsband. Aachen, 2008. - 9. Kölner Kanal- und Kläranlagenkolloquium vom Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen; Tagungsband.
- Kather, A. (2009): Auswertung der Niederschlags- und Abflussdaten des Ortsteils Elten zum Nachweis des Fremdwasseranteils und der Kalibrierung des hydrodynamischen Modells, Hochschule Bochum, Institut für Siedlungswasserwirtschaft / Institut für Umwelttechnik und Management an der Universität Witten / Herdecke gGmbH, Diplomarbeit 2009, unveröffentlicht.
- Rudolph, K.-U.; Harbach, M. (2010): Angepasste ökonomische Methoden. In: H. Orth et al. (Hrsg.): Leitfaden zur Abwassertechnologie in anderen Ländern, Kap. 4.2, Ruhr-Universität Bochum, 2010.
- Pabst, M. ; Beier, M. ; Rosenwinkel, K.-H. ; Schütze, M. ; Peikert, D. (2009): Adaption und Entwicklung einer vorkonfektionierten Steuerbox zur Abflusssteuerung von Kanalnetzen (ADESBA). In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.): Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen : Fachtagung Wuppertal 17. und 18. November 2009. Düsseldorf : VDI-Verl., 2009 (VDI-Berichte, 2073) - ISBN 978-3-18-092073-3, S. 201-213.
- Rudolph, K.-U.; Harbach, M.; Kehl, O.; Schmidlein, F. (2010): Monetäre und nicht monetäre Auswahlkriterien. In: H. Orth et al. (Hrsg.): Leitfaden zur Abwassertechnologie in anderen Ländern, Kap. 4.5.3, Ruhr-Universität Bochum, 2010.
- Schmitt, T.; Illgen, M. (2001) : Abflussbeiwerte in der Bemessung und Abflusssimulation von Entwässerungsanlagen, Korrespondenz Abwasser - Abfall, 2001 (48), Nr. 12.
- Schmitt, T.; Becker, M.; Flores, C.; Pfeiffer, E.; Sitzmann, D. und Uhl, M. (2008): Modellkalibrierung zur Qualitätssicherung von Kanalnetzberechnungen, Korrespondenz Abwasser - Abfall, 2008 (55), Nr. 12.
- Sitzmann, D. (2001): Konzeption, Abwicklung und Auswertung großer Kanalisationsmesskampagnen (Erfahrungsbericht), Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium 2001, Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft Heft 128, Technische Universität Darmstadt, 2003.
- Stockmann, A.; Trauer, O.; Wolf, C.; Kern, P.; Bongards, M. (2009): Agentensystem in der Abwassertechnik. Forschungsbericht der Fachhochschule Köln, S. 132-135. Köln.
- SüwV Kan (1995): Verordnung zur Selbstüberwachung von Kanalisationen und Einleitungen von Abwasser aus Kanalisationen im Mischsystem und im Trennsystem - Selbstüberwachungsverordnung Kanal, Nordrheinwestfalen, 16.01.1995.
- SüwV-kom (2004): Verordnung über Art und Häufigkeit der Selbstüberwachung von kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen und -einleitungen - Selbstüberwachungsverordnung kommunal, Nordrheinwestfalen, 25.05.2004.
- Verworn, H.-R. (1999): Die Anwendung von Kanalnetzmodellen in der Stadthydrologie. Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz (SuG), H. 18, 1999.
- Weiß, Jakob (2005) Agentenorientierte Softwareentwicklung : Methoden und Tools ; mit 78 Tabellen. Berlin : Springer, 2005 (Xpert.press).

Anlage 1

Lageplan mit Einzugsgebieten

Anlage 2

Entwässerungsfließbild

Anlage 3

Einzugsgebiet RRB Industriehafen

Anlage 4

Fließbild RRB Industriehafen

Anlage 5

Lageplan der Kläranlage

Anlage 6

Fragebogen für die Dokumentation von Forschungsvorhaben in der Umweltforschungsdatenbank UFORDAT®