

Steuerung eines Entwässerungssystems mit Hilfe eines regelbasierten Systemes

A. Khelil*, M. Albrecht**, J. Broll-Bickhardt**

* Dr.-Ing. A. Khelil



INGENIEURGESELLSCHAFT
FÜR STADTHYDROLOGIE MBH

ifs

Vahrenwalder Str. 7
30165 Hannover

Tel.: 0511-93 57 250
Fax: 0511-93 57 100

** Dipl.-Ing. M. Albrecht
Dipl.-Ing. J. Broll-Bickhardt

Bremer Entsorgungsbetriebe
Hinter dem Ansgarikirchhof 8
28195 Bremen

STEUERUNG EINES ENTWÄSSERUNGSSYSTEMS MIT HILFE EINES REGELBASIERTEN SYSTEMES

A. Khelil*, M. Albrecht**, J. Broll-Bickhardt**

*) Ing.ges. f. Stadthydrologie mbH, Vahrenwalder Str. 7, 3000 Hannover 1

***) Bremer Entsorgungsbetriebe, Hinter dem Ansgarikirchhof 8, 2800 Bremen 1

Zusammenfassung:

Zur Unterstützung der Maschinisten bei der Steuerung des Entwässerungskanals in "Bremen-Linkes-Weserufer" wurde ein Expertensystem entwickelt und implementiert. Dieses System ermöglicht eine Rationalisierung des Steuerungsvorgangs und ein besseres Nachvollziehen des Betriebsgeschehens während kritischer Regenereignisse. In vielen Fällen wird die Leistungsfähigkeit des Kanals dadurch verbessert. Das Entwässerungskonzept, die Schritte der Datenverarbeitung und die wesentlichen Charakteristiken der Programme und Dateien werden in diesem Beitrag erläutert. Anschließend wird über weitere Entwicklungen berichtet.

REAL TIME CONTROL OF A URBAN DRAINAGE SYSTEM WITH THE SUPPORT OF AN EXPERT SYSTEM

Summary

An expert system has been developed and implemented to assist the operators in the Real Time Control (RTC) of the Urban Drainage System (UDS) in the city of Bremen, Germany. The utilization of this computer modul is part of an effort to rationalize the RTC-process. It limits the scope of actions of the operator and records the control process during every critical events for analysis. In many cases, the performance of the UDS has been improved. The aims and restrictions of control, the treatment of data and the main characteristics of the programmes are discussed. A brief overview of the current development is given in the last chapter.

GESTION EN TEMPS RÉEL D'UN RÉSEAU D'ASSAINISSEMENT URBAIN AVEC LE SOUTIEN D'UN SYSTÈME EXPERT

Résumé

Un système à base de règles (système expert) a été conçu et développé pour aider les opérateurs à déterminer de façon appropriée une stratégie de gestion du réseau

d'assainissement dans la ville de Bremen en Allemagne. Ce système permet de réduire de manière sensible les disparités qui existent entre les opérateurs et dans beaucoup de cas, les capacités de stockage et de transport du réseau sont mieux exploitées. Les objectifs et restrictions de la gestion du réseau à Bremen, les étapes du traitement de données ainsi que les principales caractéristiques du système expert sont exposés. Les développements ultérieurs du système sont brièvement esquissés dans le dernier chapitre.

I. EINFÜHRUNG

Viele Städte oder Stadtregionen in der Bundesrepublik werden in den nächsten Jahren ihr Entwässerungsnetz sanieren müssen, entweder weil die Leistungsfähigkeit des Kanals im klassischen Sinne (Auftreten von Überstau / Überflutung) nicht ausreichend ist, oder weil der Umweltschutz eine deutliche Reduzierung der Mischwasserentlastungen erfordert. Als eine mögliche Sanierungsmaßnahme empfiehlt sich die Echtzeitsteuerung des Kanalnetzes, insbesondere dann, wenn Speicherkapazität vorhanden ist, die aber ohne aktives Eingreifen in das Fließgeschehen nicht optimal ausgenutzt werden kann.

Die Außenbereiche des Entwässerungssystems Linkes Weserufer werden im Trennverfahren entwässert, der innere Bereich im Mischverfahren. Wegen des niedrigen Sohlgefälles sind ungefähr 20 Stadtteilpumpwerke im Trenngebiet installiert. Das Mischgebiet (Abb. 1) besteht aus drei Teilsystemen (Rablinghausen, Krimpel, HPWL), die jeweils mit einem Pumpwerk am Tiefpunkt versehen sind.

Im Zuge der Modernisierung des Datenerfassungssystems (Broll-Bickhardt, 1991) wurde das bestehende Steuerungskonzept überarbeitet. Ein automatisches Programm zur Unterstützung des Maschinisten bei der Bestimmung der Steuerungsentscheidungen wurde implementiert. Damit soll eine weitgehende Standardisierung der Steuerungsaufgabe und eine größere Nachvollziehbarkeit des Kanalbetriebs ermöglicht werden. Im folgenden werden die wesentlichen Charakteristiken des Steuerungskonzepts und des implementierten Entscheidungsmoduls erläutert.

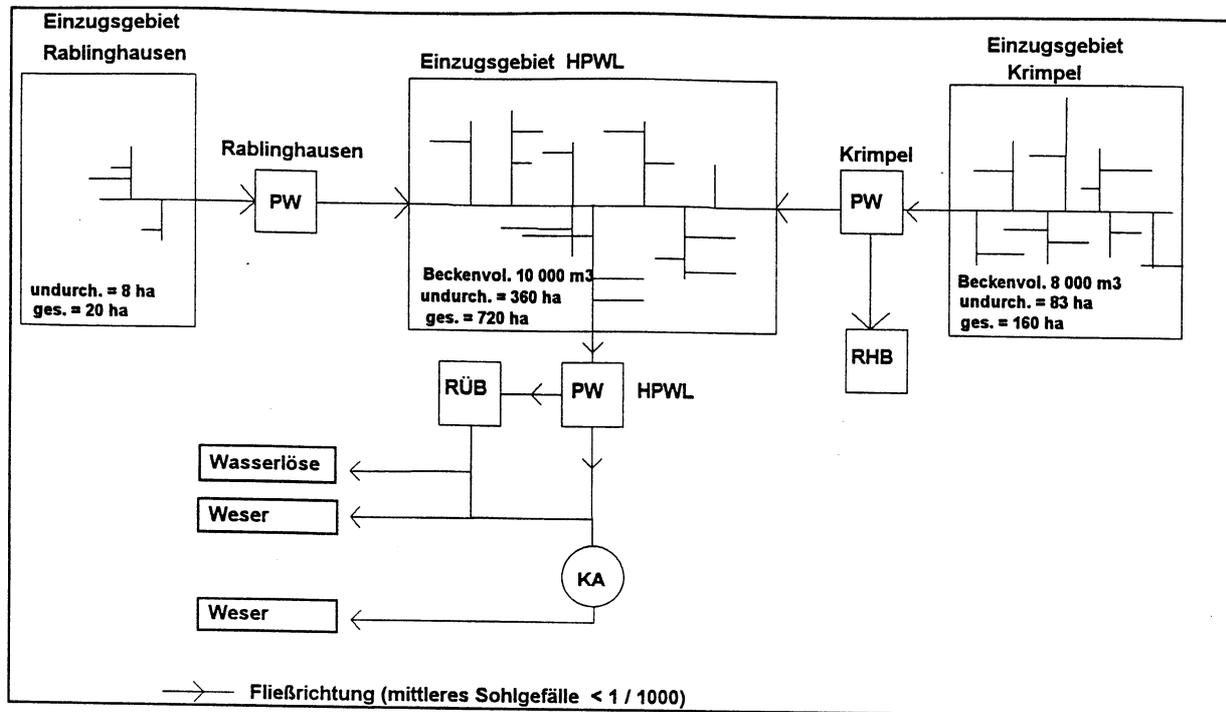


Abb. 1: Mischsystembereich im Entwässerungssystem Bremen-Linkes-Weserufer

II. AUTOMATISCHE BESTIMMUNG DER STEUERUNGSSTRATEGIE

Zur automatischen Bestimmung der Sollwerte der Steuerungsorgane im Kanal (= Steuerungsstrategie) werden zwei Klassen von Verfahren verwendet. Die ersten Verfahren beruhen auf der Grundlage der mathematischen *Optimierung*. Die anderen gehören zur Klasse *der wissensbasierten Systeme* (= *Expertensysteme*).

II. 1 Optimierungsmethoden

Optimierungsmethoden sind in der wissenschaftlichen Literatur vielfach verwendet worden. Sie wandeln das Steuerungsproblem in ein Minimierungsproblem um. Die zu bestimmende Steuerungsstrategie entspricht dem Zustand eines Ersatzkanalnetzes, dessen Bewertung durch eine Kostenfunktion minimal ist. Diese Bewertungsfunktion drückt sich als Gewichtung von Steuerungskriterien (u. a. Überstau-, Entlastungsvolumina, Energiekosten) aus. Je nach Art der Gewichtung (lineare, nicht lineare) wird der Lösungsalgorithmus gewählt (z.B. Simplexverfahren, quadratisches Verfahren). Die Formulierung und Lösung des Steuerungsproblems als Optimierungsproblem beinhaltet folgende Schritte:

- Erstellung des vereinfachten Ersatzkanalnetzes
- Formulierung der Kostenfunktion
- Wahl des Lösungsalgorithmus

Folgendes Wissen ist erforderlich :

Steuerung eines Entwässerungssystems mit einem regelbasierten System 4

- Verständnis der Hydraulik im Kanal (Ermittlung der Randbedingungen, Transport- und Speicherkapazität)
- Klare Formulierung der Steuerungsziele und ihrer Priorität in Form von Kosten
- Verständnis des Optimierungsalgorithmus zur Beurteilung der berechneten Lösung

Die *On-Line*-Implementierung eines Optimierungsmoduls wird durch folgende Punkte erschwert:

- Die Ergebnisse des Optimierungsprogramms werden unzuverlässig, wenn die vom Optimierungsprogramm angenommenen Randbedingungen plötzlich nicht mehr gelten. Dies geschieht z.B. , wenn vorhandene Steuerungsorgane oder Meßgeräte ausfallen.
- Ein Optimierungsprogramm erfordert viel Rechenkapazität (Speicherplatzbedarf sowie Anzahl der Rechenoperationen)
- Die berechneten optimalen Steuerungsstrategien sind nicht direkt nachvollziehbar.

Aus diesen Gründen wurde im Entwässerungssystem Bremen Linkes Weserufer ein *regelbasiertes System* bzw. *Expertensystem* eingesetzt. Gegenüber der Optimierungslösung ergeben sich folgende Vorteile.

- Ein Expertensystem kann unscharfes bzw. qualitatives Wissen verarbeiten (z.B. " Es regnet viel ", "der Wasserstand ist hoch").
- Die Ergebnisse sind leicht vom Praktiker nachvollziehbar (weil regelbasiert)
- Notfallstrategien (z. B. wenn Steuerungsorgane oder Meßgeräte ausfallen) können ohne großen Aufwand miteinbezogen werden (durch zusätzliche Regeln)
- Die erforderliche Rechenkapazität ist gering (geringer Speicherplatzbedarf und schnelle Bearbeitungszeit)

II.2 Struktur eines regelbasierten Systems

Die allgemeine Organisation der Datenverarbeitung in einem regelbasierten System ist in Abb. 2 veranschaulicht. Sie beruht auf der Trennung zwischen einem allgemeinen Wissen über logische Inferenzprozesse (Rahmenprogramm = Contro), einem *Fachwissen* (Feld = PRDMEM) und einem *Faktenwissen* (Feld = WRKMEM).

In einem *regelbasierten* System wird das Fachwissen als Menge von Regeln (Regelbasis oder Produktionsbasis) ausgedrückt, die von einem Fachmann

(Experten) erstellt werden. Für jede Situation (beschrieben durch entsprechende Fakten) gelten nur bestimmte Regeln, deren Schlußfolgerungen die gesuchte Problemlösung beschreiben.

II. 3 Datenfluß zur Bestimmung der Steuerungsstrategie (Abb. 3)

Aufgrund der Hardware- und Softwarekonfiguration wurde die eigenständige Entwicklung des Rahmenprogramms (Programm Contro) erforderlich. Die Bestimmung der Steuerungsempfehlungen besteht aus folgenden Bearbeitungsstufen:

Etappe 1 : Aktualisierung der Zustandsdatei

Alle angeschlossenen On-Line Meßdaten werden vom Datenerfassungssystem alle 15 Sekunden abgefragt und in einen Speicher geschrieben. Für jede Meßvariable wird ein mittlerer Wert (über die letzte Minute bzw. die letzten 5 Minuten) gebildet und in der **Zustandsdatei** gespeichert.

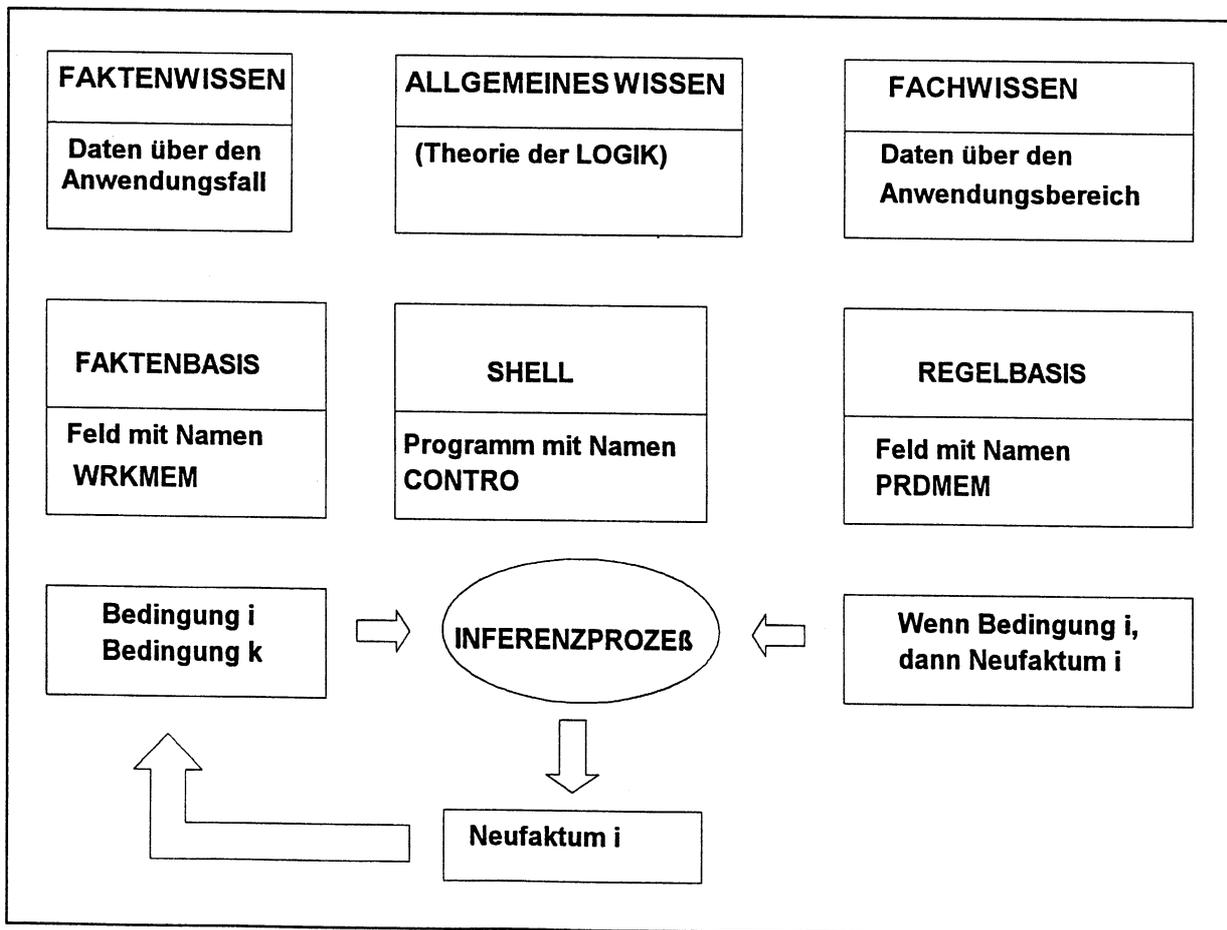


Abb. 2.: Organisation der Daten in einem regelbasierten System

Etappe 2: Aktivierung der Steuerungsregeln

Das Expertensystem liest alle 5 Minuten (Dauer eines Steuerungsintervalls) die Zustandsdatei und verarbeitet sie. Die Werte der relevanten Zustandsvariablen werden zunächst gelesen, einer hydrologischen Analyse unterzogen und in die Faktenbasis (Feld **WRKMEM** = Working Memory = Arbeitsgedächtnis) eingetragen. Aus allen Steuerungsregeln der Regelbasis werden dann diejenigen herausgesucht, deren Bedingungen erfüllt sind. Die hergeleiteten Schlußfolgerungen gelten als neue Fakten.

Etappe 3: Auswahl und Herausgabe der Empfehlungen

Das Expertensystem übergibt die Kennnummern der herauszugebenden Empfehlungstexte dem Datenerfassungssystem, damit diese auf dem Kontrollbildschirm angezeigt werden.

III. DAS STEUERUNGSKONZEPT

III.1 Die Standardstrategie

Eine der Hauptschwierigkeiten bei der Entwicklung eines Expertensystems betrifft die Erstellung der Regelmenge. Das entsprechende Fachwissen muß zunächst verfügbar sein. Es muß zudem konsistent und vollständig in Regeln formulierbar sein.

In dem hier beschriebenen Fall bestimmt das *Steuerungskonzept* die Formulierung der Steuerungsregel. Im Entwässerungssystem "Bremen-Linkes-Weserufer" ist eine Verbundsteuerung der Mischwasserpumpwerke (HPWL, Krimpel) vorgesehen, mit dem Ziele, die Speicherkapazität des Kanalnetzes und der Regenbecken (Abb. 4) möglichst auszunutzen, bevor Mischwasserentlastungen getätigt werden. Weitere Randbedingungen der Steuerung sind folgende Punkte:

- Die Überstaumengen bzw. -häufigkeiten im Netz dürfen durch die Steuerungseingriffe nicht erhöht werden.
- Der Energiebedarf insbesondere zur Befüllung der Regenüberlaufbecken soll möglichst niedrig erhalten werden. Insbesondere sollen Spitzenförderleistungen zur schnellen Befüllung von Regenbecken vermieden werden.

Das bestehende Steuerungskonzept in Bremen-Linkes-Weserufer wurde in den siebziger Jahren entworfen, als die Regenüberlaufbecken HPWL (10 000 m³) und PW-Krimpel (8 000 m³) gebaut wurden. Steuerungsanweisungen

Steuerung eines Entwässerungssystems mit einem regelbasierten System 7

(=Steuerungsregeln) wurden für die Maschinisten erarbeitet und in einem verbindlichen Steuerungsheft¹ zusammengefaßt.

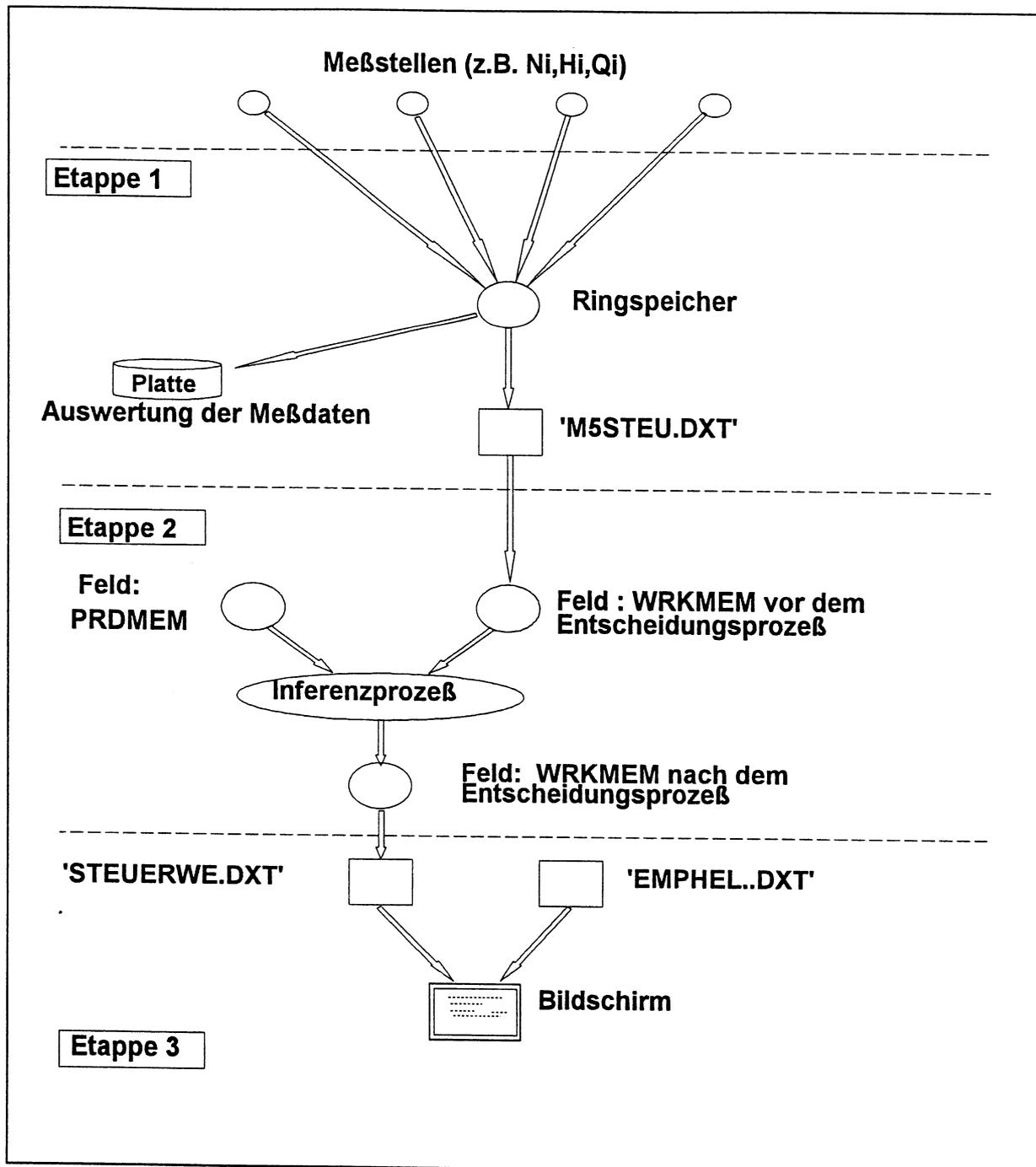


Abb. 3 : Datenfluß im Entscheidungsprozeß in Bremen-Linkes-Weserufer

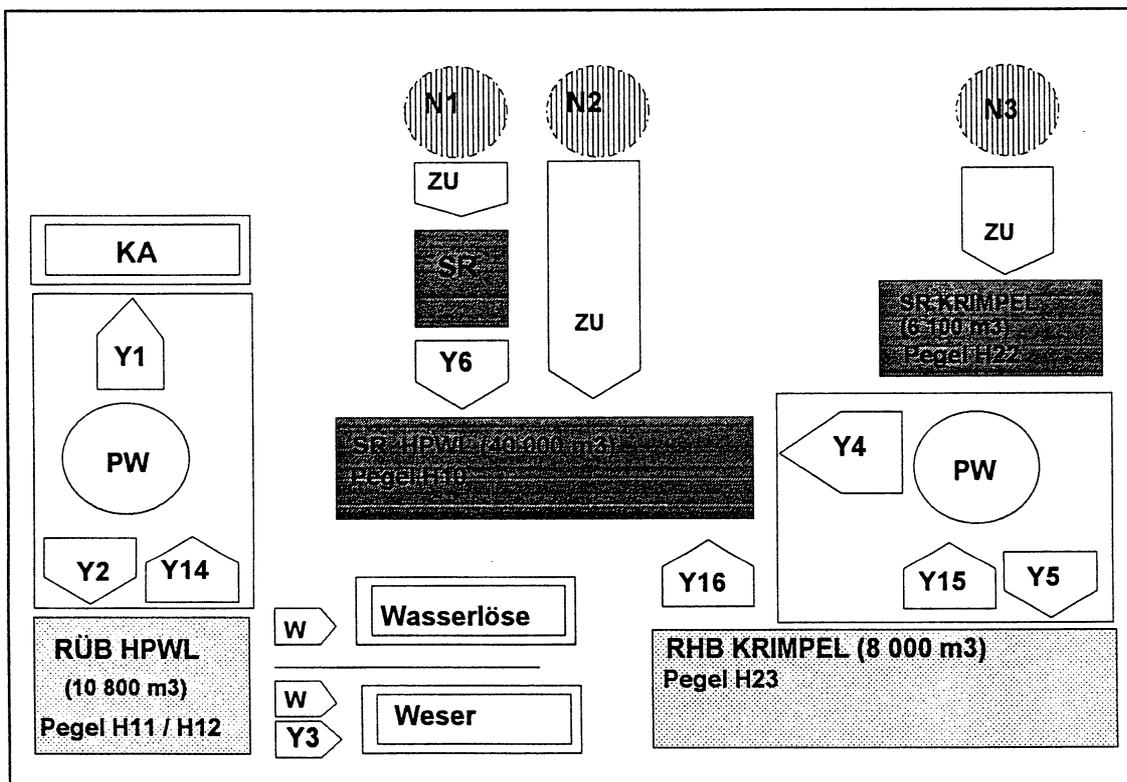
Die Standardstrategie beruht auf einem *reaktiven* Steuerungskonzept, dessen wichtiger Bestandteil die Beobachtung von Wasserstandsmeßpegeln in den Stauräumen, Becken und an den Auslässen darstellt. Wenn die Stauräume eine

¹Die im Steuerungsheft festgehaltenen Steuerungsanweisungen beschreiben die sogenannte "Standardstrategie".

Steuerung eines Entwässerungssystems mit einem regelbasierten System 8

bestimmte Auslastung (=Wasserstandgrenzwert) überschritten haben, werden die Regenüberlaufbecken mit Förderschnecken befüllt.

Untersuchungen der Meßwerte sowie Simulationsergebnisse bestätigen, daß während eines mittleren bis starken Regenereignisses (= der kritische Steuerungsfall) die Wasserspiegellinie so flach wird, daß die Kanalisationsauslastung jeweils durch den Wasserstandswert im unteren Pumpensumpf hinreichend genau erfaßt wird. Die Umsetzung erfolgt mit Hilfe von Speicherkennlinien (Abb. 5).



LEGENDE :

Belastung	Speicherkapazität	Steuerungsmöglichkeiten
Einzugsgebiet	Kanalstauraum	Pumpwerk
N Regenschreiber	Regenbecken	Pumpe / Schieber
Zuflüsse	Auslaß	Wehr

Abb. 4: Steuerungsbezogene Beschreibung des gesamten Mischkanals

Dem Maschinisten wird aber die Freiheit eingeräumt, von der Standardstrategie abweichende Entscheidungen zu treffen, wenn er damit rechnet, daß trotz

wachsender Stauraumauslastung eine Beckenbefüllung nicht notwendig ist; er bezieht subjektive Wetterlageneinschätzungen in seine Entscheidungen mit ein.

Eingehender Untersuchungen der Meßwerte und der Ergebnisse von hydrodynamischen Kanalnetzrechnungen (unter Berücksichtigung der Standardstrategie) dokumentieren das Systemverhalten bei Regenwetter. Seine Leistungsfähigkeit genügt den Anforderungen, bezüglich der Einstau- und Überstaumenge und -häufigkeit, als auch der Entlastungsmenge und -häufigkeit.

Die Untersuchung des Betriebsgeschehens bei Regenwetter zeigt jedoch, daß eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit durch Optimierung der vorhandenen Kapazität möglich sind. Zudem ist eine gewisse "Streuung" der betrieblichen Vorgehensweise zu verzeichnen. Diese "Streuung" wird dadurch verursacht, daß die Maschinisten Fremdinformationen (insbesondere Niederschlagsdaten) auf unterschiedlicher Art und Weise in ihre Entscheidungen miteinfließen lassen.

Eine weitere Rationalisierung des Betriebsgeschehens ist daher möglich und wünschenswert.

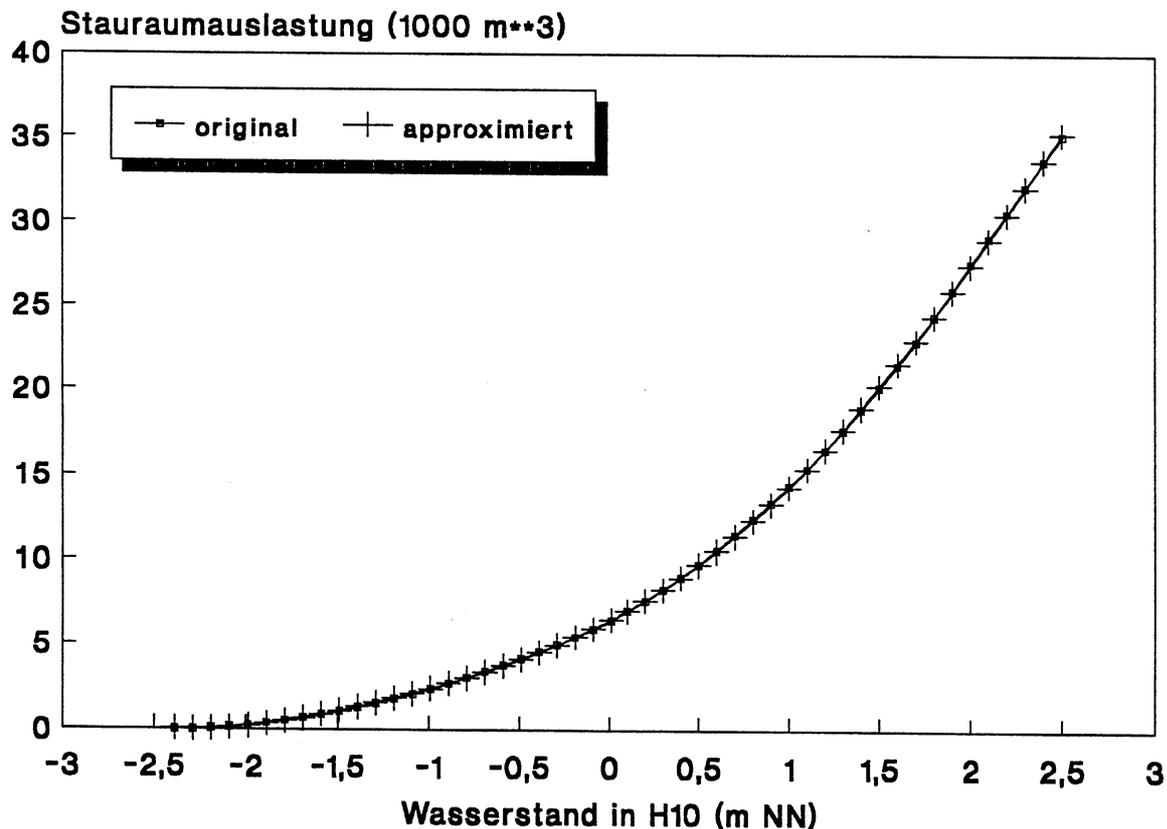


Abb. 5 : Speicherkennlinie des Pegels H10 im Pumpensumpf des HPWL

III.2 Die erweiterte Steuerungsstrategie

Eine bedeutende Verbesserung im neuen Steuerungskonzept besteht darin, die Niederschlagsdaten zu verwenden, um Zuflußvolumina abzuschätzen und eine

Steuerung eines Entwässerungssystems mit einem regelbasierten System 10

maximale Auslastung der Stauräume vorherzusagen². Die Vorteile dieser *adaptativen* Steuerung gegenüber der *reaktiven* Standardsteuerung sind:

- Die Beckenbefüllung erfolgt nur, wenn die maximale Auslastung voraussichtlich die Stauraumkapazität übertreffen wird.

Weitere Vorteile sind indirekt zu erwarten:

- Dadurch daß die Beckenbefüllung bei Erfordernis frühzeitig gestartet wird, kann auf die höheren Förderungsstufen der Schnecken verzichtet werden (= Energieersparnis).
- Grobe Fehlentscheidungen der Maschinisten werden weitgehend vermieden.

IV. Das implementierte Steuerungsmodul

IV. 1 Umfang der Fakten- und Regelbasis

Der Umfang der Fakten- und Regelbasis ist der Tab. 1 zu entnehmen.

Anzahl der Entscheidungsvariablen	95
Anzahl der Regeln	61
Anzahl der Regelblöcke	9

Tab. 1: Das implementierte Entscheidungsmodul

Anmerkungen zur Tab. 1:

- Viele Variablen treten nicht direkt in der Formulierung der Regeln auf, sondern dienen der Berechnung der wirklichen Entscheidungsvariablen (z.B. die Zuflußvolumina werden zur Berechnung der maximalen Stauraumauslastungen verwendet).
- Die gesamte Regelmenge wird in Regelblöcken zusammengefaßt. Für jeden einzelnen Steuerungsblock wird der Inferenzprozeß (nach dem Prinzip der Vorwärtsverkettung) durchgeführt, dessen Ergebnisse sofort der Faktenbasis hinzugefügt werden. Damit ist gewährleistet, daß Zwischenergebnisse von den nachfolgenden Regelblöcken verwendet werden.

IV.2 Kommunikation mit dem Maschinisten

²Die benötigten Daten zur Simulation der hydrologischen Vorgänge auf den Teileinzugsgebieten werden in einer Sonderdatei (KANaIDATen) gespeichert. Diese Datei enthält eine vereinfachte Beschreibung der Einzugsgebiete sowie Parameterwerte der verwendeten Ansätze.

15 verschiedene Steuerungsempfehlungen können angezeigt werden:

- 7 beziehen sich auf die Steuerung des HPWL.
- 7 beziehen sich auf die Steuerung des PW Krimpel.
- Eine Meldung wird zudem übertragen, wenn einer der On-Line gemessenen Güteparameter im Kanal einen Grenzwert überschritten bzw. unterschritten hat.

Es werden jedoch höchstens drei Empfehlungen gleichzeitig eingezeigt, um den Maschinisten nicht zu verwirren. Die Steuerungsempfehlungen wurden dementsprechend ausgewählt und formuliert. Sie bieten dem Maschinisten lediglich Aktionen an. Beispiele für solche Empfehlungen sind :

" Regenwetterbetrieb HPWL: Füllung der RÜB HPWL" oder

" Regenwetterbetrieb PW Krimpel: Sammlerwasserstand etwa halten, passende Förderung zum HPWL"

Dem Maschinisten bleibt weiterhin der Weg zum Erreichen des Steuerungszieles, z.B. die Wahl der Förderschnecke zur Beckenbefüllung, überlassen.

Nach der Inbetriebnahme zeigte sich das Personal manchmal überrascht und teilweise irritiert von den Empfehlungen wegen ihres adaptativen Charakters. Das Expertensystem kann oftmals eine kritische Situation erkennen, bevor die Wasserstandspegel hohe Werte gemessen haben. Andererseits kann es eine Situation als unkritisch bewerten, obwohl die gleichen Wasserstände hohe Werte aufzeigen.

Die Empfehlungen wurden dementsprechend mit unterschiedlicher Wichtigkeit beachtet, auf Ablehnung sind sie jedoch nicht gestoßen. Es deutet sich an, daß sich mit einer wachsenden Anzahl von Regenereignissen ein Vertrauen in die Richtigkeit der Empfehlungen bei allen Maschinisten ausbildet.

V. Weitere Entwicklungen

Allen bis jetzt vorgetragenen Überlegungen liegt eine mengenmässige Betrachtung der Entlastungen zugrunde. Es wird versucht, die Mischwasservolumina zwischen Kanal, Kläranlage und Gewässer optimal zu verteilen. Neben der Reduzierung der hydraulischen Belastung durch Mischwasserentlastungen erfordert der wirksame Gewässerschutz eine Reduzierung der eingeleiteten *Schmutzfrachten* bzw. der *Schmutzkonzentrationen* ab.

Durch eine verstärkte Beobachtung der Güteparameter im Kanal werden starke Schwankungen der Abwasserbeschaffenheit sichtbar, die den Betrieb der Kläranlage beeinträchtigen können.

Im Regenwetter könnte sich eine gütebezogene Strategie deutlich von einer mengenbezogenen unterscheiden. Es wäre unter Umständen vertretbar, Mischwassermengen mit niedriger Schmutzkonzentration vorab zu entlasten, wenn dadurch eine Entlastung hoch verschmutzten Mischwassers vermieden werden kann. Eine solche betriebliche Vorgehensweise ist rechtlich nicht abgesichert, so daß für jeden Einzelfall der Beweis für die Richtigkeit erbracht werden muß.

Eine Gütesteuerung setzt daher als Grundlage das Wissen über folgende Punkte voraus:

- Verlauf der Frachtkonzentrationen im Trocken- und im Regenwetter
- Charakteristiken des Schmutztransports im Kanal
- Beschreibung der Ablagerungsprozesse in der Kanalisation sowie in den Überlaufbecken (tatsächliche Reinigungsleistung)

Im Entwässerungssystem Bremen-Linkes-Weserufer werden zur Zeit On-Line Messungen für mehrere Güteparameter (u.a. pH, O₂, BSB-M₃, Leitfähigkeit) vorgenommen. Dabei spielen die BSB-M₃-Meßwerte eine zentrale Rolle als On-Line-Indikator der biologisch abbaubaren Verschmutzung. Zukünftige Untersuchungen sollen Wege zur Einbeziehung dieser Daten in ein erweitertes Steuerungskonzept erkunden.

V.1 Literatur

ALBRECHT, 1992, "Beschreibung der Steuerungslogik" , Interner Bericht der Bremer Entsorgungsbetriebe, nicht veröffentlicht.

BROLL-BICKHARDT, 1991, "Steuerung eines Mischsystems zur Verbesserung der Gewässergüte und zur Verminderung der Betriebskosten - Wissenschaftliche Erarbeitung von Steuerungskonzepten -", Abschlußbericht BMFT Forschungsvorhaben 02-WA86470, Teil A.

KHELIL, 1990, "Steuerung eines Mischsystems zur Verbesserung der Gewässergüte und zur Verminderung der Betriebskosten - Wissenschaftliche Erarbeitung von Steuerungskonzepten -", Abschlußbericht BMFT Forschungsvorhaben 02-WA86470, Teil B.

KHELIL, 1992, "Überarbeitung des Steuerungskonzepts in Bremen-Links-Der-Weser", Interner Bericht der Bremer Entsorgungsbetriebe, nicht veröffentlicht.