

# **Entwicklung von Strategien zur Steuerung von Entwässerungssystemen am Beispiel des Kanalnetzes »Bremen-Linkes-Weserufer«**

von  
A. Khelil

Auszug aus:

Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz  
Nr. 4, 1991

Seminar »Neue Aspekte der Regenwasserentsorgung«  
Institut für Wasserwirtschaft, Universität Hannover  
SuG-Verlagsgesellschaft, Hannover

Dr.-Ing. A. Khelil



Vahrenwalder Str. 7  
30165 Hannover

Tel.: 0511-9357 250  
Fax: 0511-9357 100

ENTWICKLUNG VON STRATEGIEN ZUR STEUERUNG VON ENTWÄS-  
SERUNGSSYSTEMEN AM BEISPIEL DES KANALSYSTEMS 'BREMEN LINKS  
DER WESER' von Dr.-Ing. A. Khelil

VORWORT

Die hier dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen eines Verbundprojektes durch Mitarbeit der Stadt Bremen -Teil A- und der Universität Hannover (Institut für Wasserwirtschaft, IWH) -Teil B- gewonnen. Das Vorhaben wurde vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) unter der Nummer 02-WA86470 gefördert.

I) EINFÜHRUNG.

Der Kern der meisten bestehenden Entwässerungskanäle wurde als Mischwasserkanalsystem nach dem Prinzip des Entwurfsregens bemessen und gebaut. Das Netz funktioniert für dieses bestimmte Ereignis theoretisch optimal.

Niederschlag ist aber ein höchst unregelmässiger Vorgang, der durch die wenigen Parameter des Entwurfsregens nicht umfassend beschrieben werden kann. Daher entsteht in der Realität eine unterschiedliche Belastung der verschiedenen Teile des Netzes. In ungünstigen Fällen kann das Kanalnetz an Stellen 'versagen', obwohl zu gleicher Zeit noch Kapazität an anderen Stellen vorhanden ist. Die Schwierigkeiten werden gleichzeitig durch das Wachsen einer Stadt noch größer, weil Kanalisationen der neuen Stadtteile oberhalb des Einzugsgebietes oft ohne weiteres mit dem alten Netz verknüpft werden.

Das Versagen eines Netzes kann beschrieben werden durch:

- Überstauhäufigkeit und -menge,
- Entlastungshäufigkeit und -menge.

Überstau ist zusammen mit dem Einstau ein Maß für den sogenannten Entwässerungskomfort. Häufigkeit und Menge von Entlastungen sind ein Maß für die Belastung des Vorfluters durch ungereinigtes Mischwasser.

Seit Kanalnetze gebaut werden, ist es eine wichtige Zielsetzung gewesen, daß Überstau- und Einstauhäufigkeit so gering wie möglich sind. Die Bemessung erfolgte unter der Annahme, daß die Wiederkehrhäufigkeit des Entwurfsregens derjenigen des Netzversagens entsprach. Die Notwendigkeit, Entlastungen innerhalb strenger Grenzen einzuschränken, wurde dagegen erst in den letzten Jahren erkannt. Ungereinigtes Mischwasser ist eine der Hauptquellen der Vorfluter-Verschmutzung.

Detaillierte Simulationen bestätigen in den überwiegenden Fällen, daß der Entwässerungskomfort trotz erhöhter Belastung durch eine ursprüngliche Überdimensionierung der Kanalisation gewährleistet wird. Die Umweltbelastung durch Entlastungen übersteigt aber oft die verschärften Grenzwerte. Um dieses zu vermeiden, sind drei verschiedene Vorgehensweisen denkbar:

- konstruktive Maßnahmen,
- konzeptionelle Maßnahmen,
- betriebliche Maßnahmen.

Konstruktive Maßnahmen beinhalten, die Kapazität - insbesondere die nützliche Speicherkapazität des Kanalnetzes - durch Baumaßnahmen (Rückhaltebecken, Tunnel, Vermaschung...) zu erweitern.

Konzeptionelle Maßnahmen definieren die Funktionen eines Entwässerungssystems neu. Die Aufmerksamkeit konzentriert sich besonders auf die Ableitung des Regenwassers. Es soll durch Abkopplungsmaßnahmen (z.B. dezentrale Retention, qualifizierte Trennsysteme) vermieden werden, daß unbelastetes Regenwasser überhaupt in die Kanalisation gelangt.

Betriebliche Maßnahmen werden oft mit konstruktiven Maßnahmen verknüpft. Sie zielen auf eine bessere Ausnutzung der Netzkapazität durch on-line Eingreifen auf die Transportvorgänge ab. Dieses Eingreifen wird durch die Steuerung von verschiedenen Elementen (Pumpen, Wehre) ermöglicht. Dementsprechend ist eine Steuerung des Netzes nur durchführbar, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- 1) Das Netz besitzt (Speicher-)Kapazitäten, die aktiviert werden können,
- 2) Steuerungsgeräte (Pumpen, Wehre) sind installiert und on-line steuerbar.

Im Bremen -Einzugsgebiet 'Links der Weser'- wird das Kanalnetz, insbesondere aufgrund des geringen Gefälles, seit Jahren gesteuert. Das erste on-line Datenerfassungssystem wurde Anfang der siebziger Jahre installiert. Mitte der achtziger Jahre wurde von der Stadt Bremen die Restrukturierung des Erfassungssystems beschlossen (Broll, Winter; 1989). Heutzutage können die Operatoren auf einem Graphikbildschirm Darstellungen des laufenden Netzzustands abrufen. Besonderes Gewicht wurde der Darstellung der Auslastung der Speicherkapazität in der Kanalisation und in den Becken verliehen.

Unter diesen Umständen tritt die Steuerungsstrategie in den Vordergrund. Sie wird durch die Abfolge der Sollwerte in allen Steuerungsgeräten zu jedem Steuerungszeitschritt charakterisiert. Als optimal wird sie bezeichnet, wenn ein Versagen des Netzes nur dann eintritt, wenn die vorhandene Kapazität völlig ausgenutzt ist. Eine schlechte Strategie dagegen kann die Versagenshäufigkeit erhöhen.

Im Rahmen des oben genannten BMFT-Projektes wurde die Universität Hannover (IWH) beauftragt, die Entwicklung einer Steuerungsstrategie wissenschaftlich zu erarbeiten und in 'Bremen Links der Weser' zu demonstrieren.

## II) METHODEN ZUR BESTIMMUNG DER STEUERUNGSSTRATEGIE.

Zur automatischen Bestimmung einer Steuerungsstrategie existieren zwei wichtige Methoden:

- 1) Methoden basierend auf einer Optimierung;
- 2) Methoden basierend auf der Anwendung eines (regelbasierten) Steuerungswissens.

### II.1) Optimierung (Schilling;1988), (Rohlfing;1989).

Bei einem Optimierungsproblem wird unterschieden zwischen Entscheidungsparametern und Zielparametern. Die Werte der

Entscheidungsparameter sollen so bestimmt werden, daß die entsprechenden Werte der Zielparameter als 'optimiert' gelten können. Die Entscheidungsparameter können allerdings nur Werte innerhalb eines bestimmten Bereichs annehmen. Die Bestimmung der Lösungswerte unterliegt also Einschränkungen, die man als Randbedingungen bezeichnet..

Mathematisch läßt sich das Optimierungsproblem als Suche nach dem Optimum einer Funktion formulieren. Diese Funktion wird Kostenfunktion oder Zielfunktion genannt, weil sie eine Bewertung der gesamten Ziele ermöglicht. Die Charakteristika der Zielfunktion bestimmen die Art und Weise, wie das Optimum gesucht wird (z.B. lineare Optimierung, quadratische Optimierung). Häufig werden lineare Zielfunktionen konstruiert, wobei sich die entstandenen Kosten dann linear zu den Werten der Zielparameter berechnen lassen.

Zu den wichtigsten Zielparametern bei der Entwicklung und Bewertung einer Steuerstrategie in einem Entwässerungssystem zählen folgende:

- 1) Menge bzw. Häufigkeit von Überstau (Einstau),
- 2) Menge bzw. Häufigkeit von Entlastungen,
- 3) Finanzielle Kosten; darunter sind normalerweise die durch den Energieverbrauch entstehenden Kosten zu verstehen. Im Fall einer Entlastung bzw. Überflutung können jedoch zusätzliche Kosten in Form von Entschädigungen oder Bestrafungen hinzukommen,
- 4) Sicherheitsbetrachtungen, die in manchen Fällen den Raum der möglichen Steuerungseingriffe einschränken können.

Schwerpunkte bei der Entwicklung eines Optimierungsmoduls sind:

- 1) Beschreibung des Entwässerungssystems zur Berechnung der Werte der Zielparameter,
- 2) Herstellung der Kostenfunktion.

Ein wichtiger Punkt bei der Optimierung ist die implizite Simulation. Die Zustände ( $X_i$ ) sind zu den Zeitschritten  $i$  ( $i \geq j$ ) vom Zustand  $X_j$ , von den Störvariablen  $S_k$  ( $j \leq k \leq i$ ) (Niederschlag oder Zuflußwelle), von den Entscheidungen  $U_k$  ( $j \leq k \leq i$ ) und der Dynamik des Netzes innerhalb der Berechnungszeitspanne (des Horizonts) abhängig.

Bei der linearen Optimierung wird das Entwässerungssystem als lineares System betrachtet. Die Relevanz einer derartigen Annahme hängt unter anderem von der Konfiguration des Netzes, den Eigenschaften des Gebietes und der erwünschten Genauigkeit der Ergebnisse ab. Je grösser der Berechnungshorizont wird, desto grösser wird die Gefahr, daß die berechneten Zustände unrealistisch werden. Zusätzliche Schwierigkeiten treten auf bei der numerischen Erfassung der Beurteilungsfaktoren und ihrer relativen Gewichtung. Im Fall einer linearen Optimierung sollen zum Beispiel die Kosten von einem  $m^3$  Überflutung mit denen von einem  $m^3$  Entlastung oder einem  $m^3$  Speicherung verglichen werden... .

Von daher ist es bei einer Optimierung notwendig,

- sorgfältig bei der Erstellung der Netzbeschreibung vorzugehen,
- die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf das wirkliche System jeweils zu überprüfen,
- Sensitivitätsanalysen durchzuführen und die 'Stabilität' des Optimums zu überprüfen.

II.2) Wissensbasiertes System bzw. Expertensystem (Khelil; 1989 und 1990).

Ein wissensbasiertes System beruht prinzipiell auf zwei Arten von 'Wissen' (Knowledge), die für die Suche nach einer geeigneten Lösung erforderlich sind:

- 1) Ein allgemeines Wissen, das maschinell den menschlichen Inferenzprozeß simulieren kann ('general induction knowledge'),
- 2) Ein spezielles Fachwissen, das die Kenntnisse des Experten enthält ('Domain Knowledge').

Daher spricht man von 'wissensbasierten Systemen' ('Knowledge based System'). Diese Bezeichnung ist gerechtfertigter als die Bezeichnung 'Expertensystem', die sich in der Öffentlichkeit durchgesetzt hat. Letztere Bezeichnung wirkt insofern unglücklich, als die Zuverlässigkeit des Systems per definitio angenommen wird, obwohl diese in Wirklichkeit von der Konsistenz und Vollständigkeit des gespeicherten Fachwissens abhängt.

Oft wird das Fachwissen als Menge von Regeln beschrieben. Bei der Steuerung von Entwässerungssystemen besagt eine Steuerungsregel, daß eine bestimmte Aktion (z.B. Befüllung/Entleerung eines Beckens, Entlastung) bei einem bestimmten Netzzustand (bzw. wenn bestimmte Bedingungen erfüllt sind) durchgeführt werden muß. In diesem Fall entspricht der Inferenzprozeß den Bearbeitungsstufen zur Auswahl der geeigneten Regel sowie dem Eintragen ihrer Schlußfolgerung(en) in die Wissensbasis.

Ein großer Vorteil eines Expertensystems ist, daß es Lösungen liefert, die für einen Operator ohne umfangreiche zusätzliche Weiterbildung nachvollziehbar sind. Das Expertensystem verarbeitet den aktuellen Netzzustand und entwickelt daraus eine Lösung, zu deren Verständnis es vorerst genügt, die angewandten Regeln zu erkennen. Der Netzzustand kann dementsprechend im on-line Betrieb direkt aus dem Meßnetz gewonnen werden. -Bei der Optimierung sind dagegen oft Zuflußwellen von der Oberfläche über den gesamten Steuerungshorizont erforderlich. Diese Information ist aber nicht direkt aus Messungen erhältlich, sondern muß durch Simulation der Abflußbildung und -konzentration gewonnen werden.-

Andere Vorteile von Expertensystemen sind der relativ kleine Speicherplatzbedarf des Moduls bei einer on-line Implementierung und die kurze Verarbeitungszeit bis zur Entscheidung.

Die Hauptschwierigkeit beim Aufbau eines Expertensystems ist die Sammlung des Fachwissens. Diese Etappe scheitert oft wegen Mangel an Gutachtern, Mangel an Bereitschaft ihrerseits und Schwierigkeiten bei der Formulierung des Wissens. Der Bereich 'Steuerung von Kanalnetzen' bildet in dieser Hinsicht keine Ausnahme.

Bei der Steuerung des Kanalsystems 'Bremen Links der Weser' ist die Situation jedoch vergleichsweise günstig.

Einerseits ist dieser Teil des Systems relativ gut bekannt. Er wurde im Zuge der Restrukturierung des on-line Datenerfassungssystems mehrfach untersucht. Die meisten Eingabedaten zur hydrodynamischen Simulation mit dem Modell 'Hystem-Extran' (zur Beschreibung des Modells siehe Fuchs-Verworn; 1987) liegen vor.

Andererseits haben die Operatoren im Laufe der Jahre Erfahrung bei der Steuerung des Netzes gesammelt. Steuerungsregeln wurden in einer Betriebsanweisung zusammengefaßt, die die 'Standardstrategie' beschreibt. Diese Standardstrategie beinhaltet Anweisungen für den Normalfall. In kritischen Fällen darf jedoch der Operator auf seine eigene Analyse der Netzsituation (oder auf die der verantwortlichen Person) zurückgreifen.

Im Projekt wurde entschieden, ein Expertensystem zu implementieren. Diese Entscheidung beinhaltete folgende Aufgaben:

- 1) Aufbau einer Expertensystem-Schale ('Shell') zur Durchführung des Inferenzprozesses und ihre Implementierung im on-line Betrieb (Khelil;1989).
- 2) Herstellung einer überprüften Steuerungsregelbasis.

Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird ausschließlich der zweite Punkt behandelt.

### III) HERSTELLUNG EINER ÜBERPRÜFTEN REGELBASIS ZUR STEUERUNG DES MISCHSYSTEMS.

III.1) Kurze Beschreibung des Einzugsgebiets und des Kanalsystems.

Die Untersuchung setzt als unumgängliche Bedingung die Möglichkeit zur Simulation des Kanalsystems voraus. Nur durch Simulation wird es möglich, eine bestimmte Regelbasis zu bewerten und die Auswirkungen von Änderungen zu erkennen.

Einige wichtige Daten des Einzugsgebiets und des Kanalnetzes:

III.1.1) Einzugsgebiet (Fig.1).

- Fläche: 1000 ha, davon 470 ha undurchlässig.
- Gefälle: weniger als 1m auf 1km Kanalisation.

III.1.2) Kanalnetz und Meßeinrichtungen (Fig.2).

- Oberhalb des Netzes; Trennsystem mit ca. 40 Pumpen.
- Unterhalb des Netzes; Mischsystem mit 3 Pumpwerken (Hauptpumpwerk (HPWL), Pumpwerk Krimpel, Pumpwerk Rablinghausen).

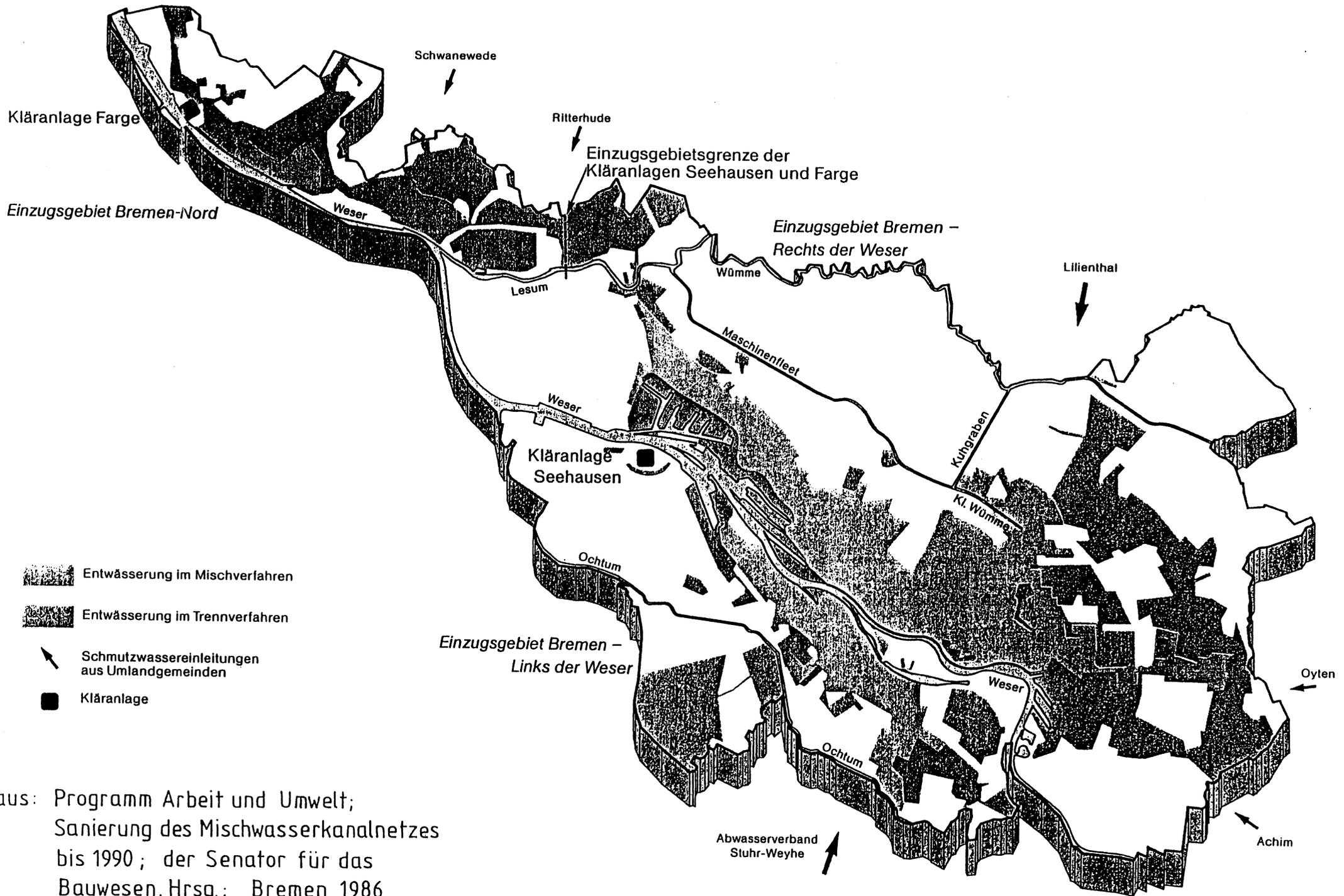
Alle Werte der folgenden Variablen werden kontinuierlich (jede 15s) an das Datenerfassungssystem übermittelt und im Zentralrechner gespeichert:

- 3 Regenschreiber in den 3 Pumpwerken ( $N_i$ ,  $i=1,3$ ),
- 18 Wasserstandsmeßgeräte ( $H_j(i)$   $i=1,18$ ),
- 5 Durchflußmeßgeräte ( $Q_i$ ,  $i=1,5$ ).

III.1.3) Die wichtigsten Steuerungseinrichtungen (Fig.3).

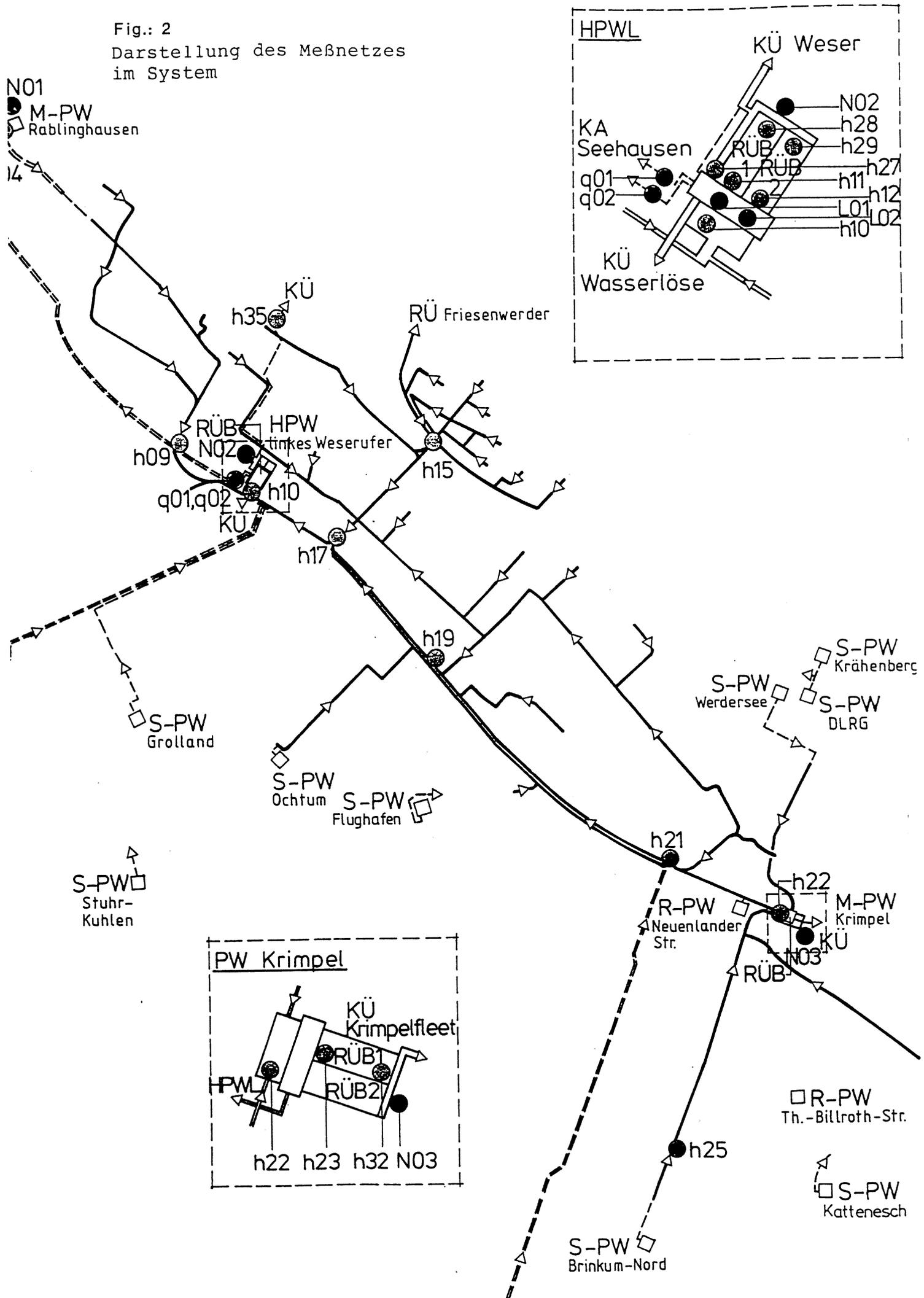
Pumpwerk HPWL:

Nr	Aufgabe	Betriebsart
P1	Beschickung der Kläranlage	kontinuierlich (Tauchpumpe)
P2	Befüllung der Rückhaltebecken	3 Schnecken + Kombinationen
P3	Entlastung in die Weser	2 Stufen ( $0; 2\text{m}^3/\text{s}$ )
P14	Entleerung der Rückhaltebecken	Schieber ( $0; 0,860\text{m}^3/\text{s}$ )



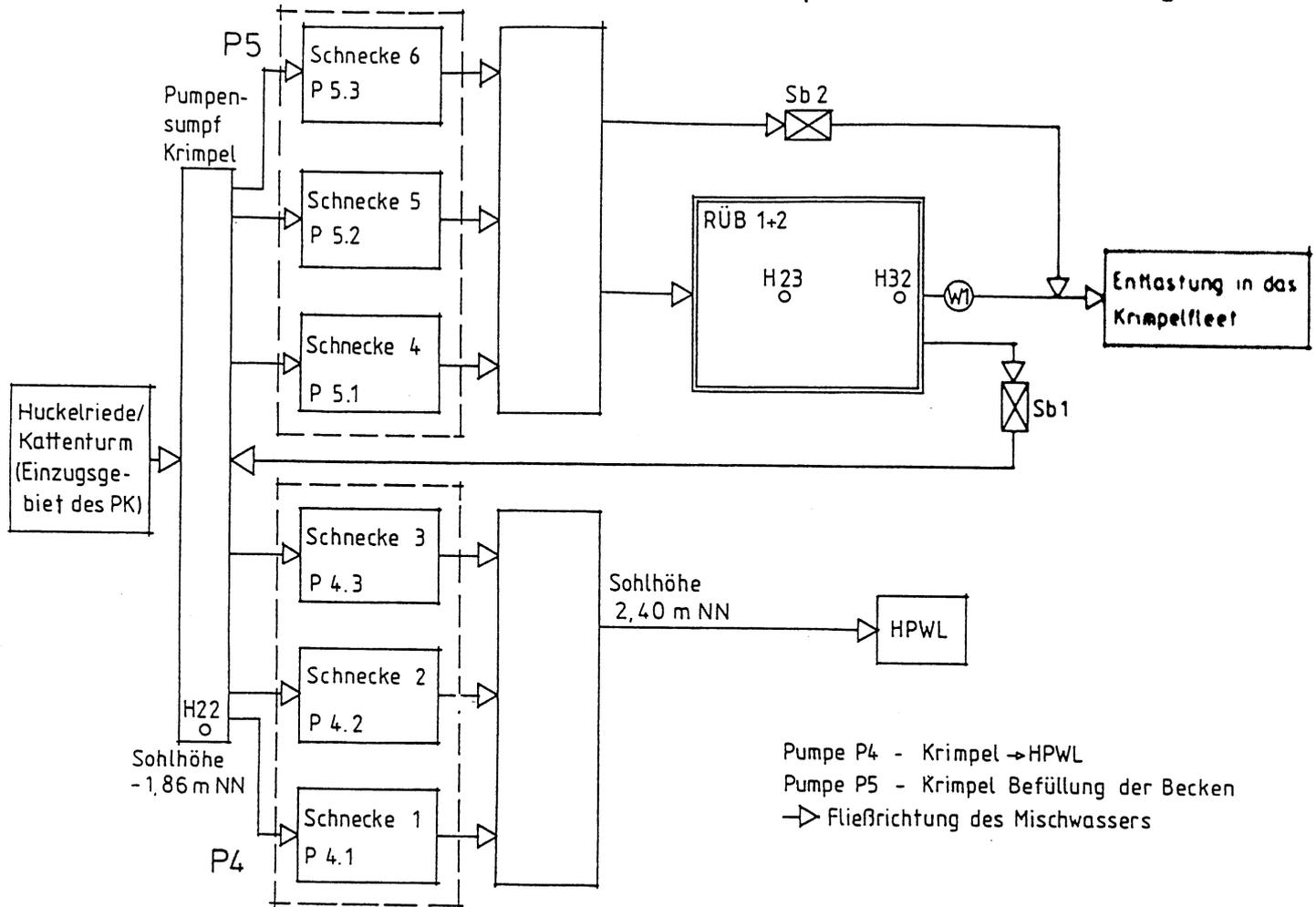
aus: Programm Arbeit und Umwelt;  
 Sanierung des Mischwasserkanalnetzes  
 bis 1990; der Senator für das  
 Bauwesen, Hrsg.; Bremen 1986

Fig.: 2  
Darstellung des Meßnetzes  
im System

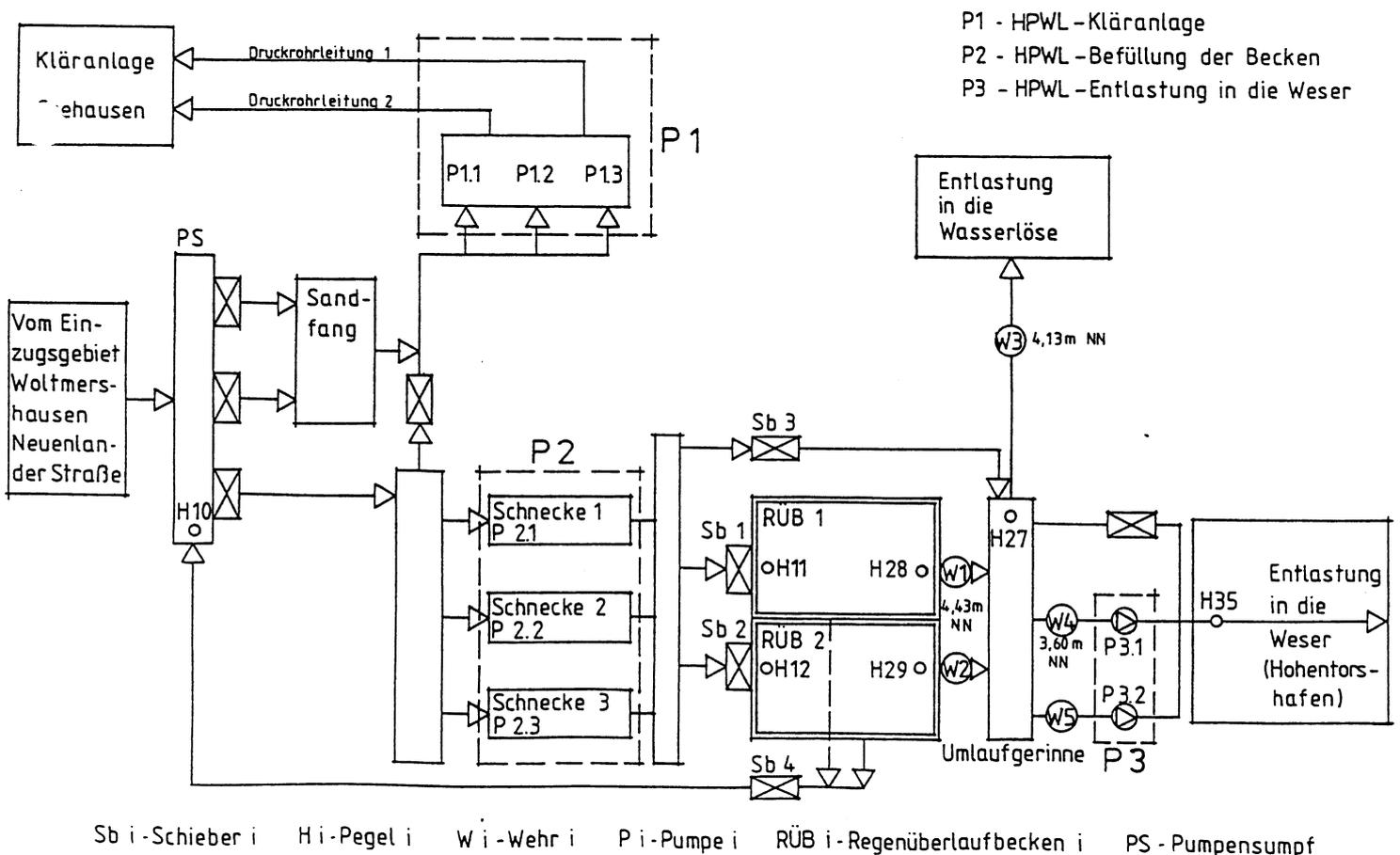


# Schema Pumpwerk Krimpel (PK)

# Fig. 3



# Schema Hauptpumpwerk / linkes Weserufer (HPWL)



Pumpwerk Krimpel:

Nr.	Aufgabe	Betriebsart
P4	Beschickung HPWL	3 Schnecken + Kombinationen
P5	Befüllung der Rückhaltebecken	3 Schnecken + Kombinationen
P15	Entleerung der Rückhaltebecken	Schieber (0;0,420m <sup>3</sup> /s)

Pumpwerk Rablinghausen:

Nr.	Aufgabe	Betriebsart
P6	Beschickung HPWL	kontinuierlich

III.1.4) Die Speicherkapazitäten

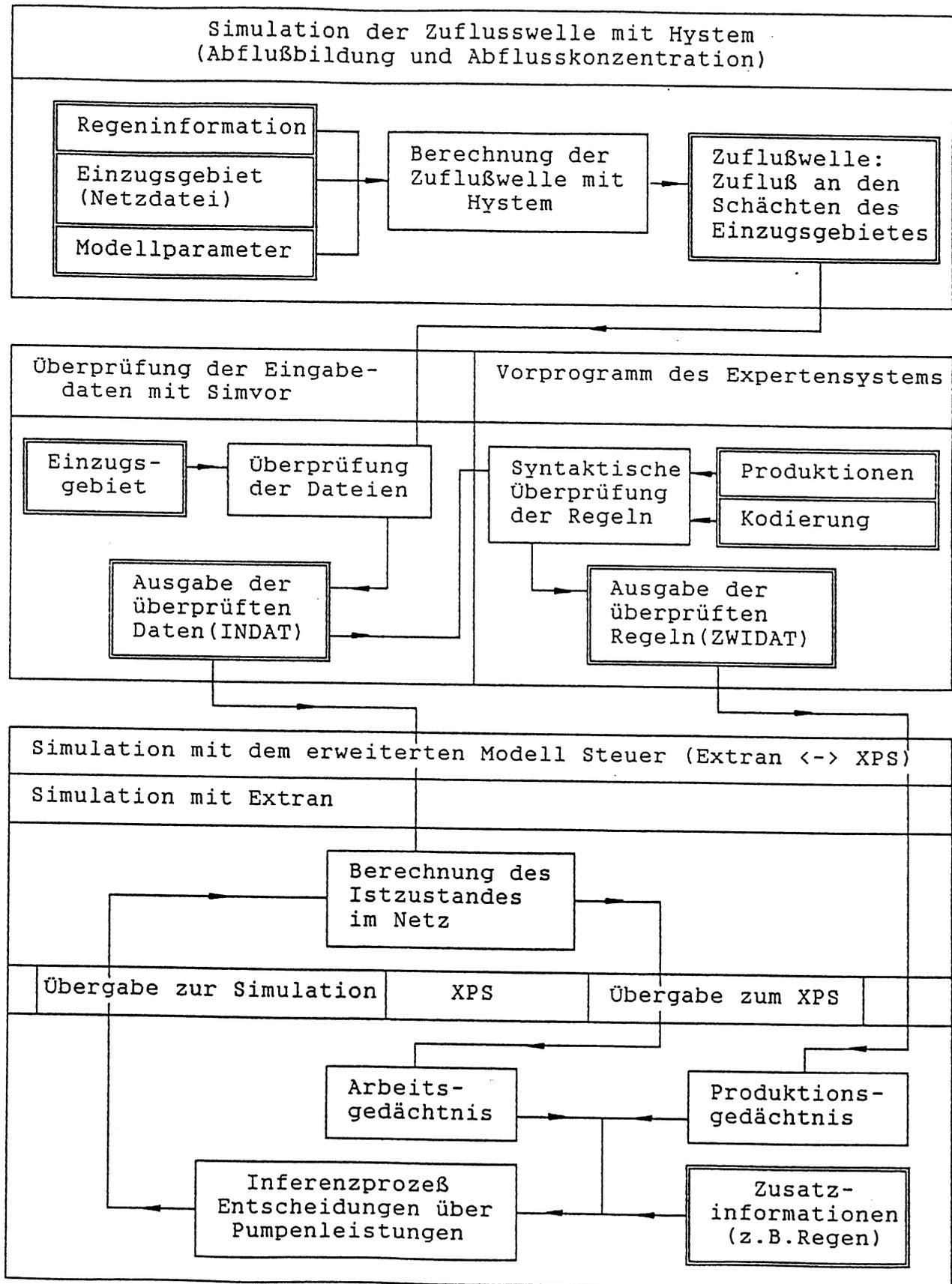
	Kapazität
HPWL Rückhaltebecken	10 000 m <sup>3</sup>
Krimpel Rückhaltebecken	8 000 m <sup>3</sup>
in-line Kapazität	ca. 40 000 m <sup>3</sup>

III.2) Simulation.

Das Simulationsmodul (Modell 'Hystem-Extran') wurde mit dem Expertensystemmodul (XPS) gekoppelt. Sie bilden zusammen das erweiterte Modell 'Steuer'. In Fig.4 wird der Informationsfluß während der Simulation mit 'Steuer' dargestellt.

Wegen der besonderen Konfiguration des Kanalsystems (geringes Gefälle, Beeinflussung des Fließvorgangs durch Pumpen) ist eine hydrodynamische Simulation erforderlich. Diese ist aber gegenüber den hydrologischen Modellen wesentlich rechenintensiver (Lösung des Differentialgleichungssystems Saint-Venant's). Um die Rechenzeit innerhalb vernünftiger Grenzen zu halten, wurde die Modellbeschreibung des Systems stark vereinfacht ( -> Grobnetz mit 70 Haltungen). Eine Kalibrierung wurde durch Vergleich der Simulations- mit den Meßwerten vorgenommen.

FIG. 4: INFORMATIONSFLOSS IM LAUFE DER SIMULATION MIT DEM ERWEITERTEN SIMULATIONSMODELL 'STEUER'



III.3) Entwicklung der Steuerstrategie (Khelil;1990),  
(Schneider;1990).

Ausgangspunkt der Untersuchung ist die sogenannte Standardstrategie. Zur Analyse der Steuerung werden zwei Typen von Simulationen durchgeführt:

- 1) Simulation ausgewählter Einzelereignisse,
- 2) Seriensimulation.

Einzelereignisse dienen zur Detailuntersuchung. Es ist möglich, die Reaktionen des Systems Schritt für Schritt zu verfolgen und daher die Unzulänglichkeiten einer Strategie exakt zu bestimmen. Seriensimulationen dagegen ermöglichen eine globale Bewertung aller wichtigen Aspekte der Steuerung.

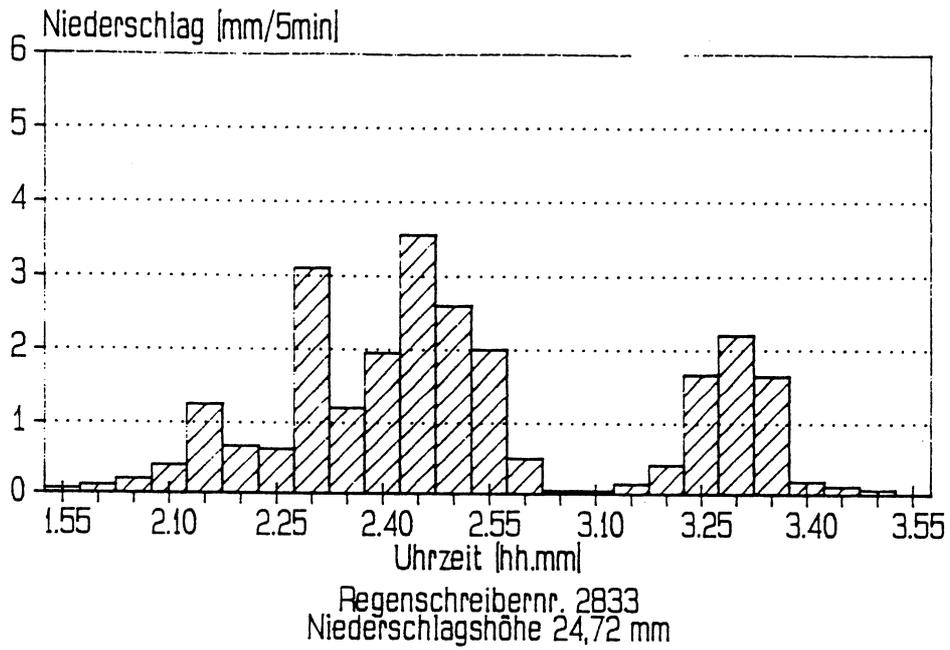
Die Niederschlagsdaten entstammen dem Regenschreiber '2833 Bremen Bayernstraße' und umfassen den Zeitraum 1955-1985. Zur Auswahl der Ereignisse für die Seriensimulation werden folgende Betrachtungen herangezogen:

- Als Einzelereignis wird jeder Niederschlag definiert, dem eine Trockenwetterperiode von mindestens 5 Stunden vorausgeht sowie nachfolgt.
- die gesamte Niederschlagshöhe beträgt mindestens 8 mm. Damit ist gewährleistet, daß die Speicherkapazität der Kanalisation nach Abzug der Verluste beansprucht wird.
- die Dauer der Ereignisse beträgt weniger als 4 Stunden, weil die Niederschlagsintensität und nicht die Niederschlagshöhe der kritische Parameter ist.

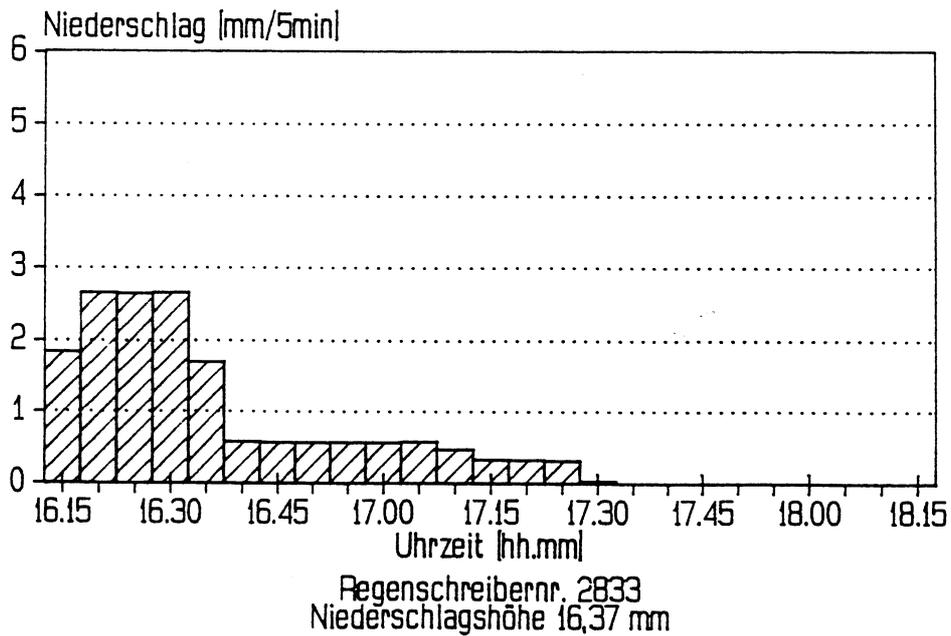
Unter diesen Voraussetzungen reduziert sich die Zahl der bedeutsamen Ereignisse während des oben genannten Zeitraums auf 88.

Für die detaillierte Analyse werden Einzelereignisse aufgrund einer Betrachtung der ausgenutzten Speicherkapazität im Kanalnetz ausgewählt. Grundgedanke dabei ist, daß eine Steuerung nur Vorteile bringen kann, wenn die Netzkapazität ausgeschöpft wird, ohne daß jedoch eine deutliche Überlastung auftritt. -Im letzteren Fall ist das Versagen der

Darstellung der Niederschlagsverteilung  
 Ereignis Nr: 005  
 Datum 07.06.1985



Darstellung der Niederschlagsverteilung  
 Ereignis Nr: 015  
 Datum 09.08.1960



Bemessung der Sammler zuzuschreiben.- Die Überlastungsgrenze wird bei 100 000 m<sup>3</sup> Zuflußwelle (Regen- + Abwasser) in 13 Stunden festgelegt. Vier Ereignisse werden ausgewählt. Bei zweien (Nr.011, Nr.015) wird die oben angegebene Grenze erreicht, ohne (wesentlich) überschritten zu werden (106 000m<sup>3</sup> bzw. 96 000m<sup>3</sup> Zuflußwelle). Bei den beiden anderen (Nr.005 und Nr.006) ist die Leistungsfähigkeit des Netzes deutlich überschritten (152 000m<sup>3</sup> bzw. 136 000m<sup>3</sup> Zuflußwelle). Durch Simulation dieser beiden Ereignisse wird überprüft, ob die 'Optimierung' der Strategie für mittlere Ereignisse zu nennenswerter Verschlechterung der Leistungsfähigkeit bei Extremereignissen führt. In Fig.5. sind die Niederschlagsverteilungen der Ereignisse Nr.005 und Nr.015 dargestellt.

Ganglinien für jedes Einzelereignis werden an den wichtigsten Stellen des Netzes (insbesondere den Pumpwerken) ausgegeben. Anhand dieser Informationen wird die Standardstrategie kritisiert und Änderungen der Strategie vorgeschlagen.

Als wichtiger Punkt hat sich herausgestellt, daß bei mittleren Ereignissen (Nr.011 und Nr.015) hauptsächlich im HPWL eine Beckenbefüllung stattfindet, obwohl die Kanalisation theoretisch noch genügend Kapazität zur Speicherung der gesamten Zuflußwelle besitzt. Der Grund liegt darin, daß die Förderleistungen der Pumpen zur Beckenbefüllung -sowohl im HPWL als auch im PW Krimpel- versuchsweise gedrosselt worden sind, um Energieverbrauchspitzen zu vermeiden.

Diese spielen eine wichtige Rolle bei der Energiekostenberechnung. Leider bewirken frühzeitige Befüllungen erhebliche Entlastungsmengen, insbesondere in die Weser.

In einer entwickelten modifizierten Strategie werden die Becken nur dann befüllt, wenn die vorhandenen Kanalreserven selbst beinahe ausgelastet sind. Das soll ermöglichen, Entlastungen zu vermeiden, solange das Netz nicht überlastet ist, setzt aber voraus, daß in sehr kritischen Fällen die maximalen Befüllungsraten -im HPWL sowie im PW Krimpel- eingesetzt werden können.

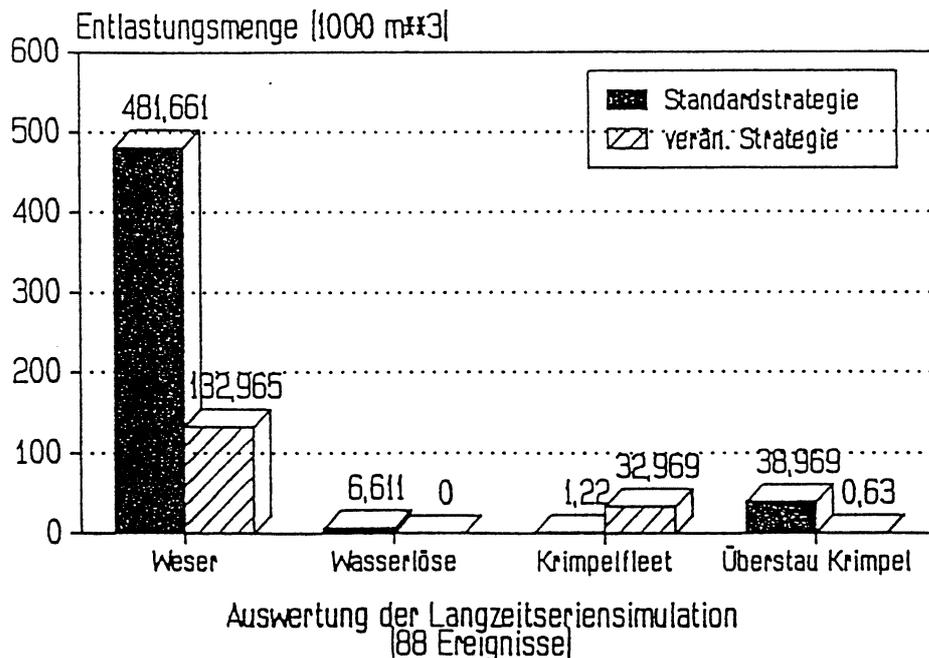
Zur globalen Bewertung der beiden Strategien durch Seriensimulationen der 88 ausgewählten Ereignisse werden folgende Größen herangezogen: Entlastungsmenge, Pumpenlaufzeiten zur Befüllung der Becken und Leistungsfähigkeit des Netzes.

1) Entlastungsmenge (Fig.6) :

Die Entlastungsmenge in die Weser wird mit der modifizierten Strategie gegenüber der Standardstrategie um 70% reduziert. In Krimpel dagegen ist die Entlastungsmenge stark gestiegen. Diese scheinbare Verschlechterung ist darauf zurückzuführen, daß die Überstaumenge in Krimpel nach Behebung eines Steuerungsfehlers stark vermindert wird, was eine verstärkte Beanspruchung der Becken, und somit eine höhere Entlastungsgefahr, bewirkt.

Vergleich der Entlastungsmenge  
in die verschiedenen Vorfluter

Fig.: 6

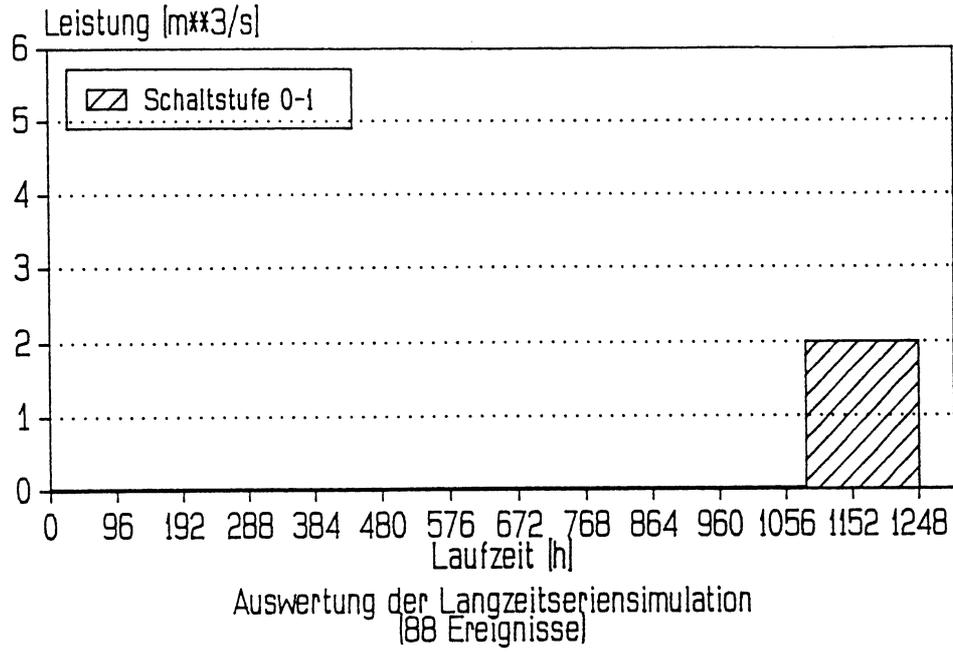


2) Pumpenlaufzeiten (Fig.7 bis Fig.10) :

Der Spitzenenergieverbrauch wird in der modifizierten Strategie erhöht. Dafür werden aber in vielen Fällen Befüllungen und damit oft verbundene Entlastungen vermieden. Die Laufzeiten sind erheblich kürzer.

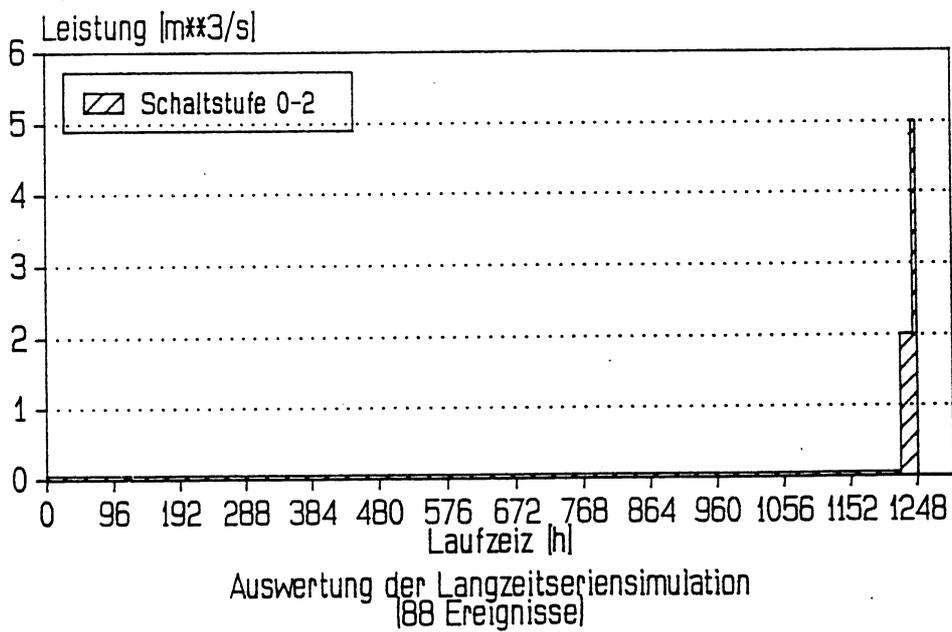
Befüllung der Becken  
im HPWL  
Standardstrategie

Fig.: 7



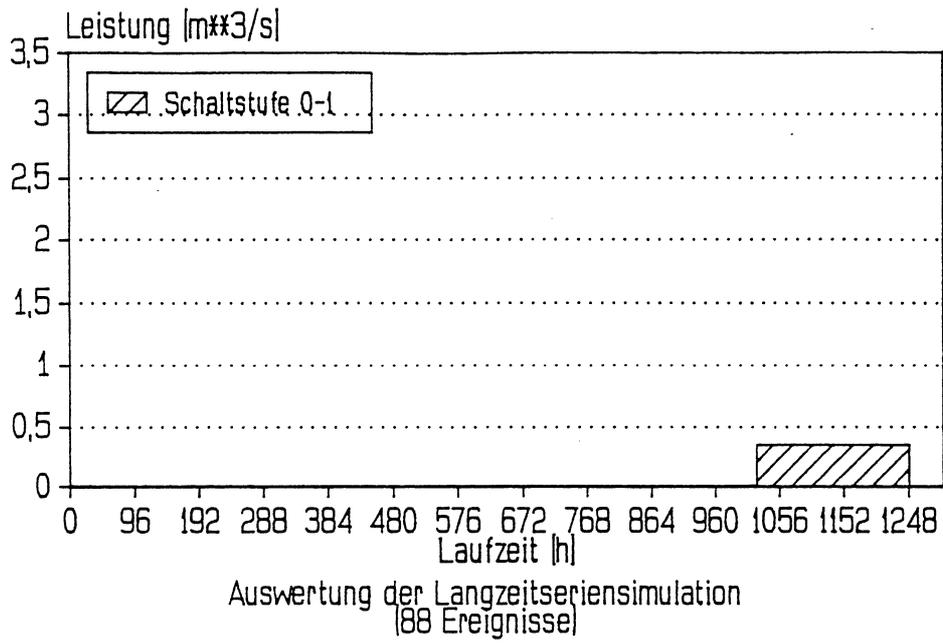
geänderte Steuerstrategie

Fig.: 8



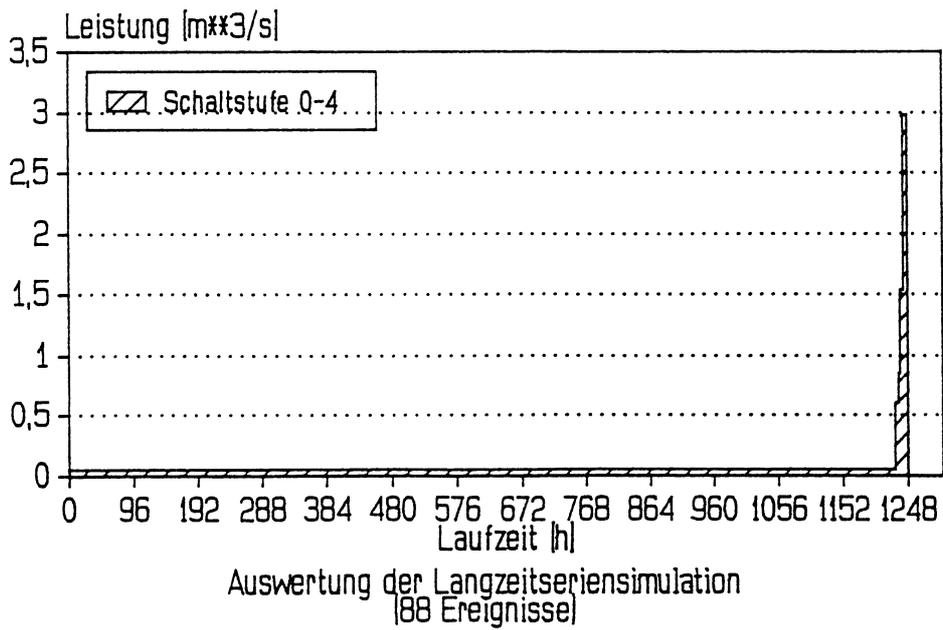
Befüllung der Becken  
in Krimpel  
Standardstrategie

Fig.: 9



geänderte Steuerstrategie

Fig.: 10



### 3) Leistungsfähigkeit des Netzes (Fig.11 bis Fig.14) :

In Fig.11 und Fig.12 werden die Einstauhäufigkeiten beider Strategien gegenübergestellt. Bei der modifizierten Strategie erhöht sich überall im Netz die Einstauhäufigkeit. Dieses ist darauf zurückzuführen, daß die Speicherkapazitäten im Netz stärker beansprucht werden. Gleichzeitig führt dies aber zu keiner bedeutsamen Verschlechterung der Überstauhäufigkeit (Fig.13, Fig.14).

Durch diese Simulationsergebnisse wird gezeigt, daß eine Reduzierung der Entlastungsmenge durch Änderung der Steuerung erzielt werden kann. Allerdings muß dafür mit einer erhöhten Einstauhäufigkeit gerechnet werden.

#### IV) WEITERE ENTWICKLUNG

Die im Kapitel III) beschriebene Untersuchung zeigt nicht nur interessante Ergebnisse auf, sondern macht auf weitere Fragestellungen aufmerksam, von denen in diesem Kapitel drei vorrangige umrissen werden:

- 1) Entwicklung von Methoden zur automatischen Entwicklung von Strategien,
- 2) Berücksichtigung von Güteparametern,
- 3) Entwicklung von Methoden zur on-line Konsistenzanalyse von Meßdaten und ihrer Rekonstruktion, falls sie ausfallen.

##### IV.1) Automatische Entwicklung von Steuerstrategien.

Durch Analysen des Netzverhaltens sowie Simulationen zur Verifizierung ihrer Gültigkeit wurde eine modifizierte Strategie vorgeschlagen, die in mehrerer Hinsicht eine bessere Ausnutzung der Netzkapazität ermöglicht. Wichtig dabei sind nicht nur die im Laufe der Untersuchung über dieses Kanalnetz neu gewonnenen Kenntnisse, sondern auch die Entwicklung einer Methodik, mit deren Hilfe wissenschaftlich fundierte Aussagen über Möglichkeiten und Grenzen der Steuerung getroffen werden können. Die wichtigen Etappen der Bewertung und Modifizierung der Steuerstrategie wurden vom Fachmann (bzw. der





Forschungsgruppe) bestimmt und durchgeführt. Solche Untersuchungen kosten trotz der günstigen Bedingungen viel Zeit. Die zukünftige Entwicklung hängt davon ab, inwieweit eine teilweise Automatisierung dieses Vorgangs erfolgen wird. Die Implementierung von Lernprozessen eventuell in Kombination mit Optimierungsverfahren eröffnet neue Perspektiven.

Ein Lernalgorithmus wurde vor einigen Jahren entwickelt und in Bremen getestet (Neumann, 1987). Weitere Versuche wurden durchgeführt, den Algorithmus zu verallgemeinern (Spönneman, 1988). Die Untersuchungen wurden jedoch deshalb eingestellt, weil es an Erfahrung im Analysieren des Steuerungsgeschehens fehlte. Jetzt aber ist ein nicht-automatisches Lernbeispiel verfügbar, so daß eine detaillierte Bestimmung des Lernvorgangs (Ziel, Randbedingungen, Einschränkungen) möglich wird.

Eine weitere Möglichkeit, automatisch Steuerungsstrategien zu erzeugen, besteht darin, die von Optimierungsprogrammen vorgeschlagenen Steuerungsstrategien zu analysieren und in Wissensbasen einzutragen. Der Vorgang kann auch als Lernprozeß aufgefaßt werden.

#### IV.2) Berücksichtigung von Güteparametern.

Für den Schutz eines Gewässers ist es nicht entscheidend, das entlastete Mischwasservolumen zu drosseln, sondern die gesamte entlastete Schmutzfracht (Netz + Kläranlage). Unter bestimmten Bedingungen (z.B. Überlastung der Kläranlage und geringe Frachtkonzentration des Mischwassers) kann es vorteilhaft sein, das Mischwasser ohne Behandlung direkt in den Vorfluter zu leiten. Dementsprechend bildet die Erweiterung der Zustandsbeschreibung auf Güteparameter einen wesentlichen Fortschritt zur optimierten Ausnutzung von Netzkapazitäten. Die Berücksichtigung der Güteaspekte setzt aber zwei Bedingungen voraus:

- 1) Möglichkeit zur kontinuierlichen on-line Messung von repräsentativen Güteparametern,
- 2) Möglichkeit zur vernünftigen Simulation des Schmutzfrachttransports.

Aufnahmen des zeitlichen Ablaufs der Konzentration von mindestens einem der wichtigsten Güteparameter sollte für eine repräsentative Anzahl von Ereignissen vorliegen, um die Relevanz einer getrennten qualitativen Betrachtung abzuschätzen.

Modelle zur Simulation des Schmutzfrachttransports existieren (z.B. KOSIM). Es sind aber überwiegend hydrologische Modelle, deren Einsatz sinnvolle Aussagen nur über das Schmutzfrachtentlastungs-Verhalten während einer längeren Periode macht. Eine detaillierte Betrachtung des Zustands während eines einzelnen Ereignisses kann in Bremen nur durch ein hydrodynamisches Modell erfolgen. Deshalb müßte ein ausgereiftes hydrodynamisches Modell um die Simulation des Schmutzfrachttransports erweitert und anhand von Messungen kalibriert werden.

#### IV.3) Konsistenzanalyse der on-line Meßdaten und ihre Rekonstruktion, falls sie ausfallen.

Bei einer on-line Steuerung muß unbedingt sichergestellt sein, daß Entscheidungsinstanzen (der Operator und das on-line Expertensystem) über eine fehlerfreie Beschreibung des Systemzustands verfügen. Das gilt um so mehr für eine optimierte Steuerung, bei der ein kalkuliertes Risiko eingegangen wird.

In den bisherigen Untersuchungen wurde vorausgesetzt, daß die Zustandsbeschreibung zu jedem Entscheidungszeitschritt vollständig und ohne Verzerrungen vorliegt. Im on-line Betrieb jedoch besteht immer die Gefahr, daß durch den Ausfall eines Gerätes oder Störungen bei der Fernübertragung ein Meßwert ungültig wird. Um solchen Schwierigkeiten zu begegnen, ist eine Analyse der Konsistenz der Daten sowie die Möglichkeit zur Meßwertrekonstruktion erforderlich.

Ein allgemeiner Ansatz, der alle vorhandene Meßdaten einschließt, wurde am IWH entwickelt (Schütze, 1990). In Bremen wurden entsprechende erste Untersuchungen durchgeführt. Sie haben gezeigt, daß eine gewisse Redundanz bei bestimmten Meßwerten besteht, die zur on-line Kontrolle der Konsistenz und für die Rekonstruktion angewandt werden kann. Weitere

Untersuchungen wären jedoch erforderlich, um ausgereifte Ergebnisse vorstellen zu können.

#### ZUSAMMENFASSUNG.

Die Steuerungsproblematik wurde im Kapitel I) erläutert. Zwei Methoden zur wissenschaftlichen Erarbeitung von Steuerungsstrategien wurden im Kapitel II) beschrieben und verglichen. Eine Vorgehensweise zur Entwicklung einer modifizierten Regelbasis wurde in Kapitel III) geschildert. Weitere Entwicklungen zur Erstellung und Verbesserung von Steuerungssystemen wurden in Kapitel IV) vorgeschlagen.

#### LITERATUR:

Broll J., Winter J; 'Steuerung eines Mischsystems; Erarbeitung von Betriebsstrukturen', Zwischenbericht; Forschungsvorhaben 02-WA86470 Teil A; April 1989

Fuchs L., Verworn H-R; 'Mikrokomputer in der Stadtentwässerung, Hystem-Extran Modellbeschreibung'; Institut für Wasserwirtschaft, Universität Hannover; 1988.

Khelil A.; 'Steuerung eines Mischsystems; Wissenschaftliche Erarbeitung von Steuerungskonzepten', Zwischenbericht; Forschungsvorhaben 02-WA86470 Teil B; April 1989.

Khelil A.; 'Steuerung eines Mischsystems; Wissenschaftliche Erarbeitung von Steuerungskonzepten', Abschlußbericht; Forschungsvorhaben 02-WA86470 Teil B; November 1990.

Rohlfing R.; 'Optimierte Steuerung eines Speichersystems'; SUG 6, pp21-35; Februar 1989.

Neumann A.; 'Entwicklung eines lernenden Produktionssystems zur on-line Steuerung eines städtischen Kanalnetzes'; Diplomarbeit Institut für Informaik/Institut für Wasserwirtschaft, Universität Hannover; Dezember 1985; unveröffentlicht.

Schilling W.; 'Operationnelle Stadtentwässerung'; Mitteilung der Universität Hannover; Heft 64; 1988.

Schneider S.; 'Bewertung und Verbesserung einer Produktionsbasis für die Findung von Steuerstrategien am Beispiel des Netzes 'Bremen Links der Weser'; Institut für Wasserwirtschaft der Universität Hannover; Diplomarbeit 1990; unveröffentlicht.

Schütze M.; 'Anwendung von Extrapolationsmethoden zur Rekonstruktion ausgefallener Meßwerte in städtischen Kanalnetzen'; Institut für Mathematik/Institut für Wasserwirtschaft Universität Hannover; Diplomarbeit 1990; unveröffentlicht.

Spönemann P.; 'Ein adaptatives regelbasiertes System zur Abflußsteuerung'; Institut für Informatik/Institut für Wasserwirtschaft der Universität Hannover; Diplomarbeit 1988; unveröffentlicht.