

Entwicklung von Strategien und Algorithmen
zur gezielten, zentralen Regelung des
Abflusses in Mischkanalisation durch
mathematische Simulation

Diplomarbeit
von
Marita Semke

Ich erkläre hiermit, daß ich diese Arbeit selbständig erstellt
und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Hannover, im Oktober 1984

Yanita Sewke

Diplomaufgabe für Frau Marita Semke, Matr.Nr. 518699

"Entwicklung von Strategien und Algorithmen zur gezielten, zentralen Regelung des Abflusses in Mischkanalisationen durch mathematische Simulation"

Kommunale Entwässerungseinrichtungen gehören neben industriellen Einleitern und der Landwirtschaft zu den bedeutendsten Verursachern von Gewässerverschmutzungen.

Insbesondere in sommerlichen Niedrigwasserzeiten verursachen die Überlaufwassermengen einzelner Starkregen (Gewitter) mit ihrer durch Kanalisationsablagerungen erhöhten Schmutzfracht extreme Gewässerbelastungen.

Als Konsequenz werden bereits seit ca. 10 Jahren in einigen Großstädten Nordamerikas zentral und on-line gesteuerte Regelungssysteme für den Mischwasserabfluß implementiert. Einige deutsche Städte streben seit jüngster Zeit ebenfalls derartige Abflußregelungen an, z.B. Bremen und Hamburg. In keinem Fall wird der Betrieb derartiger Systeme heute schon routinemäßig durchgeführt. Ein Grund liegt darin, daß bisher noch nicht alle auftretenden theoretischen Fragen (z.B. Stabilität, Beobachtbarkeit, Steuerbarkeit, Identifizierbarkeit, Optimalität) sowie die Wirtschaftlichkeit dieser Methodik im Simulationsversuch geklärt sind.

Im einzelnen soll mit Hilfe der Abflußregelung erreicht werden, die Zuflüsse zur Kläranlage auszugleichen, etwaige "Schmutzstöße" aufzufangen und Überflutungsschäden nach Möglichkeit zu verhindern. Erreicht werden kann dies durch die für jeden Regen individuelle, automatische, zeitvariante, zentral gesteuerte Mobilisierung der "stillen Reserven" aus Kanalstauräumen und Rückhaltebecken, insbesondere bei großen, vermaschten und durch Pumpwerksbetrieb beeinflussbaren Mischkanalisationen.

Grundsätzlich soll im Rahmen dieser Diplomarbeit mit Hilfe numerischer Simulationen des Niederschlags, der Niederschlags-Abfluß-Transformation und von Regelungsmaßnahmen (Einstau in Kanalhaltungen und Rückhalte-

becken, Betrieb von Pumpwerken usw.) überprüft werden, welche Vorteile die künstliche Beeinflussung des Abflusses bietet.

Folgende Unterthemen sollen bearbeitet werden:

1. Formulierung der Ziele der Abflußregelung als Optimierungsaufgabe.
2. Entwicklung eines einfachen Abflußsimulationsmodells, mit dem die Steuerungseingriffe berechnet werden können.
3. Anwendung der unter 2. entwickelten Methodik für ein ausgewähltes Beispiel.
4. Vergleich der beispielhaften Abfluß- und Regelungsberechnungen aus 3. mit Abfluß- und Regelungssimulationen mit Hilfe des hydrodynamischen Abflußmodells EXTRAN.
5. Klärung des Einflusses fehlerhafter Niederschlagsvorhersagen
 - aufgrund mangelnder räumlicher Auflösung
 - aufgrund ungenauer Vorhersagen.

Bei der Bearbeitung der o.g. Punkte sollen vor allem die Fragen geklärt werden, ob bei der realen Anwendung der Abflußregelung eine optimierbare on-line Regelung mit Hilfe einfacher Abflußmodelle (vgl. 1 bis 3) einer mit festen Steuerprogrammen arbeitenden off-line Regelung mit Hilfe genauer Abflußmodelle (vgl. 4.) überlegen ist und inwieweit mit heute entwickelten Modellen zur Niederschlagsvorhersage die Zuverlässigkeit von Abflußsimulation und -regelung gesteigert werden kann.

Auf das Problem der Mehrfachzielsetzung sowie auf anzunehmende "Menge-Güte-Beziehungen" soll eingegangen werden. Die zu entwickelnde Methodik muß wegen zu erwartender häufiger Meßgeräteausfälle robust und sollte im Hinblick auf Rechenzeit und Speicherplatzbedarf anwendungsgerecht sein.

Die Arbeit wird von Prof. Sieker (Institut für Wasserwirtschaft) und Prof. Müller (Inst. f. Informatik) gemeinsam über den Diplomprüfungsausschuss Mathematik ausgegeben. Der praktische Teil der Arbeit wird am Institut für Wasserwirtschaft (Prof. Sieker, Dipl.-Ing. L. Fuchs und Dr.-Ing. W. Schilling) betreut.

Beginn der Arbeit: 1. Februar 1984

L. Fuchs

W. Müller

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
Aufgabenstellung	
Inhaltsverzeichnis	
1. Einleitung	1
1.1 Allgemeine Einführung	1
1.2 Aufbau der Arbeit	2
2. Regelungstheorie und Dynamische Programmierung	4
2.1 Begriffserläuterung	4
2.2 Diskrete deterministische Regelungsprozesse	6
2.2.1 Begriffsherleitung	6
2.2.2 Der Lösungsweg über die Dynamische Programmierung	7
2.2.2.1 Die Rekursionsformel	8
2.2.2.2 Das Bellmansche Prinzip	9
2.3 Diskrete stochastische Regelungsprozesse	11
2.3.1 Begriffsherleitung	11
2.3.2 Der Lösungsweg	12
2.4 Zusammenfassende Bemerkung	13
2.5 "Das lineare Regulierungsproblem"	13
2.5.1 Das deterministische Problem	14
2.5.1.1 Problemformulierung	14
2.5.1.2 Problemlösung	16
2.5.2 Das stochastische Problem	22
2.5.2.1 Problemformulierung	22
2.5.2.2 Problemlösung	23
2.6 Zusammenfassende Bemerkung	25
3. Der Abflußprozeß als Regulierungsaufgabe	27
3.1 Allgemeines	27
3.2 Das Abflußsteuerungssystem	28
3.3 Die Abflußsteuerung im Sinne der Regelungstheorie	29
3.4 Steuerungsstrategie	31
3.5 Überprüfung der Steuerungsstrategie	31
4. Beschreibung der verwendeten Simulationsmodelle	33
4.1 Allgemeines	33

4.2	Verwendete Simulationsmodelle	34
4.2.1	Oberflächenabflußmodelle	35
4.2.2	Transportmodelle	37
4.2.2.1	Das hydrodynamische Transportmodell EXTRAN	37
4.2.2.1.1	Lösungsverfahren	37
4.2.2.1.2	Spezielle Lösungsansätze	39
4.2.2.2	Das hydrologische Transportmodell KMROUT	41
4.2.2.2.1	Darstellung des Kalinin-Miljukov-Verfahrens	41
4.2.2.2.2	Anwendung des Kalinin-Miljukov-Verfahrens auf teilgefüllte Kreisrohre	44
4.2.2.2.3	Das modifizierte KMROUT-Modell	45
5.	Fallstudie Kanalnetz "Linkes Weserufer", Bremen	48
5.1	Allgemeines	48
5.2	Existierendes Kanalnetz	48
5.2.1	Allgemeine Beschreibung	48
5.2.2	Aufbereitung der Kanalnetzdaten	50
5.2.3	Zusätzlich zu ermittelnde Daten	51
5.2.3.1	Haltungsflächen	51
5.2.3.2	Schmutzwasserabflüsse	52
5.2.4	Niederschlags-Abfluß-Simulation	54
5.3	Das vergrößerte Kanalnetz	55
5.3.1	Erstellung des Grobnetzes	55
5.3.1.1	Erste Version	55
5.3.1.2	Zweite Version	56
5.3.2	Niederschlags-Abfluß-Simulation	56
5.4	Abflußsimulation mit dem KMROUT-Verfahren	57
6.	Anwendung des Steuerungsalgorithmus	59
6.1	Ziel der Steuerung	59
6.2	Beschreibung des Steuerungskonzeptes	60
7.	Zusammenfassung	63
	Schlußwort	64
	Literaturverzeichnis	65
	Bezeichnungen	69

Anlagen

Anhang A: Zustandsformulierung eines Kanal-
netzes ausgehend vom K-M-Verfahren

Anhang B: Algorithmen und Programme

1. Einleitung

1.1 Allgemeine Einführung

Mit der Entwicklung geschlossener Siedlungsformen im Altertum entstanden auch die ersten funktionsfähigen Kanalsysteme. In Deutschland begann der systematische Ausbau von Kanalisationsnetzen in der Mitte des 19. Jahrhunderts. Man unterscheidet hierbei zwei Verfahren der Entwässerung: zum einen das Trennsystem, bei dem das Schmutzwasser (hierzu gehören häusliche und industrielle Abwässer) und das Regenwasser in separaten Kanalsträngen abgeleitet wird und zum anderen das Mischsystem, in dem das Schmutzwasser und Regenwasser zusammen in einem Kanal zur Kläranlage geführt wird. Die zunehmende Urbanisierung, die eine zwangsläufige Erhöhung des Schmutzwassers zur Folge hat und die durch Niederschlag verursachten Wassermengen können zu Überschwemmungen und/oder Überlauf-tätigkeiten der teilweise mehr als 100 Jahre alten Mischwasserkanal-netze führen, die eine nicht zu unterschätzende Gewässerbelastung darstellen. Solche Überschwemmungen sind oftmals die Folge unzurei-chender hydraulischer Kapazitäten der Netze oder aber die ineffiziente Ausnutzung der vorhandenen Gesamtnetzkapazitäten. Eine notwendige Sanierung derartiger Kanalsysteme wird im wesentlichen in drei Bereichen vorgenommen. Diese dienen der Erhaltung der Bausubstanz des Kanalnetzes, der Anpassung der Netzkapazität an die gestiegenen Abwassermengen und die Verringerung der aus den Netzen in die Gewässer überlaufenden Schmutzstoffmengen infolge der in den letzten Jahren stärker hervorgehobenen Gewässerschutzanforderungen. Im allgemeinen wird unter dem Begriff Sanierung der Bau neuer Anlagen verstanden. Die Möglichkeit, mit betrieblichen Maßnahmen auch eine Verbesserung der bestehenden Verhältnisse erreichen zu können, kann als eine kostengünstigere Alternative angesehen werden, wenn es gelingt, den niederschlagsbestimmten Abfluß zu regeln, so daß eine "optimale" Ausnutzung des vorhandenen Kanalvolumens erreicht und der Zufluß zu den Kläranlagen auf längere Sicht beständiger wird. Mit Hilfe mathematischer Abfluß- und Gewässergütesimulations-modellen können die Bewirtschaftung und Optimierung des Betriebes von Stadtentwässerungssystemen auf ihre Realisierbarkeit und Wirt-

schaftlichkeit hin untersucht werden. Diese Vorgehensweise hat seit ca. 10 Jahren in den USA dazu geführt, Konzepte zur Steuerung von Kanalisationen zu entwickeln.

In einigen Großstädten wie Seattle, San Francisco, Minneapolis, wird versucht, zentrale on-line gesteuerte Regelungssysteme für den Mischwasserabfluß auszuarbeiten und anzuwenden. In Deutschland beschäftigen sich u.a. die Städte Hamburg und Bremen mit der Entwicklung solcher Abflußüberwachungs- und Steuerungssysteme.

Nachfolgend soll eine mögliche mathematische Vorgehensweise und die notwendigen Arbeitsschritte zur Erarbeitung eines solchen Abflußregelungssystems anhand des Mischwasserkanalsystems "Linkes Weserufer" der Stadt Bremen dargestellt werden.

1.2 Aufbau der Arbeit

Im folgenden wird eine kurze Zusammenstellung der Inhalte der nachfolgenden Kapitel gegeben.

In Kapitel 2 wird dargestellt, daß die dynamische Programmierung, basierend auf dem Optimalitätsprinzip von Bellman, mit Erfolg in der Regelungstheorie verwendet werden kann. Für eine quadratische Zielfunktion und ein System von linearen Differenzgleichungen führt die Optimierung zu einer besonderen Problemstellung: dem Regulierungsproblem. Es wird sowohl der diskret deterministische wie auch stochastische Fall mit ihren Lösungsalgorithmen betrachtet. Eine Übertragung auf die wasserwirtschaftliche Problemstellung erfolgt in Kapitel 3. Kapitel 4 beschreibt die verwendeten Niederschlags-Abfluß-Simulationsmodelle HYSTEM und EXTRAN. Außerdem wird das hydrologische Abflußmodell KMR0UT erläutert, das auf dem Kalinin-Miljukov-Verfahren zur Wellenablaufberechnung in offenen Gerinnen basiert. Die notwendigen Vorarbeiten für die Anwendung eines Steuerungsalgorithmus sind in Kapitel 5 anhand des Kanalnetzes "Linkes Weserufer", Bremen zusammengestellt. Kapitel 6 beschreibt die Ergebnisse, die bei Anwendung des diskreten deterministischen Regulierungsalgorithmus durch berechnete Steuerungseingriffe im

Pumpwerk Krimpel erreicht wurden. Das abschließende Kapitel 7 gibt ein kurzes Resümee - und einen Ausblick auf die verbleibende Arbeit-.

Zu dieser Arbeit gehören außer den erwähnten Anlagen auch zwei Anhänge, wobei der erste (A), die Vorgehensweise für die Zustandsbeschreibung eines Kanalnetzes auf der Grundlage des KMROUT-Verfahrens enthält. Anhang B umfaßt die Beschreibung und Programmlisten der für diese Arbeit erstellten EDV-Programme.

2. Regelungstheorie und Dynamische Programmierung

2.1 Begriffserläuterungen

Die Regelungstheorie (engl. control-theory, im Sinne von Theorie der Steuerung und Regelung komplexer Systeme) betrachtet Systeme, deren Prozesse ganz oder teilweise steuer- und/oder regelbar sind. In erster Linie interessieren hierbei dynamische Systeme, an denen sich zeitliche Veränderungen wahrnehmen lassen, welche durch innere oder äußere Einflüsse hervorgerufen werden. Die Abstraktion eines betrachteten physikalischen Systems führt zunächst dazu, daß es für jeden Zeitpunkt t durch ein endliches System von Größen $x_1(t)$, $x_2(t)$, ..., $x_n(t)$ dargestellt wird. Diese Größen, die man **Zustandsvariablen** nennt, bilden die Komponenten eines Vektors, des **Zustandsvektors** $\underline{x}(t)$.

Der Zusammenhang zwischen der zeitlichen Veränderung des Systems und seinem Zustand wird durch die Ableitung des Zustandsvektors nach der Zeit, \underline{dx}/dt beschrieben, wobei die Zeit kontinuierlich gemessen wird. Die vereinfachende Annahme, die Änderungsrate des Systems hänge einzig und allein von dessen augenblicklichem Zustand und auf keinen Fall von seiner Vorgeschichte ab, führt zur mathematischen Beschreibung eines Prozesses durch ein System von gewöhnlichen Differentialgleichungen

$$\frac{dx_i}{dt} = g(x_i, t) \quad x_i(0) = c_i \quad i = 1, \dots, n$$

wobei die Größen c_i die Anfangszustände des Systems festlegen.

Wird das System nur in diskreten Zeitschritten betrachtet, so gehen die Differentialgleichungen in Differenzgleichungen über. In Vektorschreibweise ergibt sich hierfür die Systembeschreibung

$$\underline{x}(t+\Delta) = g(\underline{x}(t), t), \quad \underline{x}(0) = \underline{c} \quad (2.1)$$

Da das im weiteren Verlauf der Arbeit betrachtete Abflußverhalten eines Kanalsystems in diskreten Zeitschritten erfolgt, wird im folgenden nur dieser Fall dargestellt. Die Vorgehensweise bei kontinuierlichen Prozessen ist in der angegebenen Literatur, z.B. /4, 6, 19/ beschrieben.

Um die Leistung eines Systems zu verbessern, kann es äußeren Einflüssen ausgesetzt werden und/oder seine Struktur verändert werden. Solche eingreifenden Maßnahmen nennt man **Steuerung** oder **Regelung** und Prozesse dieser Art **Regelungsprozesse**. Die Gleichung (2.1) erhält dann die Gestalt

$$\underline{x}(t+\Delta) = g(\underline{x}(t), \underline{u}(t)), \quad \underline{x}(0) = \underline{c} \quad (2.2)$$

$\underline{u}(t)$ stellt den sogenannten **Steuerungsvektor** dar. Wird der Prozeß auch durch Störgrößen \underline{r} beeinflusst, so wird (2.2) zu:

$$\underline{x}(t+\Delta) = g(\underline{x}(t), \underline{u}(t), \underline{r}), \quad \underline{x}(0) = \underline{c} \quad (2.3)$$

Während $\underline{u}(t)$ als Regelgröße durch bewußtes, planmäßiges Handeln festgelegt wird, ist die jeweilige Ausprägung von \underline{r} als Störgröße des Prozesses zufälliger Natur und es ist lediglich die Verteilungsfunktion von \underline{r} , $V(\underline{r})$ bekannt. Man nennt dies einen **stochastischen Regelungsprozeß**, denn das Ergebnis eines Eingriffs $\underline{u}(t)$ und auch das des unregulierten Prozesses, $\underline{u}(t) = 0$, ist ungewiß.

Nachdem man dem physikalischen System ein mathematisches Modell zugeordnet hat, gilt es, das Verhalten des Systems in irgendeiner Form zu bewerten. Zum einen kann die Systemleistung dadurch bewertet werden, indem der Zustandsvektor $\underline{x}(t)$ mit einem bestimmten vorgegebenen Vektor $\underline{z}(t)$ verglichen wird. In anderen Fällen stellt die Systemleistung selbst schon ein Bewertungsmaß dar.

Das am häufigsten verwendete Kriterium baut auf der mittleren quadratischen Abweichung auf.

Dabei wird unter Berücksichtigung der Skalarprodukt-Schreibweise

$$(\underline{x}-\underline{z})' \cdot (\underline{x}-\underline{z}) = \sum_{i=1}^n (x_i - z_i)^2 \quad (2.4)$$

das zeitliche Mittel

$$\sum_{t=0}^n (\underline{x}-\underline{z})' \cdot (\underline{x}-\underline{z}) \quad (2.5)$$

als ein Maß für die Güte des Systems benutzt.

Wenn $h(\underline{x}(t) - \underline{z}(t))$ irgend ein Maß für die augenblickliche Abweichung der Größe $\underline{x}(t)$ von $\underline{z}(t)$ bedeutet, so soll das Funktional

$$J = \sum_{t=0}^n h(\underline{x}-\underline{z})(t),$$

das ein Maß für die Gesamtabweichung der Größe \underline{x} vom gewünschten Zustand \underline{z} darstellt, zu einem Minimum gemacht werden.

Funktionale, die die Leistungsgüte des Systems bewerten, werden **Güte-, Ziel- oder auch Kostenfunktion**, je nach der unmittelbaren physikalischen Bedeutung des festgelegten Kriteriums, genannt. Über die Untersuchungen von (2.2) und (2.3) gibt es eine umfangreiche Literatur (siehe etwa / 4 , 6 , 10 /). Insbesondere wenn (2.2) / (2.3) ein lineares System von der Gestalt

$$\begin{aligned} \underline{x}(t+\Delta) &= A \cdot \underline{x} + \underline{u} & , & & \underline{x}(0) &= \underline{c} \\ \text{bzw. } \underline{x}(t+\Delta) &= A \cdot \underline{x} + \underline{u} + \underline{r} & , & & \underline{x}(0) &= \underline{c} \end{aligned}$$

ist und $h(x-z)$ eine Summe von Skalarprodukten $(\underline{x}-\underline{z})' (\underline{x}-\underline{z}) + \underline{u}' \underline{u}$, eine quadratische Funktion von \underline{x} und \underline{u} , lassen sich explizite Lösungen in geschlossener Form angeben. Ohne auf weitere Methoden einzugehen, wird in dieser Arbeit ein Lösungsweg mit Hilfe der dynamischen Programmierung aufgezeigt.

2.2 Diskrete deterministische Regelungsprozesse

2.2.1 Begriffsherleitung

Unter einem **diskreten** Prozeß versteht man einen Prozeß, auf den in endlich vielen oder höchstens abzählbar unendlich vielen Zeitpunkten Entscheidungen, d.h. Transformationen ausgeübt werden. **Deterministisch** bedeutet, daß die Wahl eines bestimmten \underline{u}^* , also die Entscheidung (Steuerung) bei vorgegebenem Anfangszustand $\underline{x}(0)$, ein eindeutiges Ergebnis $T(\underline{x}(0), \underline{u}^*)$ zur Folge hat. Man betrachte einen Prozeß der folgendermaßen abläuft:

Im Anfangszeitpunkt und ausgehend von einem Anfangszustand, \underline{x}_1 genannt, wird die erste Entscheidung \underline{u}_1 getroffen. Das Ergebnis ist ein neuer Zustand \underline{x}_2 , der durch die Beziehung

$$\underline{x}_2 = T(\underline{x}_1, \underline{u}_1)$$

bestimmt wird. Von hier aus wird eine zweite Entscheidung, \underline{u}_2 , gefällt, die als neuen Zustand \underline{x}_3 liefert, der sich bestimmt aus

$$\underline{x}_3 = T(\underline{x}_2, \underline{u}_2)$$

Führt man so fort, so erhält man allgemein für $N \in \mathbb{N}$ ein \underline{x}_N , gegeben durch

$$\underline{x}_N = T(\underline{x}_{N-1}, \underline{u}_{N-1})$$

Dieser Prozeß, bei dem nur eine endliche Anzahl von Entscheidungen (N) vorkommen, nennt man auch einen **N-Stufen-Prozeß**. Prozesse mit unendlich vielen Stufen werden im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet.

Dem N-Stufen-Prozeß wird die skalare Funktion

$$J(\underline{x}_1, \dots, \underline{x}_N; \underline{u}_1, \dots, \underline{u}_N)$$

zugeordnet, mit deren Hilfe man die im einzelnen zu wählenden Folgen von Entscheidungen $\underline{u}_1, \underline{u}_2, \dots, \underline{u}_N$ und Zuständen $\underline{x}_1, \underline{x}_2, \dots, \underline{x}_N$ bewertet. Sie wird **Ziel-** oder **Gütefunktion** genannt. Der Sinn des Regelungsprozesses liegt nun darin, die \underline{u}_i so zu wählen, daß diese Funktion der \underline{x}_i und \underline{u}_i zum Minimum wird.

2.2.2 Der Lösungsweg über die Dynamische Programmierung

Für den in dieser Arbeit gewählten Weg zur Lösung der Minimierungsaufgabe wird zunächst von der Funktion J die **Markov-Eigenschaft** in der folgenden Form gefordert:

Von den nach einer beliebigen Anzahl von Entscheidungen (z.B. k) verbleibenden $N-k$ Stufen des Entscheidungsprozesses wird verlangt, daß ihr Einfluß auf das Gesamtziel nur noch vom Zustand des Systems nach der k -ten sowie den darauffolgenden Entscheidungen abhängt.

Beispiele für Zielfunktionen, bei denen diese Eigenschaft zutrifft, sind u.a.

$$J = \sum_{i=1}^N g(\underline{x}_i, \underline{u}_i)$$

oder wenn man nur am Endzustand interessiert ist

$$J = g(\underline{x}_N, \underline{u}_N)$$

Man betrachte die Aufgabe, die Funktion

$$g(\underline{x}_1, \underline{u}_1) + g(\underline{x}_2, \underline{u}_2) + \dots + g(\underline{x}_N, \underline{u}_N) \quad (2.6)$$

Über alle Werte \underline{u}_i zu minimieren, wobei

$$\underline{x}_i = T(\underline{x}_{i-1}, \underline{u}_{i-1}), \quad i = 2, 3, \dots, N \quad (2.7)$$

gilt und setze die Existenz des Minimums voraus. Ein Grundgedanke zur Lösung besteht darin, das Problem nicht als einzelnes Problem mit festen Werten für \underline{x}_1 und N zu sehen, sondern es in eine Schar von Minimierungsprozessen einzubetten.

Für die Erzeugung dieser Schar von Minimierungsprozessen wird davon ausgegangen, daß der tatsächliche Minimalwert der Funktion (2.6) zum einen vom Anfangszustand \underline{x}_1 und zum anderen von der Anzahl N des mehrstufigen Regelungsprozesses abhängt. Man bestimmt einen festen Wertebereich für \underline{x}_1 und läßt N die Werte $1, 2, \dots$ durchlaufen. Hierdurch ergibt sich eine Folge von Funktionen $\{f_N(\underline{x}_1)\}$, die durch die Beziehung

$$f_N(\underline{x}_1) = \min_{\{\underline{u}_i\}} [g(\underline{x}_1, \underline{u}_1) + g(\underline{x}_2, \underline{u}_2) + \dots + g(\underline{x}_N, \underline{u}_N)]. \quad (2.8)$$

definiert werden.

2.2.2.1 Die Rekursionsformel

(2.8) kann mit

$$f_N(\underline{x}_1) = \min_{\underline{u}_1} \min_{\underline{u}_2} \dots \min_{\underline{u}_N} [g(\underline{x}_1, \underline{u}_1) + g(\underline{x}_2, \underline{u}_2) + \dots + g(\underline{x}_N, \underline{u}_N)]$$

umgeformt werden zu

$$f_N(\underline{x}_1) = \min_{\underline{u}_1} [g(\underline{x}_1, \underline{u}_1) + \min_{\underline{u}_2} \min_{\underline{u}_3} \dots \min_{\underline{u}_N} \{g(\underline{x}_2, \underline{u}_2) + \dots + g(\underline{x}_N, \underline{u}_N)\}] \quad (2.9)$$

Der Ausdruck

$$\min_{\underline{u}_2} \min_{\underline{u}_3} \dots \min_{\underline{u}_N} \{g(\underline{x}_2, \underline{u}_2) + \dots + g(\underline{x}_N, \underline{u}_N)\} \quad \text{für } N > 2$$

stellt den Ertrag aus einem $(N-1)$ -stufigen Regelungsprozeß mit dem Anfangszustand \underline{x}_2 dar. Also gilt

$$f_{N-1}(\underline{x}_2) = \min_{\underline{u}_2} \min_{\underline{u}_3} \dots \min_{\underline{u}_N} \{g(\underline{x}_2, \underline{u}_2) + \dots + g(\underline{x}_N, \underline{u}_N)\} \quad (2.10)$$

(2.9) läßt sich unter Anwendung von (2.10) wesentlich vereinfachen und wird zu

$$f_N(\underline{x}_1) = \min_{\underline{u}_1} g(\underline{x}_1, \underline{u}_1) + f_{N-1}(\underline{x}_2)$$

Da nach (2.7) $\underline{x}_2 = T(\underline{x}_1, \underline{u}_1)$ ist, folgt

$$f_n(\underline{x}_1) = \min_{\underline{u}_1} g(\underline{x}_1, \underline{u}_1) + f_{N-1}(T(\underline{x}_1, \underline{u}_1)) \quad (2.11)$$

für $N = 2, 3, \dots$

(2.11) stellt somit die Beziehung dar, die die einzelnen Glieder der Folge $f_N(\underline{x}_1)$ miteinander verknüpft. Das Element $f_1(\underline{x}_1)$ läßt sich hierbei verhältnismäßig leicht bestimmen, da sich die Minimierung nur über \underline{u}_1 erstreckt.

2.2.2.2 Das Bellmansche Optimalitätsprinzip

Ein Problem, das mit der dynamischen Programmierung gelöst werden soll, muß folgende Struktur aufweisen oder darin überführbar sein /5/ :

- a) Das Problem läßt sich in Stufen zerlegen, und zwar derart, daß das physikalische System auf jeder Stufe durch bestimmte Zustandsvariablen beschrieben werden kann.
- b) Auf jeder Stufe wird über die Wahl bestimmter Regel-(Kontroll-)variablen entschieden.
- c) Der Effekt einer Entscheidung überträgt sich auf die Zustandsvariablen.
- d) Die vorangegangenen Stufen (Vergangenheit) beeinflussen die Entscheidung zukünftiger Stufen nicht.
- e) Das Ziel der Problemlösung ist darstellbar als die Minimierung (Maximierung) einer Funktion, die bezüglich des Extremum von den Zustandsvariablen abhängt.

Wird diese etwas sehr vage Definition der Struktur eines Problems der dynamischen Programmierung mit dem in den letzten zwei Abschnitten Beschriebenen verglichen, so sind gewisse Entsprechungen unschwer erkennbar. Bevor darauf näher eingegangen wird, sind noch einige

Bezeichnungen einzuführen:

Eine Folge von zulässigen Entscheidungen (Regelungen) $\{\underline{u}_1, \underline{u}_2, \dots, \underline{u}_N\}$ wird eine **Entscheidungspolitik (-strategie)** oder auch einfach **Politik** genannt. Eine Entscheidungspolitik, die den Minimal- (Maximal-) wert der Zielfunktion liefert, d.h. die $f_N(\underline{x}_1)$ hervorbringt, soll eine **optimale Politik** heißen.

Hat ein Problem die Struktur a) bis e), so lassen sich die Werte der Steuerungsvariablen, die die Zielfunktion optimieren, rekursiv mit Hilfe von Politikfunktionen, wie in Abschnitt 2.2.2.1 beschrieben, ableiten.

Daß man die optimale Politik derart findet, folgt aus dem **Bellman - schen Optimalitätsprinzip /5/ :**

Eine optimale Politik hat die Eigenschaft ,daß ungeachtet des Anfangszustandes und der ersten Entscheidung, die restlichen Entscheidungen optimal bezüglich des Zustandes sind, der aus der ersten Entscheidung resultiert.

Über die Annahme, die Aussage sei falsch, verifiziert sich die Richtigkeit des Prinzips /5 ,19 / . Das Optimalitätsprinzip erlaubt, die Sequenzeigenschaften a) bis d) eines Problems auszunutzen, so daß die Rekursionsformel (2.11) mit dessen Hilfe ebenfalls hergeleitet werden kann.

Das Ergebnis einer ersten getroffenen Entscheidung \underline{u}_1 drückt sich im Übergang von \underline{x}_1 zu $T(\underline{x}_1, \underline{u}_1)$ und der Reduzierung eines N-stufigen Prozesses auf einen (N-1)-stufigen Prozeß aus. Nach dem Optimalitätsprinzip wird sich der von den letzten (N-1)-Stufen eingehende Beitrag zum minimalen Ertrag auf $f_{N-1}(T(\underline{x}_1, \underline{u}_1))$ belaufen.

Es gibt also ein \underline{u}_1 , für das

$$f_N(\underline{x}_1) = g(\underline{x}_1, \underline{u}_1) + f_{N-1}(T(\underline{x}_1, \underline{u}_1)) \quad (2.11)'$$

gilt. \underline{u}_1 muß so gewählt werden, daß die rechte Seite der Gleichung (2.11)' zu einem Minimum wird.

Die endgültige Gleichung lautet somit

$$f_N(\underline{x}_1) = \min_{\underline{u}_1} (g(\underline{x}_1, \underline{u}_1) + f_{N-1}(T(\underline{x}_1, \underline{u}_1))) \quad (2.12)$$

Diese Vorgehensweise stellt die grundlegende Idee der dynamischen Programmierung dar. Es wird ein umfangreiches Optimierungsmodell in mehrere, einfacher zu lösende Teilprobleme derart zerlegt, daß die sequentielle Abarbeitung letztlich das Optimum des komplexen Problems liefert. Die Lösung wird somit stufenweise - zuerst die Wahl von \underline{u}_1 , dann die Wahl von \underline{u}_2 und so weiter - ermittelt.

2.3 Diskrete stochastische Regelungsprozesse

Um die Analogie mit den deterministischen Prozessen deutlich zu machen, wird eine zu Abschnitt 2.2 parallele Beschreibungsweise vorgenommen.

2.3.1 Begriffsherleitung

Zunächst bleibt zu definieren, was unter einem **diskreten stochastischen Prozeß** zu verstehen ist. "Diskret" kennzeichnet wie zuvor einen Prozeß, bei dem die Transformationen an endlich vielen oder höchstens abzählbar unendlich vielen Zeitpunkten vorgenommen werden. **Stochastisch** bedeutet, daß mit der Entscheidung \underline{u} kein eindeutiges Ergebnis festgelegt wird, sondern eine Menge von möglichen Ergebnissen $\{T(\underline{x}, \underline{u}, \underline{r})\}$, wobei \underline{r} einen stochastischen Vektor mit gegebener Verteilungsfunktion darstellt.

Der Prozeßablauf läßt sich folgendermaßen beschreiben:

Zu einem anfänglichen Zeitpunkt und von einem Anfangszustand \underline{x}_1 ausgehend, wird eine erste Entscheidung \underline{u}_1 gefällt. Das Resultat ist ein stochastischer Zustand $\underline{x}_2 = T(\underline{x}_1, \underline{u}_1, \underline{r}_1)$. Mit dem neuen Zustand \underline{x}_2 wird eine Entscheidung \underline{u}_2 gefällt, die einen dritten Zustand $\underline{x}_3 = T(\underline{x}_2, \underline{u}_2, \underline{r}_2)$ hervorbringt und so weiter.

Alle auf den ersten Zustand des Systems folgenden Zustände sind stochastische Variablen, und dasselbe gilt auch für die Steuervektoren \underline{u}_i , da diese vom augenblicklichen Systemzustand abhängen.

Es sei bemerkt, daß davon ausgegangen worden ist, daß vor jeder

Entscheidung der Zustand des Systems vollständig bekannt (beobachtbar) ist. Im Gegensatz zu stochastischen Prozessen, bei denen die Systemzustände der einzelnen Stufen nur unvollständig bekannt sind und dadurch zu komplizierteren Formen der Beschreibung des Systemzustandes zwingen.

Wie zuvor wird jedem N-stufigen Regelungsprozeß eine Zielfunktion

$$F(x_1, x_2, \dots, x_N; u_1, u_2, \dots, u_N; r_1, r_2, \dots, r_N)$$

zugeordnet, die selbst eine stochastische Größe ist, durch die die gewählte Folge von Entscheidungen bewertet wird. Die bisherige Minimierungsaufgabe wird bei stochastischen Prozessen i.a. durch die Aufgabe der Minimierung des Erwartungswertes von F ersetzt.

2.3.2 Der Lösungsweg

Der betrachtete diskrete stochastische Prozeß sei durch die Form

$$x_{t+1} = g(x_t, y_t, r_t) \quad , \quad x_0 = c \quad , \quad t = 1, \dots, N \quad (2.13)$$

gegeben, wobei die r_i ein System von unabhängigen stochastischen Vektoren aufspannen und die y_i die Steuerungsvektoren darstellen, ein System von durchaus abhängigen stochastischen Vektoren. Das Zielkriterium sei, den Prozeß über die Kontrollvariable y_t so zu regeln, daß der Erwartungswert einer Summe der Form

$$F_1 = h(x_1, y_1, r_1) + h(x_2, y_2, r_2) + \dots + h(x_N, y_N, r_N) \quad (2.14)$$

minimiert wird. Dieser Ausdruck kann z.B. als ein Maß für die Abweichung des Systems von irgendeinem gewünschten Verlauf aufgefaßt werden.

Unter Verwendung der Zielfunktion (2.14) führt man die Funktion

$$f_N(c) = \min_{\{y_i\}} (E(F_1))_{\{r_i\}} \quad (2.15)$$

ein.

Das Minimum wird über alle zulässigen Regelungspolitiken $y_i = y_i(u_i)$ genommen und der Erwartungswert über die r_i .

Die gemeinsame Verteilungsfunktion sei $dV(\underline{r})$. Für $N = 1$ gilt:

$$\begin{aligned} f_1(\underline{c}) &= \min_{\underline{y}_1} (E(h(\underline{c}, \underline{y}_1, \underline{r}_1))) \\ &= \min_{\underline{y}_1} \left(\int h(\underline{c}, \underline{y}_1, \underline{r}_1) \cdot dV(\underline{r}_1) \right) \end{aligned}$$

Für $N \geq 2$ ergibt sich die Rekursionsformel:

$$\begin{aligned} f_N(\underline{c}) &= \min_{\underline{y}_1} (E(h(\underline{x}_1, \underline{y}_1, \underline{r}_1)) + f_{N-1}(g(\underline{c}, \underline{y}_1, \underline{r}_1))) \\ &= \min_{\underline{y}_1} \left(\int (h(\underline{x}_1, \underline{y}_1, \underline{r}_1) + f_{N-1}(g(\underline{c}, \underline{y}_1, \underline{r}_1))) \cdot dV(\underline{r}_1) \right) \quad (2.16) \end{aligned}$$

Ähnlich wie bei den diskreten deterministischen Prozessen läßt sich diese Beziehung entweder rein analytisch herleiten, entsprechend 2.2.2.1, oder aber aus dem Optimalitätsprinzip 2.2.2.2 folgern.

2.4 Zusammenfassende Bemerkung

Als bemerkenswertes Ergebnis der letzten beiden Abschnitte 2.2 und 2.3 ist festzuhalten, daß genau die gleichen Verfahren wie bei der Behandlung der deterministischen Regelungsprozesse auf stochastische Regelungsprozesse angewandt werden und sich dabei völlig analoge Gleichungen ergeben. Rein formal gesehen, können die beiden Prozesse als vom selben Typ aufgefaßt werden. Sie unterscheiden sich lediglich darin, daß die Definition des Systemzustandes jedem einzelnen von ihnen in geeigneter Weise angepaßt wird.

Im nächsten Abschnitt wird gezeigt, wie die Formeln (2.12) und (2.16) für den Fall, daß die Systeme linear und die Zielfunktionen quadratisch sind, zu wesentlich einfacheren analytischen Rekursionsformeln führen.

2.5 "Das lineare Regulierungsproblem"

In diesem Abschnitt wird ein spezielles Regelungsproblem dargestellt, das in der Literatur als "lineares Regulierungsproblem" (engl. linear regulator problem) bezeichnet wird und dessen Lösung eine

lineare feedback Steuerung ist. Betrachtet wird ein lineares System mit einer quadratischen Zielfunktion über einen fest vorgegebenen Zeitraum. Zunächst wird die diskret deterministische Version ausführlich beschrieben, die im wesentlichen von Kalman und Koepcke /s. 19/ entwickelt wurde. Anschließend wird das für die Anwendung interessantere diskret stochastische Regulierungsproblem dargestellt.

2.5.1 Das deterministische Problem

2.5.1.1 Problemformulierung

Das System sei definiert durch

$$\underline{x}(k+1) = A(k+1,k) \cdot \underline{x}(k) + B(k+1,k) \cdot \underline{u}(k) \quad (2.17)$$

Für $k = 0, 1, \dots$, $\underline{x}(0) = \underline{c}$

mit \underline{x} - Zustandsvektor der Dim. n

\underline{u} - Steuerungsvektor der Dim. m

A - $(n \times n)$ Zustandsübertragungsmatrix

B - $(n \times m)$ Steuerungsübertragungsmatrix

Das Zielkriterium sei, den Prozeß für ein Zeitintervall $[0, N]$, $N \in \mathbb{N}$ über die Kontrollvariablen \underline{u}_t , $t = 0, \dots, N-1$, so zu regeln, daß die Funktion

$$J_N = \sum_{i=1}^N (\underline{x}'(i) \cdot Q(i) \cdot \underline{x}(i) + \underline{u}'(i-1) \cdot R(i-1) \cdot \underline{u}(i-1)) \quad (2.18)$$

minimiert wird.

$Q(i)$ und $R(i)$ sind symmetrisch, positiv semidefinite Matrizen der Dimension $(n \times n)$ bzw. $(m \times m)$. (2.17) läßt sich in Verbindung mit (2.18) als ein Prozeß interpretieren, dessen Niveau über die Zeit minimiert werden soll, verbunden mit einer weitgehenden Glättung des Prozeßverlaufs. In (2.18) ist der Index i so gewählt, daß nur Zustände, die beeinflußt werden und nur Steuerungen, die diese beeinflussen können, in J_N eingehen. Der Zustand $\underline{x}(0)$ fehlt deshalb, da er durch keinen Steuerungseingriff manipulierbar ist, während die Wahl von $\underline{u}(0)$ die Zustände $\underline{x}(1), \dots, \underline{x}(N)$ beeinflußt. Ähnliches gilt für $\underline{u}(N-1)$ als letzte Regelung, die nur noch den Endzustand

$\underline{x}(N)$ des Prozesses beeinflusst.

Da der Systemzustand in einer gewünschten Weise manipuliert werden soll, ist es günstig, wenn die zu bestimmende Steuerungsfolge $\{u(k), k = 0, 1, \dots, N-1\}$ abhängig von verfügbaren Informationen über den Systemzustand (Messungen) ist. Die Steuerung enthält somit eine Rückführung in den Regelungsprozeß (s. Abb. 2.1).

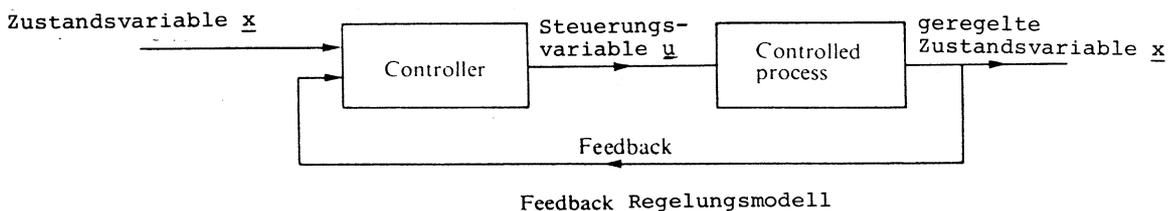


Abb. 2.1

Der Steuerungsvektor zum Zeitpunkt k kann dann in der Form

$$\underline{u}(k) = \mu_k \left[\underline{x}^*(k) \right] \quad (2.19)$$

mit $k = 0, 1, \dots, N-1$ und

$$\underline{x}^*(k) = \begin{bmatrix} \underline{x}(0) \\ \vdots \\ \underline{x}(k) \end{bmatrix}$$

geschrieben werden.

μ_k ist eine r -dimensionale Vektorfunktion der vorgegebenen Variablen, und spezifiziert eine **physikalisch realisierbare Regelungspolitik**.

Das **deterministisch lineare Regulierungsproblem** kann nun folgendermaßen formuliert werden:

Bestimme eine physikalisch realisierbare Regelungspolitik der Form (2.19) für das System aus Gleichungen (2.17), so daß die Zielfunktion (2.18) minimiert wird.

Der Begriff "Regulierung" leitet sich aus dem Ziel ab, den Zustand \underline{x} auf einem konstanten Wert zu halten (zu regulieren), der mit

dem Ursprung des Zustandsraums übereinstimmt.

Das Problem kann unter Ausnutzung des Optimalitätsprinzips (Abschnitt 2.2.2.2) behandelt werden.

2.5.1.2 Problemlösung

Sei V_N das Minimum der Zielfunktion J_N aus Gleichung (2.18):

$$V_N = \min_{\underline{u}(0)} \dots \min_{\underline{u}(N-1)} \sum_{i=1}^k [\underline{x}'(i) \cdot Q(i) \cdot \underline{x}(i) + \underline{u}'(i-1) \cdot R(i-1) \cdot \underline{u}(i-1)] \quad (2.20),$$

so kann (2.20) als ein N-stufiger Entscheidungsprozeß betrachtet werden, in dem die N Entscheidungen, $u(0)$, ..., $u(N-1)$, so zu fällen sind, daß die gegebene quadratische Form minimiert wird. Das Optimalitätsprinzip ebnet den Weg für die Entwicklung eines Verfahrens, das die Entscheidungen sequentiell herbeiführt, d.h. daß das N-stufige Problem auf N einstufige Probleme reduziert wird. Die Rekursionsformel zur Lösung des Problems wird durch Induktion hergeleitet.

Optimierungsproblem mit einer Stufe

Ausgehend von der letzten Stufe eines Regelungsprozesses wird

$$V_1 = \min_{\underline{u}(N-1)} [\underline{x}'(N) \cdot Q(N) \cdot \underline{x}(N) + \underline{u}'(N-1) \cdot R(N-1) \cdot \underline{u}(N-1)] \quad (2.21)$$

mit

$$\underline{x}(N) = A(N, N-1) \cdot \underline{x}(N-1) + B(N, N-1) \cdot \underline{u}(N-1) \quad (2.22)$$

Einsetzen von $x(N)$ in Gleichung (2.21) durch (2.22) ergibt

$$\begin{aligned} V_1 &= \min_{\underline{u}(N-1)} ([\underline{Ax} + \underline{Bu}]' \cdot Q \cdot [\underline{Ax} + \underline{Bu}] + \underline{u}' R \underline{u}) \\ &= \min_{\underline{u}(N-1)} (\underline{x}' A' Q A x + \underline{x}' A' Q B \underline{u} + \underline{u}' B' Q A x + \underline{u}' [B' Q B + R] \underline{u}) \\ &= \min_{\underline{u}(N-1)} (\underline{x}' A' Q A x + 2 \underline{x}' A' B \underline{u} + \underline{u}' [B' Q B + R] \underline{u}) \end{aligned} \quad (2.23)$$

da Q symmetrisch ist.

Zur besseren Übersichtlichkeit werden die Zeitargumente bei Zwischenrechnungen auch im folgenden weggelassen.

Das Minimum von Gleichung (2.23) wird durch Nullsetzen der Ableitung nach \underline{u} des in Klammern stehenden Ausdrucks gebildet. Die entstandene Gleichung wird unter Ausnutzung, daß $Q(N)$ und $R(N-1)$ symmetrisch sind nach \underline{u} aufgelöst und lautet:

$$\underline{u}(N-1) = - \left[B'(N,N-1) \cdot Q(N) \cdot B(N,N-1) + R(N-1) \right]^{-1} A'(N,N-1) \cdot Q(N) \cdot B(N,N-1) \cdot x(N-1) \quad (2.24)$$

Die sich ergebende Regelung ist physikalisch realisierbar und mit Berücksichtigung des momentanen Systemzustandes ermittelt worden.

Mit

$$S(N-1) = - \left[B'(N,N-1) \cdot Q(N) \cdot B(N,N-1) + R(N-1) \right]^{-1} A'(N,N-1) \cdot Q(N) \cdot B(N,N-1) \quad (2.25)$$

wird die Regelpolitik in der Form

$$\underline{u}(N-1) = S(N-1) \cdot x(N-1) \quad (2.26)$$

geschrieben.

Die $(m \times n)$ -Matrix S wird **"feedback control gain" Matrix** genannt.

Es sei bemerkt, daß S und dadurch auch \underline{u} genau nur dann existieren, wenn die $(n \times n)$ -Matrix $[B'QB + R]$ nicht singulär ist.

V_1 (2.23) errechnet sich mit (2.24) zu

$$\begin{aligned} V_1 &= \underline{x}' A' Q A \underline{x} - 2 \underline{x}' A' Q B (B' Q B + R)^{-1} B' Q A \underline{x} + \underline{x}' A' Q A (B' Q B + R)^{-1} B' Q A \underline{x} \\ &= \underline{x}'(N-1) \cdot A'(N,N-1) \cdot \left[Q(N) - Q(N) \cdot B(N,N-1) \cdot \left[B'(N,N-1) \cdot Q(N) \cdot B(N,N-1) + R(N-1) \right]^{-1} \right. \\ &\quad \left. B'(N,N-1) \cdot Q(N) \right] \cdot A(N,N-1) \cdot \underline{x}(N-1) \end{aligned}$$

Durch Definition von

$$W(N) = Q(N) \quad (2.27)$$

und

$$M(N-1) = A'(N,N-1) \cdot \left[W(N) - W(N) \cdot B(N,N-1) \cdot \left[B'(N,N-1) \cdot W(N) \cdot B(N,N-1) + R(N-1) \right]^{-1} \right. \\ \left. B'(N,N-1) \cdot W(N) \right] \cdot A(N,N-1) \quad (2.28)$$

erhält V_1 die Form

$$V_1 = \underline{x}'(N-1) \cdot M(N-1) \cdot \underline{x}(N-1) \quad (2.29)$$

und für $S(N-1)$ ergibt sich

$$S(N-1) = - [B'(N,N-1) \cdot W(N) \cdot B(N,N-1) + R(N-1)]^{-1} \cdot B'(N,N-1) \cdot W(N) \cdot A(N,N-1) \quad (2.30)$$

$W(N)$ und $M(N-1)$ sind entsprechend ihren Definitionen symmetrische $(n \times n)$ -Matrizen. Der Grund für ihre Einführung wird weiter unten ersichtlich. V_1 , das Minimum der Zielfunktion für einen einstufigen Regelungsprozeß, ist somit eine quadratische Form in $\underline{x}(N-1)$ - dem initialisierten Anfangszustand des Systems.

Zweistufiges Optimierungsproblem

Für die Ermittlung der optimalen Regelung eines zweistufigen Prozesses wird V_2 definiert.

$$V_2 = \min_{\underline{u}(N-2)} \min_{\underline{u}(N-2)} ([\underline{x}'(N-1) \cdot Q(N-1) \cdot \underline{x}(N-1) + \underline{u}'(N-2) \cdot R(N-2) \cdot \underline{u}(N-2)] + [\underline{x}'(N) \cdot Q(N) \cdot \underline{x}(N) + \underline{u}'(N-1) \cdot R(N-1) \cdot \underline{u}(N-1)])$$

Nach dem Optimalitätsprinzip kann diese Gleichung auch in der Form

$$V_2 = \min_{\underline{u}(N-2)} [\underline{x}'(N-1) \cdot Q(N-1) \cdot \underline{x}(N-1) + \underline{u}'(N-2) \cdot R(N-2) \cdot \underline{u}(N-2) + V_1] \quad (2.31)$$

geschrieben werden, da mit der Wahl von $\underline{u}(N-1)$ der Zustand $\underline{x}(N-1)$ nicht beeinflußt wird.

Das Ersetzen von V_1 in Gleichung (2.31) durch Gleichung (2.29) und die Definition der symmetrischen $(n \times n)$ -Matrix

$$W(N-1) = M(N-1) + Q(N-1) \quad (2.32)$$

ergeben für V_2

$$V_2 = \min_{\underline{u}(N-2)} [\underline{x}'(N-1) \cdot W(N-1) \cdot \underline{x}(N-1) + \underline{u}'(N-2) \cdot R(N-2) \cdot \underline{u}(N-2)] \quad (2.33)$$

Der Vergleich von Gleichung (2.21) und (2.33) zeigt, daß sie beide die gleiche Form haben und die letztere aus der früheren durch folgende Substitutionen hervorgeht:

$$\begin{aligned}
 N & \rightarrow N-1 \\
 N-1 & \rightarrow N-2 \\
 Q(N) = W(N) & \rightarrow W(N-1) \\
 R(N-1) & \rightarrow R(N-2)
 \end{aligned}$$

In Analogie zu den Gleichungen (2.26) und (2.30) ergeben sich aufgrund der angegebenen Substitutionen die Gleichungen

$$\underline{u}(N-2) = S(N-2) \cdot \underline{x}(N-2) \quad (2.34)$$

und

$$\begin{aligned}
 S(N-2) = - \left[B'(N-1, N-2) \cdot W(N-1) \cdot B(N-1, N-2) + R(N-2) \right]^{-1} \cdot B'(N-1, N-2) \cdot \\
 W(N-1) A(N-1, N-2) \quad (2.35)
 \end{aligned}$$

wobei $W(N-1)$ durch (2.32) gegeben ist, V_2 wird ebenfalls unter Benutzung der Substitution durch die Wiederholung der Schritte, die zur Gleichung (2.29) führten, bestimmt. Es folgt:

$$V_2 = \underline{x}'(N-2) \cdot M(N-2) \cdot \underline{x}(N-2) \quad (2.36)$$

mit

$$\begin{aligned}
 M(N-2) = A'(N-1, N-2) \cdot \left[W(N-1) - W(N-1) \cdot B(N-1, N-2) \cdot \left[B'(N-1, N-2) \cdot \right. \right. \\
 \left. \left. W(N-1) \cdot B(N-1, N-2) + R(N-2) \right]^{-1} \cdot B'(N-1, N-2) \cdot W(N-1) \right] \cdot \\
 A(N-1, N-2) \quad (2.37)
 \end{aligned}$$

Für die Berechnung der zwei feedback control gain Matrizen $S(N-1)$ und $S(N-2)$ muß somit folgendermaßen vorgegangen werden:

Zuerst wird $W(N) = Q(N)$ in Gleichung (2.30) zur Bestimmung von $S(N-1)$ und in Gleichung (2.28) zur Bestimmung von $M(N-1)$ eingesetzt. Anschließend wird mit $M(N-1)$ und $Q(N-1)$ $W(N-1)$ (2.32) errechnet. Durch Einsetzen von $W(N-1)$ in Gleichung (2.35) bestimmt sich $S(N-2)$.

Zur Berechnung von V_2 , wird $W(N-1)$ in Gleichung (2.37) zur Ermittlung von $M(N-2)$ eingesetzt. Mit dem Zustand $\underline{x}(N-2)$ kann nach Gleichung (2.36) V_2 bestimmt werden.

Es ist zu beachten, daß die Berechnung rekursiv rückwärts in der Zeit durchgeführt wird.

j-stufiges Optimierungsproblem

Für $j \geq 3$ wird die optimale Regelung zum Zeitpunkt $N-j+1$ für einen $j-1$ -Stufen umfassenden Prozess durch die folgenden Beziehungen bestimmt:

$$W(N-j+2) = M(N-j+2) + Q(N-j+2) \quad (2.37)^*$$

$$S(N-j+1) = - [B'(N-j+2, N-j+1) \cdot W(N-j+2) \cdot B(N-j+2, N-j+1) + R(N-j+1)]^{-1} \cdot A'(N-j+2, N-j+1) \cdot W(N-j+2) \cdot B(N-j+2, N-j+1) \quad (2.38)$$

$$\underline{u}(N-j+1) = S(N-j+1) \cdot \underline{x}(N-j+1) \quad (2.39)$$

$$M(N-j+1) = A'(N-j+2, N-j+1) \cdot W(N-j+2) \cdot A(N-j+2, N-j+1) + A'(N-j+2, N-j+1) \cdot W(N-j+2) \cdot B(N-j+2, N-j+1) \cdot S(N-j+1) \quad (2.40)$$

$$V_{j-1} = \underline{x}'(N-j+1) \cdot M(N-j+1) \cdot \underline{x}(N-j+1) \quad (2.41)$$

wobei W und M symmetrische $(n \times n)$ -Matrizen sind.

Für die j -te Stufe des Prozesses ergibt sich aus dem Optimalitätsprinzip

$$V_j = \min_{\underline{u}(N-j)} [\underline{x}'(N-j+1) \cdot Q(N-j+1) \cdot \underline{x}(N-j+1) + \underline{u}'(N-j) \cdot R(N-j) \cdot \underline{u}(N-j) + V_{j-1}]$$

mit

$$\underline{x}(N-j+1) = A(N-j+1, N-j) \cdot \underline{x}(N-j) + B(N-j+1, N-j) \cdot \underline{u}(N-j) \quad (2.42)$$

nach Gleichung (2.17)

Nach Einsetzen von Gleichung (2.41) und (2.42) ergibt sich V_j zu

$$\begin{aligned} V_j &= \min_{\underline{u}} [(\underline{Ax} + \underline{Bu})' \cdot W \cdot (\underline{Ax} + \underline{Bu}) + \underline{u}' \cdot R \cdot \underline{u}] \\ &= \min_{\underline{u}} [\underline{x}' A' W A x + 2 \underline{x}' A' W B u + \underline{u}' \cdot (B' W B + R) \cdot \underline{u}] \end{aligned} \quad (2.43)$$

mit der Definition

$$W(N-j+1) = M(N-j+1) + Q(N-j+1) \quad (2.44)$$

Die Ableitung nach \underline{u} von (2.43) lautet:

$$2 \underline{x}' A' W B + 2 \underline{u}' (B' W B + R) = 0 \quad (2.43^*)$$

Für die Regelpolitik $\underline{u}(N-j)$ folgt hieraus:

$$\underline{u}(N-j) = S(N-j) \cdot \underline{x}(N-j) \quad (2.45)$$

mit

$$S(N-j) = -[B'(N-j+1, N-j) \cdot W(N-j+1) \cdot B(N-j+1, N-j) + R(N-j)]^{-1} \cdot B'(N-j+1, N-j) \cdot W(N-j+1) \cdot A(N-j+1, N-j) \quad (2.46)$$

Die Berechnung von V_j (2.43) erfolgt mit (2.45) und (2.46):

$$V_j = [\underline{x}' A' W A \underline{x} - 2 \underline{x}' A' W B (B' W B + R)^{-1} B' W A \underline{x} + \underline{x}' A' W B (B' W B + R)^{-1} B' W A \underline{x}] = \underline{x}'(N-j) \cdot M(N-j) \cdot \underline{x}(N-j) \quad (2.47)$$

wobei

$$M(N-j) = A'(N-j+1, N-j) \cdot W(N-j+1) \cdot A(N-j+1, N-1) + A'(N-j+1, N-j) \cdot W(N-j+1) \cdot B(N-j+1, N-j) \cdot S(N-j) \quad (2.48)$$

Ein Vergleich der Gleichungen (2.37) bis (2.41) mit den Gleichungen (2.44) bis (2.48) zeigt, daß sich die Gleichungen - bis auf die Zeitindizes - entsprechen.

Die Gleichungen (2.44) bis (2.48) definieren somit die optimale Regelpolitik für das diskret lineare Regulierungsproblem, wobei zur Initialisierung $W(N) = Q(N)$ für $j=1$ in Gleichung (2.46) gesetzt wird, um $S(N-1)$ zu berechnen; $j=1, \dots, N$.

Die optimale Regelung ist als lineare Transformation des momentanen Zustandes physikalisch realisierbar. Der "controller" in Abb. 2.1 entspricht somit der Zeit-Varianten (mxn) gain Matrix $S(N-j)$, die so zu bestimmen ist, daß J_N in Gleichung (2.18) minimiert wird.

Es bleibt noch zu zeigen, daß die Regelgröße $\underline{u}(N-j)$, die durch die Gleichungen (2.44) bis (2.46) gegeben ist, die Zielfunktion tatsächlich minimiert. Die Verwendung von Gleichung (2.43*) beinhaltet nur die notwendige Bedingung für ein Minimum. Die hinreichende Bedingung erfüllt sich aus der Tatsache, daß die Matrix

$$[B'(N-j+1, N-j) \cdot W(N-j+1) \cdot B(N-j+1, N-j) + R(N-j)]$$

für alle $j = 1, 2, \dots, N$ positiv definit ist.

Die zuvor dargestellten Ergebnisse können mit der Abänderung des Zeitindex in $k = N-j$ zu folgendem Theorem zusammengefaßt werden /19/:

Theorem

Die optimale Regelpolitik für ein deterministisches lineares Regu-
lierungsproblem ist eine lineare feedback Regelpolitik

$$\underline{u}(k) = S(k) \cdot x(k), \quad (2.49)$$

wobei die $(m \times n)$ feedback gain Matrix $S(k)$ rekursiv durch die folgenden Relationen bestimmt wird:

$$W(k+1) = M(k+1) + Q(k+1) \quad (2.50)$$

$$S(k) = - \left[B'(k+1,k) \cdot W(k+1) \cdot B(k+1,k) + R(k) \right]^{-1} \cdot B'(k+1,k) \cdot W(k+1) \cdot A(k+1,k) \quad (2.51)$$

$$M(k) = A'(k+1,k) \cdot W(k+1) \cdot A(k+1,k) + A'(k+1,k) \cdot W(k+1) \cdot B(k+1,k) \cdot S(k) \quad (2.52)$$

mit $k = N-1, N-2, \dots, 0,$

$$W(N) = Q(N)$$

Die $(m \times m)$ Matrix

$$\left[B'(k+1,k) \cdot W(k+1) \cdot B(k+1,k) + R(k) \right]$$

sei für alle k positiv definit.

Das Minimum der Zielfunktion für $(N-k)$ -Stufen des Prozesses ergibt sich aus

$$V_{N-k} = \underline{x}'(k) \cdot M(k) \cdot \underline{x}(k)$$

Die Matrix $S(k)$ kann vor dem eigentlichen Prozeßbeginn berechnet werden, da sie nach den Gleichungen (2.50) bis (2.52) nur von den bekannten Systemmatrizen A, B, Q und R abhängt. Sie wird rekursiv rückwärts bzgl. der Zeit bestimmt.

2.5.2 Das stochastische Problem

2.5.2.1 Problemformulierung

Analog zu Abschnitt 2.5.1 wird ein einfacher linearer stochastischer Prozeß betrachtet mit der Form

$$\underline{x}(k+1) = A(k) \cdot \underline{x}(k) + B(k) \cdot \underline{u}(k) + \underline{r}(k) \quad (2.53)$$

$k = 0, 1, \dots, N$

Zu bestimmen ist eine Regelpolitik $\{\mu_0(x(0)), \dots, \mu_{N-1}(x(n-1))\}$, die die quadratische Zielfunktion

$$E_{\underline{r}(k)} \left\{ \underline{x}'(N) \cdot Q(N) \cdot \underline{x}(N) + \sum_{k=0}^{N-1} (\underline{x}'(k) \cdot Q(k) \cdot \underline{x}(k) + \underline{u}'(k) \cdot R(k) \cdot \underline{u}(k)) \right\} \quad (2.54)$$

minimiert.

Es gelte: \underline{x} - Zustandsvektor der Dim. n

\underline{u} - Steuerungsvektor der Dim. m

A - $(n \times n)$ - Matrix

B - $(m \times n)$ - Matrix

Q - symmetrisch, positiv semidefinite $(n \times n)$ - Matrix

R - symmetrisch, positiv definite $(m \times m)$ - Matrix

\underline{r} - unabhängiger Zufallsvektor mit gegebener Verteilungsfunktion

2.5.2.2 Problemlösung

Nach der ausführlichen Betrachtung des deterministischen Falls werden in diesem Abschnitt nur noch die wesentlichen Lösungsschritte zusammengestellt.

Die Vorgehensweise basiert wiederum auf dem Optimalitätsprinzip.

Man erhält

$$V_N = \underline{x}'(N) \cdot Q(N) \cdot \underline{x}(N) \quad (2.55)$$

$$V_k = \min_{\underline{u}(k)} E \left\{ \underline{x}'(k) \cdot Q(k) \cdot \underline{x}(k) + \underline{u}'(k) \cdot R(k) \cdot \underline{u}(k) + V_{k+1} (A(k) \cdot \underline{x}(k) + B(k) \cdot \underline{u}(k) + \underline{r}(k)) \right\} \quad (2.56)$$

Für $k = N-1$ ergibt sich mit Einsetzen der quadratischen Form (2.55) in (2.56)

$$\begin{aligned}
 V_{N-1} = & \underline{x}'(N-1) \cdot Q(N-1) \cdot \underline{x}(N-1) + \min(\underline{u}'(N-1) \cdot R(N-1) \cdot \underline{u}(N-1) \\
 & + \underline{u}'(N-1) \cdot B'(N-1) \cdot Q(N) \cdot B(N-1) \cdot \underline{u}(N-1) \\
 & + \underline{x}'(N-1) \cdot A'(N-1) \cdot Q(N) \cdot A(N-1) \cdot \underline{x}(N-1) \\
 & + 2\underline{x}'(N-1) \cdot A'(N-1) \cdot Q(N) \cdot B(N-1) \cdot \underline{u}(N-1)) \\
 & + E \{ \underline{r}'(N-1) \cdot Q(N) \cdot \underline{r}(N-1) \} \quad (2.57)
 \end{aligned}$$

Unter Berücksichtigung, daß mit $E \{ \underline{r}(N-1) \} = 0$, der Term $E \{ \underline{r}'(N-1) \cdot Q(N) \cdot (A(N-1) \cdot \underline{x}(N-1) + B(N-1) \cdot \underline{u}(N-1)) \}$ entfällt.

Die Bildung der Ableitung nach $\underline{u}(N-1)$ und ihre Gleichsetzung mit Null liefert:

$$(B'(N-1) \cdot Q(N) \cdot B(N-1) + R(N-1)) \cdot \underline{u}(N-1) = -B'(N-1) \cdot Q(N) \cdot A(N-1) \cdot \underline{x}(N-1)$$

Mit $R(N-1)$ positiv definit und $B'(N-1) \cdot Q(N) \cdot B(N-1)$ positiv semidefinit sind, folgt:

$$\underline{u}(N-1) = - (B'(N-1) \cdot Q(N) \cdot B(N-1))^{-1} \cdot B'(N-1) \cdot Q(N) \cdot A(N-1) \cdot \underline{x}(N-1)$$

hieraus ergibt sich für Gleichung (2.57)

$$V(N-1) = \underline{x}'(N-1) \cdot M(N-1) \cdot \underline{x}(N-1) + E \{ \underline{r}'(N-1) \cdot Q(N) \cdot \underline{r}(N-1) \}$$

mit

$$\begin{aligned}
 M(N-1) = & A'(N-1) \cdot [Q(N) - Q(N) \cdot B(N-1) \cdot (B'(N-1) \cdot Q(N) \cdot B(N-1) \\
 & + R(N-1))^{-1} \cdot B'(N-1) \cdot Q(N)] \cdot A(N-1) + Q(N-1)
 \end{aligned}$$

Da $V(N-1)$ eine positive semidefinite quadratische Funktion ist (plus einem unbedeutenden konstanten Term), kann mit Gleichung (2.54) die optimale Regelpolitik für Stufe $N-2$ bestimmt werden. $V(N-2)$ ist dann ebenfalls eine positive semidefinite quadratische Funktion. Durch sequentielles Fortfahren wird die optimale Regelpolitik für alle k bestimmt. Sie hat die Form

$$\mu_k(\underline{x}(k)) = S(k) \cdot \underline{x}(k)$$

wobei die gain Matrix $S(k)$ durch die Gleichung

$$S(k) = -(B'(k) \cdot W(k+1) \cdot B(k) + R(k))^{-1} \cdot B'(k) \cdot W(k+1) \cdot A(k)$$

und die symmetrische positive semidefinite Matrix $W(k)$ rekursiv durch den Algorithmus

$$W(N) = Q(N)$$

$$W(k) = A'(k) \cdot [W(k+1) - W(k+1) \cdot B(k) \cdot (B'(k) \cdot W(k+1) \cdot B(k) + R(k))^{-1} \cdot B'(k) \cdot W(k+1)] \cdot A(k) + Q(k)$$

bestimmt werden.

Der aktuelle Zustand $x(k)$ wird somit durch die lineare feedback gain Matrix $S(k)$ als input wieder in den Prozeß zurückgeführt.

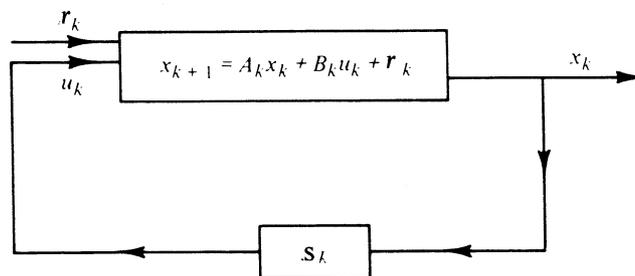


Abb. 2.2

2.6 Zusammenfassende Bemerkung

Vergleicht man die Lösung der beiden sehr einfach formulierten Regulierungsprobleme, so kann man feststellen, daß das stochastische Regelungsmodell (2.53) und (2.54) weitgehend deterministische Züge hat, was nicht zuletzt durch die Linearität des Modells bedingt ist. Bisher wurde nur der Fall betrachtet, daß der Systemzustand vollständig beobachtbar (meßbar) ist. Bei den in der Realität auftretenden Prozessen sind aber die Zustandsvariablen nicht immer für eine Rückkopplung (Rückführung) verfügbar. Dafür gibt es u.a. zwei Gründe. Zum einen können die beobachtbaren output-Größen eines Systems nicht identisch mit seinen Zustandsgrößen oder von geringerer Anzahl sein. Zum anderen wird die Beobachtung von Prozessvariablen durch Meßungenauigkeiten beeinträchtigt. Die momentanen Werte der dadurch nur indirekt beobacht-

baren (meßbaren) Zustandsvariablen können aber durch geeignete Methoden geschätzt oder "herausgefiltert" werden (z.B. Kalman-Filter).

Die Einführung solcher geschätzter Werte für die Zustandsvariablen anstelle ihrer "wahren" Werte, kann ebenfalls durch Formulierung eines linearen Regulierungsproblems behandelt werden /s.5,19/

Die Tatsache, daß die optimale Steuerung eines Regelungsmodells mit quadratischer Zielfunktion immer eine lineare Funktion des Zustandes des Prozesses ist, begünstigt den Gebrauch der linearen feedback-Regelpolitik unter Ausnutzung der dynamischen Programmierung.

3. Der Abflußprozeß als Regelungsaufgabe

3.1 Allgemeines

In vielen Städten werden die Innenstadtbereiche durch Mischwasserkanalisationen entwässert. Die Kläranlagen können meist etwa das doppelte bis vierfache des maßgegebenen Trockenwetterabflusses aufnehmen. Bei Niederschlagsereignissen, die einen höheren Abfluß verursachen, muß das überschüssige Wasser entweder direkt in die Vorfluter abgeschlagen werden oder es wird, falls Rückhaltebecken vorhanden sind, bis zu deren Vollenfüllung von ihnen aufgenommen.

Aufgrund neuer Anschlüsse von Randgebieten an das Mischwasserkanalnetz, was eine Erhöhung des Trockenwetterabflusses zur Folge hat, kommt es vor, daß die Hauptsammler zunehmend überlastet sind. Außerdem kann es durch eine ungleichmäßige Überregnung des Kanalnetzeinzugsgebietes passieren, daß diese ungleichmäßig gefüllt sind, so daß im Extremfall an einigen Stellen das Wasser aus den Kanalschächten austritt, während anderswo im System kein Regenabfluß stattfindet.

In derartigen Situationen ist es wünschenswert, den Abflußvorgang dahingehend zu beeinflussen, daß Überschwemmungsschäden und Überlaufwassermengen, die durch ihren Schmutzwasseranteil eine zusätzliche Gewässerverunreinigung nach sich ziehen würden, möglichst gering gehalten werden können.

Eine zustandsabhängige Beeinflussung des Abflußvorgangs während des Abflußereignisses ist durch eine zeitlich gesteuerte Ausnutzung der gesamten baulichen und technischen Netzkapazitäten denkbar. Somit kann der niederschlagsbestimmte Abflußprozeß in Mischkanalisation als ein Regelungsproblem aufgefaßt werden.

3.2 Das Abflußsteuerungssystem

Ein Entwässerungsnetz kann nur dann optimal, auch unter Berücksichtigung von Wirtschaftlichkeitsgesichtspunkten, seine Funktionen erfüllen, wenn es in allen Belastungsfällen möglichst gut genutzt werden kann. Eine belastungsspezifische ("on-line") Nutzung der Netzkapazitäten ist nur möglich, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

- Informationen über die an signifikanten Schnittstellen des Kanalsystems momentan herrschenden Betriebszustände und die im Einzugsgebiet der Meßstellen abflußverursachenden Niederschläge, sowie
 - Kriterien, die den Prozeß der Kapazitätsanpassung steuern und
 - Steuer- und Regelorgane, mit denen die Kapazitätsanpassungen durchgeführt werden können,
- müssen vorhanden sein.

Abb. 3.1a zeigt den prinzipiellen Aufbau eines solchen Abflußsteuerungssystems. Es setzt sich im wesentlichen aus folgenden Elementen zusammen:

- bauliche Einrichtungen, wie Kanalhaltungen bzw. -strecken, Regenrückhalte-, Regenüberlaufbecken und Überläufe.
Zusammengefaßt sind dies alle Transport-Verteiler- und Speicherelemente einer bestehenden Mischwasserkanalisation
- Meßeinrichtungen, wie Niederschlags-, Wasserstands-, Fließgeschwindigkeitsmeßgeräte
- Steuerungseinrichtungen, wie Pumpen, Schieber, Schütze und Wehre
- Datenfernübertragungsleitungen und den dazugehörenden Einrichtungen
- eine Überwachungs- und Schaltzentrale.

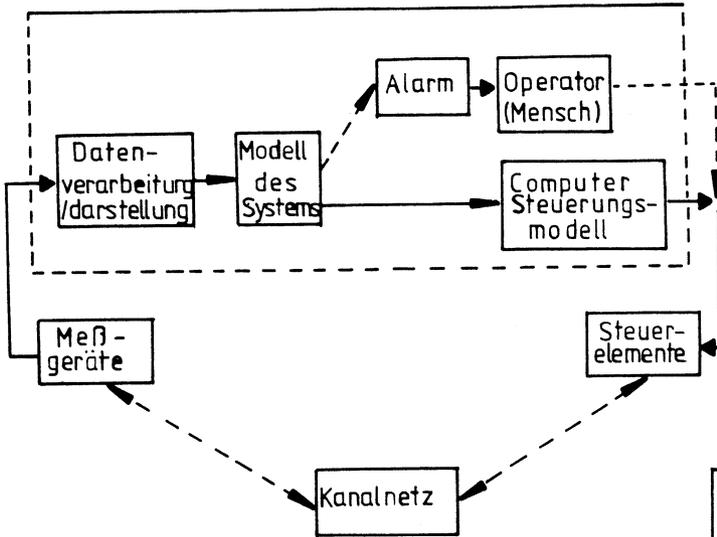


Abb. 3.1a
Wasserwirtschaftliches Steuerungsmodell

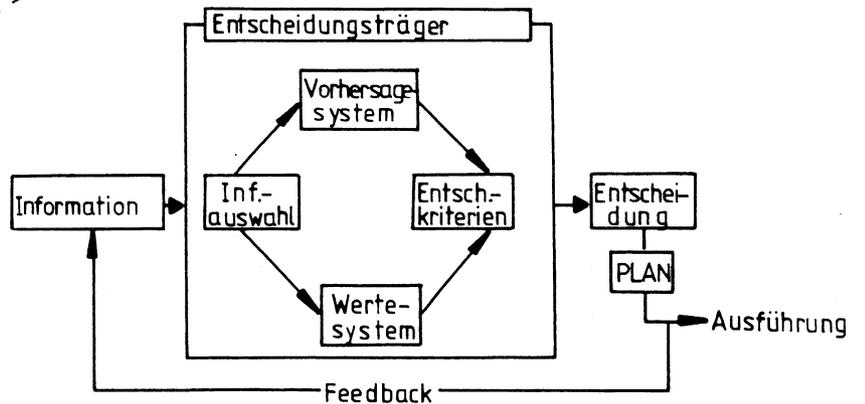


Abb. 3.1b
Allgemeines Steuerungsmodell

Durch das Zusammenwirken dieser Komponenten wird die Grundlage für eine Steuerungsentscheidung ermöglicht und ausgeführt. Durch einen Vergleich mit Abb. 3.1b lassen sich die Ähnlichkeiten mit einem allgemeinen Regelungssystem erkennen.

3.3 Die Abflußsteuerung im Sinne der Regelungstheorie

Sei $\underline{q}(t)$ definiert als Zustandsvektor aus Abflüssen in allen maßgebenden Kanalnetz Schnittstellen (Meßstellen) zur Zeit t .

Die Abflußberechnung erfolge nach folgendem Modell:

$$\underline{q}(t+1) = f(\underline{q}(t) + g(\underline{u}(t)) + \underline{r}(t) \tag{3.1}$$

wobei f den Wellenablauf im System und g die als zeitinvariant angenommene Wirkung der Steuerbefehle sowie die Abflußbildung und Konzentration infolge des Niederschlags (alles in $\underline{u}(t)$ zusammengefaßt) beschreiben.

Unsicherheiten aufgrund der nicht exakten Abflußbeschreibung und Niederschlagsinformation werden durch Modellfehler $\underline{r}(t)$ berücksichtigt.

Die Aufgabe besteht nun darin, über einen bestimmten Zeithorizont t_N , $N \in \mathbb{N}$, die Abflußzustände so zu regeln, daß sie möglichst gering von einem gewünschten Zustand $\underline{q}^*(t)$ abweichen und dies darüber hinaus mit möglichst einfachen Maßnahmen zu erreichen ist.

Mathematisch kann dies durch Minimierung einer quadratischen Zielfunktion beschrieben werden:

$$\min J_N = \sum_{t=1}^{t_N} (A_t (\underline{q}(t) - \underline{q}^*(t))^2 + B_t \cdot \underline{u}(t)^2) \quad (3.2)$$

in der infolge der Quadrierung große Abweichungen von den gewünschten Werten ein stärkeres Gewicht erhalten als kleinere.

Die Koeffizientenmatrizen A_t und B_t sind die jeweiligen "Kosten" für die Abweichungen von den gewünschten Zuständen bzw. für den Betrieb der Steuereinrichtungen.

Da die Abflußzustände nicht exakt vorausberechenbar sind, lautet eine realistischere Formulierung der Zielfunktion

$$\min J_N = E \sum_{t=1}^{t_N} (A_t \cdot (\underline{q}(t) - \underline{q}^*(t))^2 + B_t \cdot \underline{u}(t)^2) \quad (3.3)$$

Der Erwartungswert drückt aus, daß im Mittel ein optimaler Abflußzustand erreicht werden soll. Aus den Gleichungen (3.1) bis (3.3) ist ersichtlich, daß die Aufgabe der Abflußsteuerung in Mischkanalisationen ein diskretes stochastisches Regulierungsproblem darstellt. Eine Lösung soll mit Hilfe des in Abschnitt 2.5 beschriebenen Algorithmus angegeben werden.

Die Annahme eines diskreten Prozesses begründet sich damit, daß obwohl der Abflußvorgang kontinuierlich abläuft, aus technischen und ökonomischen Gesichtspunkten heraus Messungen, Vergleiche

und Regelungen der für ein Kanalsystem relevanten Größen nur zu bestimmten Zeitpunkten t vorgenommen werden.

3.4 Steuerungsstrategie

Steuerungsentscheidungen werden aufgrund von Wasserstandsmessungen im Kanalnetz und unter Beachtung der Niederschlagsbelastung des Einzugsgebietes sowie unter Berücksichtigung einer Zielfunktion getroffen (s. Abschnitt 3.2). Darüber, wie die wasserwirtschaftliche Zielsetzung mit Hilfe der Abflußsteuerung erreicht werden kann, gibt es unterschiedliche Vorstellungen. Die Abb. 3.2 und 3.3 zeigen zwei mögliche Strategien - eine reaktive und eine adaptive oder prognostische - zum Betrieb von Steuerungssystemen. Die reaktiven Strategien bauen allein auf dem gemessenen Systemzustand auf, während adaptive Strategien versuchen, mögliche zukünftige Systemzustände zu berücksichtigen. Bei der Entwicklung, aber auch beim späteren Betrieb von Steuerungssystemen, sind beide Strategietypen zu berücksichtigen, wobei von der reaktiven zur adaptiven Strategie mehrere Entwicklungsstufen durchlaufen werden müssen. In dieser Arbeit wird durch die Anwendung des Lösungsalgorithmus der Regulierungsprobleme ein Ansatz für eine reaktive Strategie untersucht.

3.5 Überprüfung der Steuerungsstrategie

Jeder zeitabhängige Eingriff in den Abflußvorgang ist eine Steuerung, z.B. Pumpen an/aus, Rückhaltebecken füllen/leeren u.ä. Zum Testen von Steuerungsstrategien ist es sinnvoll, diese zunächst zur Steuerung von in einem Rechner simulierten Abflußsituationen einzusetzen, um Erfahrungen in Bezug auf Fehler, Ungenauigkeiten im Entwurf und Ausführungsrisiko zu sammeln. Voraussetzungen für die Simulationsrechnungen sind Niederschlags- Abfluß-Modelle, die möglichst genau den Abflußvorgang wiedergeben, dabei aber einfach aufgebaut sind und kurze Rechenzeiten benötigen. Wichtig ist ebenfalls eine Beurteilungsmöglichkeit über den Nutzen der

jeweiligen Steuerung. Die hierfür zu definierenden Kriterien können dann weitere Erkenntnisse über die Anwendbarkeit berechneter Steuerentscheidungen, anhand der Simulationsrechnungen mit und ohne Steuereingriffe, liefern.

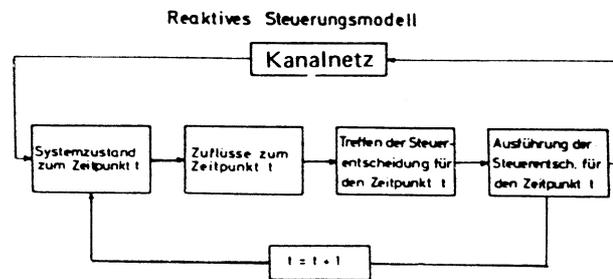


Abb. 3.2 Diagramm für ein reaktives Steuerungsmodell

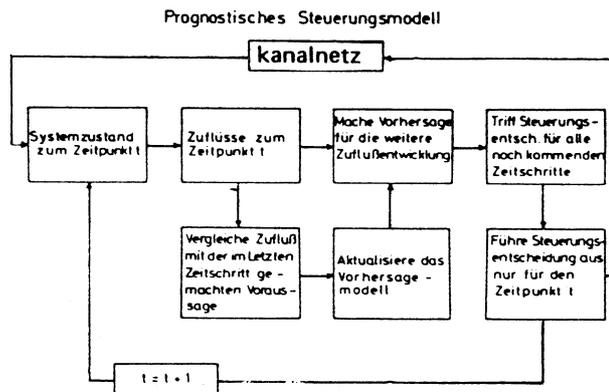


Abb. 3.3 Diagramm für ein prognostisches Steuerungsmodell

4. Beschreibung der verwendeten Simulationsmodelle

4.1 Allgemeines

Zur Berechnung des Niederschlags-Abfluß-Prozesses wurden in dieser Arbeit zwei Modelle aus noch zu erläuternden Gründen verwendet.

Die Modelle trennen zwischen der Berechnung des Oberflächenabflusses und der Berechnung des Systemabflusses im Kanalnetz. Die Umwandlung von Niederschlag in Abfluß umfaßt den Prozeß der Abflußbildung und den Prozeß der Abflußkonzentration, wobei der erste den Anteil des Niederschlags beschreibt, der tatsächlich zum Abfluß kommt, während der zweite den zeitlichen Verlauf dieses Abflusses darstellt. Oberflächenabflußmodelle beschreiben diese Prozesse und berechnen Oberflächenabflußganglinien über bestimmte Abschnitte des Kanalsystems an definierten Zuläufen in das System. Als kleinster Berechnungsabschnitt wird die Haltung - die Strecke zwischen zwei Schächten - angenommen. Die Berechnungsergebnisse der Oberflächenabflußmodelle sind somit, wie für sie selbst der Niederschlag, die Eingabewerte für die Systemabflußberechnung. Der untere Schacht bildet hierbei die Schnittstelle für die Übergabe der Daten.

Die Auslastung des jeweiligen Kanalsystems wird durch die Größe der sich im Netz überlagernden Einzelzuflüsse bestimmt. Mit Hilfe von Transportmodellen wird der Prozeß der Überlagerung der Oberflächenabflüsse zum Gesamtabfluß und die Änderung der zeitlichen Verteilung längs der Fließwege berechnet.

Die Berechnung der Oberflächen- und Abflußwellen können entweder hydrologisch oder hydrodynamisch durchgeführt werden, wobei die Berechnungsart die Bezeichnung für das Modell bestimmt.

Die hydrologischen Verfahren verwenden zur Berechnung Übertragungsfunktionen, deren Parameter empirisch ermittelt werden und von denen nur gefordert wird, daß mit ihrer Hilfe die in der Natur gemessenen und beobachteten Vorgänge genügend genau reproduziert werden. Grundlage der hydrodynamischen Modelle bilden die St. Venantschen Differentialgleichungen und die Berechnungen erfolgen mit Hilfe der Kontinuitäts- und Bewegungsgleichungen. Dieses Differentialgleichungssystem ist nur in den einfachsten Fällen analytisch

lösbar. In der Praxis werden explizite oder implizite Differenzenverfahren zur Lösung des Gleichungssystems angewendet, bei denen die Differentialquotienten durch Differenzenquotienten approximiert werden.

4.2 Verwendete Simulationsmodelle

Um das theoretisch entwickelte Regelungsmodell auf die Abflußberechnung des Kanalnetzes "Linkes Weserufer", Bremen anwenden zu können, wird zunächst die Niederschlags- Abflußreaktion des gesamten Kanalnetzes mit Hilfe eines Simulationsmodells als einer Kombination der Modelle HYSTEM und EXTRAN untersucht und geeicht. HYSTEM ist ein hydrologisches Modell, bestehend aus den Teilmodellen Oberflächenabfluß und Transport, wobei in dieser Arbeit nur das Oberflächenabflußteilmodell angewendet wird. Die Abflußberechnung im Kanal wird mit dem hydrodynamischen Transportmodell EXTRAN vorgenommen. Die hier auftretenden komplizierteren mathematischen Zusammenhänge und die große Anzahl benötigter Daten haben einen großen Rechenzeit- und Speicherplatzbedarf zur Folge, so daß es für die weitere Vorgehensweise notwendig erschien das hydrodynamische durch ein hydrologisches Transportmodell zu ersetzen. Dieses Modell basiert auf dem Kalinin-Miljukov-Verfahren und wird im folgenden als KMROUT bezeichnet. Somit ergibt sich ein zweites Abflußsimulationsmodell als eine Kombination der Modelle HYSTEM und KMROUT. Die beiden Teilmodelle HYSTEM und EXTRAN sind ausführlich in der Literatur /12/ beschrieben. Es werden hier nur kurz die wichtigsten Ansätze wiedergegeben. Das Teilmodell KMROUT wurde unter Zuhilfenahme des Aufsatzes von G. EULER /11/ für diese Arbeit modifiziert und wird deshalb ausführlicher beschrieben.

4.2.1 Oberflächenabflußmodell

HYSTEM (Hydrologisches Stadt- Entwässerungs- Modell) gehört zu den hydrologischen Modellen und berechnet den Oberflächenabfluß getrennt für versiegelte und unversiegelte Flächen. Die Charakteristik städtischer Einzugsgebiete wird wie folgt erfaßt: Als kleinste Entwässerungsflächeneinheit wird die Haltung, die jeweils durch einen oberen und unterliegenden Schacht begrenzt ist, benutzt. Die tatsächlichen Haltungsflächen werden zu rechteckigen Flächen mit der Länge (L) des durch die Haltung führenden Kanalstranges idealisiert. Die Breite der Einzugsgebietsfläche (A) berechnet sich durch

$$B = A/L$$

Die Lage des Kanalstranges innerhalb der Haltungsfläche findet durch das Merkmal 'einseitig' oder 'zweiseitig' Berücksichtigung, wobei eine Haltung als einseitig gilt, wenn $b_2/b_1 < 0,3$ ist. Ansonsten ist sie zweiseitig (Abb. 4.1).

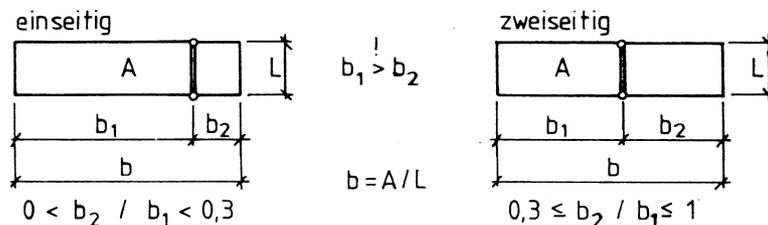


Abb. 4.1 Typisierung der Haltungsflächen

Die Länge des Fließweges den das Wasser bis zum Eintritt in den Kanalschacht zurücklegt, hängt von der Form des Haltungsgebietes und der Lage des Schwerpunktes der versiegelten Fläche ab. Hierbei werden die drei Positionen nah, mittel und fern zum Kanal unterschieden. Die Länge des Fließweges berechnet sich aus der Formel:

$$l_f = \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + \left(c \cdot \frac{b}{16}\right)^2}$$

wobei der Fließlängenkoeffizient c, der unter Berücksichtigung der Schwerpunktlage der versiegelten Fläche und des Haltungsflächentyps ermittelt wird, der Abb. 4.2 entnommen wird.

c	einseitig	zweiseitig			
					
	4 12	2 6	3 5	4 4	2 5
	8 8	3 5	4 4	5 2	4 4
	12 4	4 4	5 2	6 2	6 3
	8 8	2 5	4 4	6 3	4 4

 Kanal
 Haltungsfläche

Koeffizient für versiegelte Fläche c_v
 Koeffizient für unversiegelte Fläche c_u

Abb. 4.2 Koeffizient c zur Ermittlung der Fließlänge

Bei der Abflußbildung wird für die versiegelten und unversiegelten Flächen ein unterschiedlicher Ansatz verwendet. Für die versiegelten Flächen werden die Parameter Benetzungs- und Muldenverluste, sowie der Abflußbeiwert, berücksichtigt. Der Benetzungsverlust wird vorab abgezogen, während sich die Muldenauffüllung während des Ereignisses verlangsamt, um sich asymptotisch der vollständigen Auffüllung zu nähern. Für den Abflußbeiwert sind für ein Ereignis Schranken vorgegeben, die durch den abflußwirksamen Flächenanteil zu Ereignisbeginn und -ende festgelegt werden.

Zur Bestimmung der Verluste für unversiegelte Flächen wird das Infiltrationsmodell von Neumann /12/ angewandt. Hierbei werden die Parameter Infiltrationskapazität, aktuelle Speicherfüllung des Bodens, Speicherkapazität des Bodens und weitere bodenspezifische Kennwerte berücksichtigt.

Die Ermittlung der Abflußkonzentration erfolgt ebenfalls getrennt für versiegelte und unversiegelte Flächen mit Hilfe der Standard-einheitsganglinie. Sie beschreibt als eine lineare, zeitinvariante und gebietscharakteristische Übertragungsfunktion den funktionalen Zusammenhang zwischen abflußwirksamem Niederschlag und direktem Abfluß.

Im Programm HYSTEM wurden für die oben erwähnten Parameter die

standardmäßig vorgegebenen Werte beibehalten /12/.

4.2.2 Transportmodelle

Das Transportmodell muß gewährleisten, daß die Abflußbedingungen des betrachteten Kanalsystems mit genügender Genauigkeit nachgebildet werden. Hydrologische Transportmodelle benutzen Übertragungsfunktionen, die die hydraulischen Einflußgrößen - wenn überhaupt - nur global berücksichtigen, um Niederschlag oder andere Einspeisungen ins Kanalnetz in Abflüsse umzurechnen. Die Gefahr bei der Anwendung besteht darin, daß die Eingabedaten z.B. aus Starkregenereignissen Abflußbedingungen im Kanalnetz schaffen, die nicht durch das einfache Transportmodell erfaßt werden können und dadurch zu falschen Ergebnissen führen. Komplexere Abflußbedingungen wie z.B. Rückstau, Einstau oder Sonderbauwerke können nur durch hydrodynamische Transportmodelle nachgebildet werden, da sie prinzipiell fähig sind, diese zu modellieren.

4.2.2.1 Das hydrodynamische Transportmodell EXTRAN

EXTRAN ist ein Teilblock des in der USA weitverbreiteten Rechenmodells SWMM (Stormwater Management Modell). Es können sowohl offene Gerinne als auch Rohrsysteme und Sonderbauwerke berechnet werden. Gegenüber der Originalversion sind für die hiesige Anwendung einige wesentliche Änderungen vorgenommen worden /12/, u.a.:

- Verwendung von metrischen Einheiten
- Rauigkeitsansatz von Prandtl-Colebrook
- Festsetzung der maximal berechenbaren Haltungen auf 520
- Einbau eines Eingabeblocks für die Kanalnetzdatenbank

4.2.2.1.1 Lösungsverfahren

Bei hydrodynamischen Modellen wird der Berechnungsteil mit Hilfe des St. Venantschen Differentialgleichungssystems (Kontinuitäts- und Bewegungsgleichung) vorgenommen. Das Modell EXTRAN geht von der

Euler-Form der Bewegungsgleichung aus:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} + g \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} - g \cdot A \cdot I_s + g \cdot A \cdot I_R = 0$$

mit Q - Durchfluß

u - Geschwindigkeit

A - durchflossene Querschnittsfläche

h - Wassertiefe

$I_s = \frac{\partial z}{\partial x}$ - Sohlgefälle

I_R - Reibungsgefälle

Dieser Ansatz beschreibt einen instationären ungleichförmigen Fließvorgang.

Die verwendete Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\sum Q_t}{A_{s_t}}$$

ermittelt die Volumenbilanz an jedem Knoten, da nach dem Prinzip der Erhaltung der Masse, die Summe aus Änderung der Durchflußmenge und Änderung des Volumens gleich Null sein muß.

Die Ersetzung der Differentialquotienten durch Differenzenquotienten und die Diskretisierung der unabhängigen Variablen x und t in endliche Werte Δx und Δt führen die partiellen Differentialgleichungen in algebraische Gleichungen über. Zur Lösung der beiden Gleichungen wird in EXTRAN das modifizierte Euler-Verfahren angewendet, wobei die Bewegungsgleichung zur Bestimmung des Durchflusses in jedem Rohr und die Kontinuitätsgleichung zur Ermittlung des Wasserstandes herangezogen wird /12/. Das Verfahren gehört zu den expliziten Methoden. Es werden zuerst die Werte zum Zeitpunkt $t + \Delta t/2$ und hieraus die Werte zum Zeitpunkt $t + \Delta t$ berechnet. Die praktische Erfahrung mit EXTRAN hat ergeben, daß das Modell numerisch stabil bleibt, wenn folgende Bedingungen beachtet werden:

Für Rohre:

$$\Delta t \leq \frac{L}{\sqrt{g \cdot D}}$$

L - Länge des Rohres (m)

D - Rohrdurchmesser (m)

g - Erdbeschleunigung (m/s²)

Für Schächte:

$$\Delta t \leq 0,1 \cdot \frac{A \cdot \Delta H_{\max}}{\sum Q}$$

A - Wasseroberfläche des Schachtes (m²)

ΔH_{\max} - maximale Wasserspiegeländerung
während eines Zeitabschnittes
(m)

Q - Zufluß zum Schacht (m^3/s)

4.2.2.1.2 Spezielle Lösungsansätze

Da in einem Kanalnetz eine Reihe von Systemzuständen auftreten können, auf die sich das allgemeine Lösungsverfahren nicht immer direkt anwenden läßt, müssen zusätzliche Gleichungen betrachtet werden, die die auftretenden Randbedingungen z.B. für Sonderbauwerke oder Auslässe erfassen.

Sind z.B. zu kurze Rohre (Länge ca. zwischen 5 m und 20 m) in einem Entwässerungsnetz vorhanden, so werden sehr kleine Berechnungsschritte $\Delta t (< 10 \text{ sec})$ notwendig, um einer numerischen Instabilität entgegen zu wirken. Dies hat eine sehr große Rechenzeitanforderung zur Folge. Deshalb sind diese Rohre im Modell durch längere zu ersetzen. Aus der Ungleichung für Rohre (s. 4.2.2.1.1) wird in Abhängigkeit vom Durchmesser und Zeitschritt Δt die Mindestlänge des Ersatzrohres bestimmt. Nach der Wahl der Abmessungen des Rohres ist der Rauigkeitsbeiwert, der für das neue Rohr die gleichen Abflußverluste wie für das alte ergibt, zu berechnen. Handelt es sich um Auslässe, wird diese Umwandlung direkt in EXTRAN durchgeführt. In allen anderen Fällen ist dies jedoch vom Anwender vorzunehmen, wobei die Umrechnung eine Näherung darstellt, da zur Ermittlung des Rauigkeitsbeiwertes nicht die vollständige Formel von Prandtl-Colebrook gelöst wird /12, 24/.

Weitere hydraulische Situationen, die eine Wasserspiegelberechnung nach den erwähnten Gleichungen ebenfalls nicht mehr ermöglichen, sind das Auftreten von Einstau oder Überstau.

Einstau tritt auf, wenn alle Rohre an einem Schacht gefüllt sind oder der Wasserspiegel zwischen dem höchsten Rohrscheitel und der Erdoberfläche liegt. Überstau ist ein Spezialfall des Rückstaus, der eintritt, wenn der Wasserspiegel bei einem Schacht über der Erdoberfläche liegt und Wasser aus dem Kanalnetz an die Oberfläche gelangt /12/. EXTRAN besitzt die Möglichkeit das ausgetretene

Wasservolumen für die weitere Berechnung als verloren anzunehmen oder es, wenn es der Kanalnetzstatus ermöglicht, wieder als ins Netz zurückfließend anzusehen. Letzteres bedeutet, daß das zurücklaufende Wasser wieder in die weitere Berechnung mit eingeht (abgedichtete EXTRAN-Version).

Diese speziellen Netzstatus werden mathematisch erfaßt, indem in einer Iterationsrechnung die Wasserstände und Durchflüsse solange korrigiert werden, bis:

- die Differenz zwischen Zufluß und Abfluß von allen einstauenden Schächten kleiner als ein Schwellwert ist. Der Schwellwert wird als Anteil des Durchflusses angesehen (Standardwert: 5 %)
- die Anzahl der Iterationen, die vom Benutzer gewählt werden kann, erreicht ist (Standardwert: 30)

Neben den herkömmlichen Rohr-Schacht-Elementen eines Kanalnetzes können mit EXTRAN auch Sonderbauwerke, wie z.B. Pumpen, Wehre, Rückhaltebecken simuliert werden. Da in den Abflußberechnungen für das Kanalnetz "Linkes Weserufer", Bremen als Sonderbauwerke ein Pumpenwerk berücksichtigt wird, soll nur dieser Spezialfall kurz erläutert werden.

Es werden ON-LINE- und OFF-LINE-Pumpen unterschieden, wobei der Term $\frac{\partial Q}{\partial H}$ in der normalen Abflußgleichung zu Null gesetzt wird. Diese Annahme ist für OFF-LINE-Pumpen richtig, da hier die Pumpenleistung nicht vom Wasserstand im Rohr, sondern vom Wasserstand im Pumpensumpf abhängt. Bei ON-LINE-Pumpen kann dies zu instabilen Lösungen führen, da ihre Leistungen eine Funktion der Wasserspiegelhöhe im Rohr sind. Einstauzustände würden große Pumpenleistungsänderungen nach sich ziehen. Es sollte deshalb vom Benutzer darauf geachtet werden, daß die maximale Pumpenleistung bereits vor Einstau des Schachtes angenommen wird.

4.2.2.2 Das hydrologische Transportmodell KMROUT

KMROUT ist ein für diese Arbeit entwickeltes einfaches Abflußsimulationsmodell. Ausgehend von dem Kalinin-Miljukov-Verfahren zur näherungsweise Berechnung des Wellenablaufs in offenen Gerinnen /10,11, 25/ und seiner Modifizierung für teilgefüllte Kreisrohre /11/ sind einige weitere Abänderungen für das zu untersuchende Kanalnetz "Linkes Weserufer", Bremen vorgenommen worden.

4.2.2.2.1 Darstellung des Kalinin-Miljukov-Verfahrens

Um die Zweideutigkeit der instationären Hochwasserwellenabflußkurve zu umgehen s./10/ geht das in der UdSSR entwickelte Kalinin-Miljukov-Verfahren davon aus, daß unter bestimmten Annahmen eine eindeutige Beziehung zwischen dem Abfluß und dem gespeicherten Volumen in einer Flußstrecke der Länge L - dem sogenannten charakteristischen Abschnitt - auch für instationäre Fließvorgänge angenommen werden kann. Ein Flußlauf wird hiernach als eine Kette von vielen hintereinander liegenden Speichern betrachtet /10, 25/.

Ausgangspunkt ist die Kontinuitäts- (oder Retentions-) Gleichung für einen Fließabschnitt

$$Q_z(t) - Q_A(t) = \frac{dV(t)}{dt} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4.1)$$

mit: Q_z - Zufluß (m^3/s)

Q_A - Abfluß (m^3/s), der am Ende des betrachteten Flußabschnittes von der Länge L ausfließt

V - Volumen (m^3) im betrachteten Flußabschnitt

Für die Volumen-Abfluß-Beziehung wird zusätzlich die Gleichung

$$dV(t) = K \cdot dQ_A(t) \quad (\text{m}^3) \quad (4.2)$$

betrachtet, wobei K (sec) als die Zeit angesehen werden kann, die das Volumen V eines betrachteten Abschnittes bei stationärer Strömung benötigt, um durch diesen Abschnitt zu fließen.

Die Parameter L und K werden beim K.-M.-Verfahren u.a. aus der Geometrie des Gerinnes bestimmt. Für die Länge L eines charakteristischen Abschnittes wird angenommen, daß erstens der Wasserspiegel sowohl bei einem stationären als auch bei einem instationären

Fließvorgang linear verläuft und zweitens ist das gespeicherte Volumen im charakteristischen Abschnitt bei instationärem und stationärem Abfluß gleich

1. Annahme

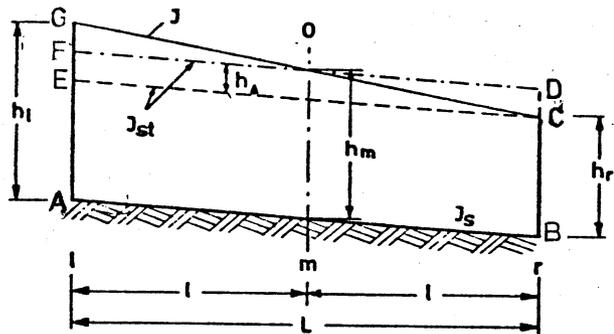
linearer Wasserspiegel bei

- _____ steigendem Durchfluß
- _____ stationärem Durchfluß

2. Annahme

Volumengleichheit

$$V(ABCG) = V(ABDF)$$



Für die Berechnungslänge gilt die Formel

$$L = \frac{Q_{ST}}{J_{ST}} \cdot \frac{dh_{ST}}{dQ_{ST}} \quad (m) \quad (4.3)$$

mit Q_{ST} - stationärer Abfluß (m^3/s) des Abschnittes

h_{ST} - stationäre Wassertiefe (m)

J_{ST} - Wasserspiegelgefälle längs L

Für den Laufzeitparameter (Retentionskonstante) K wird auf die geforderte Volumengleichheit zurückgegriffen. Weiterhin wird für die Querschnittsgeometrie des Abschnitts L die Annahme getroffen

$$dV_{ST} = L \cdot B(h_{ST}) \cdot dh_{ST} \quad (m^3) \quad (4.4)$$

mit $B(h_{ST})$ - mittlere Wasserspiegelbreite (m) längs L bei gegebener Wassertiefe h_{ST}

Aus Gleichung (4.2) ergibt sich durch (4.4) für die **Retentionskonstante**

$$K = L \cdot B(h_{ST}) \cdot \frac{dh_{ST}}{dQ_{ST}} \quad (4.5)$$

Mit Hilfe der Gleichung (4.5) kann das Volumen V aus der Kontinuitätsgleichung (4.1) eliminiert werden. Die Lösung dieser Differentialgleichung erfolgt unter den Bedingungen, daß der Zufluß $Q_z(t)$ in diskreten Zeitabständen Δt durch Ordinatenwerte $Q_{z,t}$ vorliegt und sich der Zufluß während Δt nur linear ändert.

Man erhält auf diese Weise die **Arbeitsgleichung** des Kalinin-Miljukov-Verfahrens in der Form

$$Q_{a,t+1} = Q_{a,t} + C_1 \cdot (Q_{z,t} - Q_{a,t}) + C_2 \cdot (Q_{z,t+1} - Q_{z,t}) \quad (4.6)$$

mit $C_1 = 1 - e^{-\Delta t/K}$
 $C_2 = 1 - \frac{K}{\Delta t} \cdot C_1$

Aus Gleichung (4.6) ist ersichtlich, daß die Änderung des Abflusses im Zeitintervall Δt von der Differenz der Zu- und Abflüsse im vorangegangenen Zeitintervall (t) und von der Änderung des Zuflusses im momentanen Zeitintervall (t+1) abhängt. Außerdem hängt die Lösung nur von zwei empirisch zu bestimmenden Parametern L und K ab.

Einige Werte für die Hilfsgrößen C_1 und C_2 (im folgenden als KM-Konstanten bezeichnet) sind der nachfolgenden Tabelle 4.1 zu entnehmen.

$\frac{\Delta t}{K}$	0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
C_1	0	0.095	0.181	0.259	0.394	0.503	0.632	0.777	0.865	0.918
C_2	0	0.048	0.094	0.136	0.213	0.281	0.368	0.482	0.568	0.633

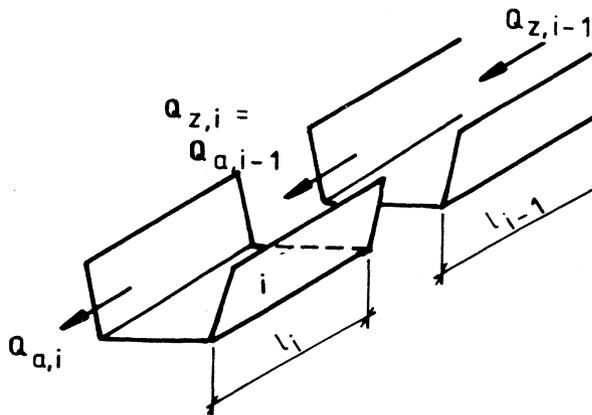
Tab. 4.1

Aus obiger Tabelle ist ersichtlich, daß durch eine Vergrößerung von K die KM-Konstanten bei gleichem Δt kleiner werden. Hierdurch wird sich die Änderung des Zuflusses und die Differenz von Zufluß und Abfluß weniger stark auf die Änderung des Abflusses auswirken.

Der umgekehrte Fall tritt ein, wenn K verkleinert wird, da die "Retentionszeit" geringer ist und sich die Änderung des Zuflusses und die Differenz von Zufluß und Abfluß stärker auswirken.

Um Berechnungsfehler zu vermeiden, wird empfohlen das Zeitintervall Δt möglichst kleiner oder höchstens gleich der Retentionskonstante zu wählen.

Der Grundgedanke des Kalinin-Miljukov-Verfahrens, den betrachteten Flußabschnitt in charakteristische Abschnitte der Länge L zu unterteilen und für jeden dieser Abschnitte dann einen eigenen Speicher anzusetzen, hat somit zur Folge, daß die Zuflußordinaten $Q_{z,t}$ gleich den Abflußordinaten $Q_{a,t}$ des oberhalb angrenzenden Flußabschnittes sind.



4.2.2.2.2 Anwendung des Kalinin-Miljukov-Verfahrens auf teilgefüllte Kreisrohre

Bei der Anwendung des K-M-Verfahren auf ein Kanalsystem wird ein rückstaufreier Abfluß vorausgesetzt. Ausgehend von den Gleichungen (4.3) und (4.5) werden anhand der Teilfüllungskurve und der Querschnittsgeometrie des Kreisrohres die Parameter bestimmt. Euler /11/ gibt die näherungsweise bestimmten mittleren Parameter wie folgt an:

Berechnungslänge:

$$L = 0.4 \cdot \frac{D}{J_s} \quad (\text{m}) \quad (4.7)$$

Retentionskonstante:

$$K = 0.64 \cdot L \cdot \frac{D^2}{J_s} \quad (\text{sec}) \quad (4.8)$$

mit D - Kreisrohrdurchmesser (m)

J_s - Sohlgefälle des Rohres

Q_v - scheinvolle Abflußleistung des Rohres (m^3/s)

Wie aus Gleichung (4.7) ersichtlich ist, ergibt sich aus geringem Sohlgefälle eine große Berechnungslänge, die nach /11/ auf eine maximale Länge von 200 bis 300 m zu begrenzen ist, um Ergebnisungenauigkeiten zu vermeiden. Wird $L > 300$ m ermittelt, so kann mit einer auf die tatsächlich vorhandene Rohrlänge abgestimmten Länge $L^* \leq 300$ m der Parameter K aus Gleichung (4.8) abgeschätzt werden. Hierdurch kann eine noch relativ genaue Abflußberechnung durchgeführt werden.

4.2.2.2.3 Das modifizierte KMBOUT- Modell

Auf der Grundlage der in Abschnitt 4.2.2.2.1 formulierten Arbeitsgleichung (4.6) ist ein Modell für die Abflußberechnung in Kanalsystemen erstellt worden. Zur besseren Handhabung formt man die **Arbeitsgleichung** (4.6) um, zu

$$Q_a(t+1) = (1-c) \cdot Q_a(t) + (c-d) \cdot Q_z(t) + d \cdot Q_z(t+1) \quad (4.9)$$

mit $c = c_1$ und $d = c_2$ aus (4.6)

Der Abfluß aus einer Haltung eines Kanalnetzes wird mit (4.9) vollständig beschrieben, wobei Q_z nicht nur den Abfluß der oberhalb anschließenden Haltung, sondern auch die Oberflächenzuflüsse sowie die industriellen und häuslichen Einleitungen umfaßt.

Für ein Kanalsystem mit n Haltungen ergibt sich somit ein Gleichungssystem für n Zustandsbeschreibungen. Es hat beim Übergang zur Matrixschreibweise die Form

$$\underline{Q}_{t+1} = A \cdot \underline{Q}_t + B \cdot \underline{u}_t + C \cdot \underline{u}_{t+1} \quad (4.10)$$

In (4.10) ist der gesamte Zufluß Q_z in eine Haltung i aufgespalten, in den Zufluß Q_{i-1} , der gleich dem Abfluß aus der oberhalb liegenden Haltung $i-1$ ist und den Zufluß u_i bestehend aus sonstigen externen Einleitungen.

Man definiert die Vektoren

$$\underline{Q}_{t+1} = (Q_1(t+1), Q_2(t+1), \dots, Q_n(t+1))$$

$$\underline{Q}_t = (Q_1(t), Q_2(t), \dots, Q_n(t))$$

als die Abflüsse und die Vektoren

$$\underline{u}_t = (u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t))$$

$$\underline{u}_{t+1} = (u_1(t+1), u_2(t+1), \dots, u_n(t+1))$$

als die Zuflüsse aller Haltungen zum Zeitpunkt t und t+1.

Die (n x n) Koeffizientenmatrizen A, B und C beschreiben die Zuordnungen der K-M-Konstanten für die Haltungen.

In Anhang A werden zum besseren Verständnis des Abflußberechnungsmodells die Modellterme für die in einem Kanalnetz auftretende Aufeinanderfolge von Haltungen und der Zusammenfluß mehrerer Haltungen ausführlich dargestellt.

Zur Berechnung der Parameter L und K sind zunächst die in Abschnitt 4.2.2.2.2 angegebenen Gleichungen (4.7) und (4.8) angesetzt worden. Da die Rohre des betrachteten Kanalnetzes (näheres hierzu in Kapitel 5) überwiegend ein geringeres Sohlgefälle als 1 ‰ haben, ergeben sich für die Berechnungslänge L nach (4.7) Werte weit über 300 m. Dies hat nach Abschnitt 4.2.2.2.2 für jede dieser Haltungen zur Folge, daß mehrere Berechnungen entsprechend dem Verhältnis von tatsächlicher Haltungslänge zur angenommenen Länge ≤ 300 m in jedem Zeitschritt durchgeführt werden müssen, was einer fast 70 % Erhöhung des Rechenumfangs entspricht. Außerdem haben die Gleichungen (4.7) und (4.8) nur für Kreisprofile Gültigkeit.

Um auch auftretende Eiprofile ohne Umwandlung in entsprechende Kreisprofile berechnen zu können, wird im KMR0UT-Verfahren auf die Gleichung (4.5) zurückgegriffen, wobei die Wasserspiegelbreite B für Kreisprofile

$$\text{mit } B = 2 \cdot \sqrt{2h \cdot r - h^2} \quad (\text{m}) \quad /7/$$

und für Eiprofile mit

$$B = \sqrt{9r^2 - (2r - h)^2} - 2r \quad (\text{m}) \quad /22/$$

r - Radius (m)

h - Wasserstand (m)

berechnet wird.

Um das beschriebene KMR0UT-Modell für die Berechnung des Abflusses in Kanalsystemen zu erstellen, ist das EDV-Programm gleichen Namens geschrieben worden. Aufgrund der Kanalnetzdatenbank wird der Wert K für jede Haltung mit vorgegebenem Trockenwetterabfluß und -wasserstand ermittelt. Das Berechnungszeitintervall Δt ist mit 1 Minute fest vorgegeben. Mit Hilfe des Zuordnungsalgorithmus KMMATR (genaues siehe Anhang B) werden die Matrizen A, B und C berechnet. Die externen Zuflüsse u_i für jede Haltung i werden durch Summation der Schmutzabwässer mit der in diskreten Zeitschritten einzugebenen Oberflächenzuflußganglinie für diese Haltung i berücksichtigt.

Sollte für ein Rohr ein Abfluß von mehr als 10 % seiner scheidelvollen Abflußleistung errechnet worden sein, so wird ein Überstau angenommen. Die überschüssige Wassermenge wird für die Übergabe an die nächste Haltung zurückgehalten und geht erst nach Absinken des Abflusses unter die maximale Kapazität in die weitere Berechnung als Zufluß wieder mit ein. Die Annahme, 10 % über der scheidelvollen Abflußleistung sei Überstau, basiert auf dem Umstand, daß nach Rohrvollfüllung das Wasser erst in den Kanalschächten steigt, bevor es aus dem Kanalnetz an die Erdoberfläche gelangt.

Eine ausführliche Programmbeschreibung mit Eingabebeschreibung befindet sich in Anhang B .

5. Fallstudie Kanalnetz "Linkes Weserufer", Bremen

5.1 Allgemeines

Eine optimale Steuerungsstrategie soll durch den Lösungsalgorithmus des Regulierungsproblems für ein Kanalsystem bestimmt werden. Für diese Aufgabe ist das Kanalnetz "Linkes Weserufer", der Stadt Bremen als Fallstudie ausgewählt worden, da hier schon seit einigen Jahren anhand von fest vorgegebenen Grenzwasserständen eine Steuerung durchgeführt wird (s. Anlage 5.1). Hierdurch bedingt, existiert ein zentrales Datenerfassungssystem zur Aufzeichnung und Auswertung von Niederschlags-, Wasserstands- und Abflußdaten, so daß es möglich ist, auf ein umfangreiches Datenmaterial zurückzugreifen.

5.2 Existierendes Kanalnetz

5.2.1 Allgemeine Beschreibung

Das Mischwasserkanalnetz auf dem linken Weserufer der Hansestadt Bremen (s. Bild 1) wurde in seinen Hauptbestandteilen im wesentlichen um die Jahrhundertwende geplant und gebaut. Ende der 60iger Jahre wurde, basierend auf einer elektronischen Nachrechnung des gesamten Kanalnetzes, ein Sanierungsprogramm entwickelt, dessen Kernstück der Bau eines leistungsfähigen Hauptsammlers zwischen dem Pumpwerk Krimpel und dem Hauptpumpwerk -Linkes Weserufer - war. Dieser Hauptsammler gewährleistet über weite Bereiche des Netzes einen rückstaufreien Abfluß. Die Bebauung des Kanalnetzeinzugsgebietes ist heterogen. In unregelmäßiger Folge wechseln reine Wohn-, Misch- und Gewerbegebiete. Bedingt durch die Topographie Bremens ist das Oberflächengefälle annähernd Null. Das Abwasser aus den weitgehend im Trennsystem entwässerten Randgebieten muß zum Teil mehrmals gepumpt werden, bis es in das innerstädtische Kanalnetz gelangt.

Als Kanalvolumen stehen im Mischwassernetz insgesamt 54000 m³ zur Verfügung, wovon in der Spitze des Trockenwetterabflusses ca. 7500 m³ durch den Schmutzwasserabfluß beansprucht werden.

Das Hauptpumpwerk "Linkes Weserufer" stellt den Tiefpunkt des gesamten Kanalnetzes dar. Von hier können über eine Druckrohrleitung maximal $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ Mischwasser zur Zentralkläranlage Bremen-Seehausen gepumpt werden. Außerdem kann das Netz mit drei Abwasserförderschnecken, deren Gesamtleistung bei $Q_{\text{max}} = 9 \text{ m}^3/\text{s}$ liegt, entlastet werden. Die Förderschnecken arbeiten auf zwei Durchlaufbecken mit einem Volumen von 10000 m^3 . Das über die Ablaufschwelle abgeschlagene mechanisch gereinigte Mischwasser gelangt mittels Entlastungspumpen ($Q_{\text{max}} = 2 \text{ m}^3/\text{s}$) über eine Druckrohrleitung in die Weser. Das Pumpwerk Krimpel liegt am Tiefpunkt eines Entwässerungsnetzes im östlichen Stadtrand. Es hat eine maximale Leistung von 700 l/s . Außerdem besteht die Möglichkeit, über 3 Förderschnecken ein Rückhaltebecken mit einer Kapazität von 10000 m^3 zu beschicken /18, 26, 29/.

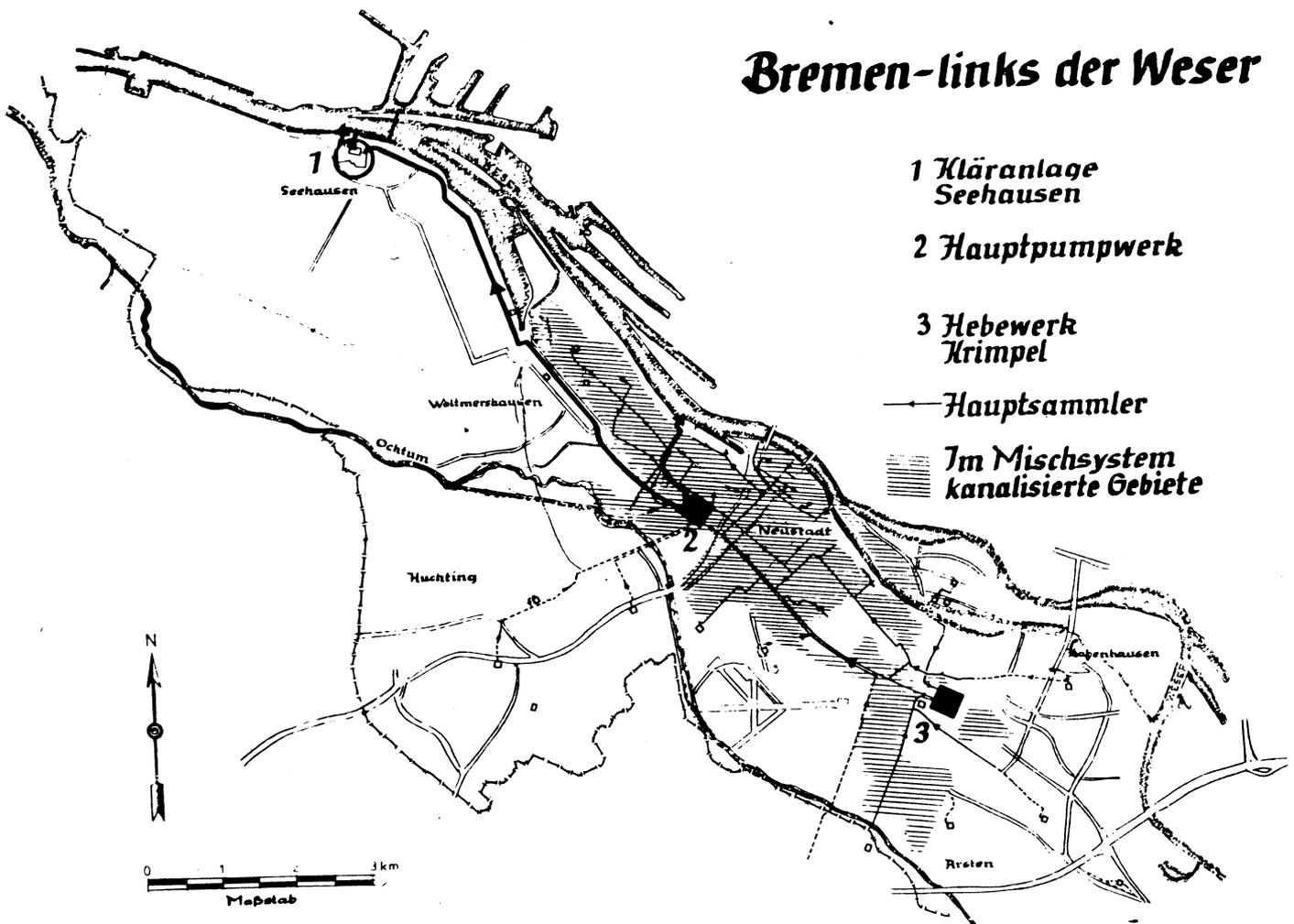


Bild 1: Übersichtslageplan des Projektgebietes

5.2.2 Aufbereitung der Kanalnetzdaten

Für diese Arbeit wurden vom Stadtentwässerungsamt Bremen das gesamte links der Weser liegende Kanalsystem auf Datenträger überspielt und zur Verfügung gestellt.

Ein "Kanalhaltungsdatensatz" dieser Datenbank umfaßt alle für die Bremer Belange notwendigen Einzelangaben und beschreibt einen Kanalabschnitt zwischen zwei Schächten, wobei Anfangs- und Endschacht in Fließrichtung definiert sind. Dem Schlüsselbegriff der Datenbank entspricht die 9-stellige Schachtnummerierung (z.B. 8780.7302).

Das gesamte Kanalnetz ist in 1 qkm große Planquadrate aufgeteilt. Die ersten vier Ziffern der Schachtnummerierung bestimmen den Standort des jeweiligen Planquadrates im Kanalsystem. Jedes dieser Planquadrate besteht wiederum aus acht Rahmenflurkarten (1. Ziffer nach dem Punkt). In jedem dieser 500 x 250 m großen Rechtecke ist jedem auftretenden Schacht eine 3-stellige Verschlüsselung zugeordnet, wobei die erste Ziffer (7-te Stelle) Auskunft über die Art des Kanals gibt (z.B. 3 entspricht Mischwasserkanal, 5 Regenwasserkanal). Zu einem Datensatz gehören u.a. die Angaben über:

- Länge der Haltung (m)
- Kenngröße für Leitungsquerschnitte (z.B. 10 entspricht dem Kreisprofil, 20 dem normalen Eiprofil)
- Profilabmessungen (Breite, Höhe) (m)
- Sohlhöhen für Haltungsanfang und -ende (m)
- Schachtdeckelhöhe für Anfangsschacht (m)
- Art der Entwässerung
(S - Schmutzwasserkanal
R - Regenwasserkanal
M - Mischwasserkanal)

Zur Komprimierung und Verwendung dieser Daten in den Programmpaketen HYSTEM und EXTRAN ist es notwendig und sinnvoll, die Datenbank in neuer Form aufzubauen. Hierzu wurden die Programme VORSORT, RAUS, KANETZ und EXDAT geschrieben.

Das Programm KANETZ sortiert die Haltungen entgegen der Fließrichtung

in eine "Baumstruktur" ausgehend vom letzten Schacht im Kanalnetz (hier: Pumpwerk "Linkes Weserufer"). Gleichzeitig werden nur noch Mischwasserkanalstränge in die neu erstellte Datenbank aufgenommen, und die 9-stellige in eine maximal 5-stellige Schachtnumerierung umgesetzt. Als Profiltyp tritt nur noch das Kreis- und normale Eiprofil auf (Programmlisten und Erläuterungen s. Anhang B).

5.2.3. Zusätzlich zu ermittelnde Daten

Da das Kanalnetz in seiner Gesamtheit für die Berechnung einer on-line-Abflußsteuerung nicht in Betracht kommen kann (es umfaßt ca. 5000 Haltungen), ist das System zunächst in 25 Untersysteme aufgelöst worden, die dann abhängig voneinander behandelt werden. Die Unterteilung ist aufgrund der Lage der Hauptsammler im System vorgenommen worden (vgl. Anlage 5.1 und 5.2).

Zusätzlich zu den gegebenen Kanalnetzdaten ist es für die Simulation des Niederschlags-Abflußprozesses notwendig, Angaben über die zu entwässernden Gebietsflächen und die in der Mischkanalisation anfallenden Schmutzwassermengen zu haben. Die Bestimmung dieser Werte ist anhand von zur Verfügung gestellten Unterlagen des Stadtentwässerungsamtes Bremen durchgeführt worden.

5.2.3.1 Haltungsflächen

Da für die einzelnen Haltungen keine Angaben über die Einzugsgebietsfläche und deren Befestigungsgrad vorliegen, sind diese Werte mit Hilfe von zwölf Kanalbestandsplänen des Stadtentwässerungsamtes Bremen (Maßstab 1 : 2500) und dazugehörigen Luftbildaufnahmen, gebietscharakteristisch ermittelt worden. Die so ermittelten Gesamtflächen und reduzierten Flächen wurden für die entsprechenden Untersysteme aufsummiert und anschließend gleichmäßig auf die angeschlossenen Haltungen verteilt. Als gesamte Einzugsfläche ergaben sich ca. 1000 ha mit einem befestigten Flächenanteil von ca. 470 ha. Anlage 5.3 zeigt den prozentualen Befestigungsgrad der einzelnen Teilsysteme innerhalb des Gesamteinzugsgebietes.

5.2.3.2 Schmutzwasserzuflüsse

Zur Ermittlung des Trockenwetterabflusses in Mischwasserkanalisationen ist es notwendig, den Anteil von Schmutzabwässern aus Industrie und Haushalten als feste Einleitungen in das Kanalsystem zu berücksichtigen. Das Abwasser aus Stadtrandgebieten und mehreren niedersächsischen Umlandgemeinden gelangt durch Pumpen in das innerstädtische Kanalnetz "Linkes Weserufer". Die Angaben über diese externen Zuflüsse sind der Tab. 5.1 zu entnehmen.

Pumpwerk	Förderleistung (l/s) Tages-Mittelwert	Netzanschluß-Punkt
S-PW Werdersee	0,5	8880.5338
S-PW Habenhausen	11,0	8879.2901
S-PW Arsten	11,0	8878.4305
S-PW Grolland	12,0	8482.8312
S-PW Huchting	63,0	8482.8312
R/S-PW Flughafen	4,6	8680.7301
S-PW Ochtum	3,0	8580.3302
S-PW Brink.-Nord	6,0	8777.3313
S-PW HPW-Brinkum	99,0	8779.1309

Tab. 5.1 Externe Zuflüsse

Anhand einer Großverbraucher-Statistik aus dem Jahre 1982 wurden die industriellen Einleitungen berechnet (Großverbraucher heißt eine Einleitung von mehr als 5000 m³/a). Dabei wurde für Schulen, Verwaltungen u.a. die Einwohnergleichwertberechnung /22/ angesetzt. Für sonstige Großverbraucher ermittelte sich der Zufluß ins System auf der Grundlage von 252 Arbeitstagen à 12 Stunden.

Die häuslichen Abwässer ergeben sich aus der Formel /22/:

$$Q_h = q_h \cdot A_E$$

$$\text{wobei } q_h = \frac{\text{Einw./ha} \cdot \text{Wasserverbrauch (l/(E d))}}{16 \cdot h/d \cdot 3600 \text{ s/h}}$$

gilt, mit

Q_h - Schmutzwasserabfluß (l/s)

q_h - Schmutzwasserabflußspende (l/(s•ha))

A_E - angeschlossene Einzugsfläche (ha)

Der Wasserverbrauch pro Einwohner und Tag wird mit 150 l* angesetzt und die Einwohner pro ha wurden aus einer Bevölkerungsstatistik vom Juli 1983 ermittelt.

Auf die Zuflußwerte für Industrie und häusliche Abwässer ist zusätzlich ein 20 %*iger Fremdwasseranteil aufgeschlagen worden.

Der gesamte Schmutzwasserzufluß ins System beträgt nach dieser Auswertung 827 l/s. Die Zusammensetzung des Schmutzwasserzuflusses ist aus Tab. 5.2 ersichtlich.

Einleiter	Einleitung (l/s)
Haushalt	137
Industrie	357
Fremdwasser	123
Externe	210
Gesamtzufluß	827

Tab. 5.2

* Anm. nach Informationen des Stadtentwässerungsamtes Bremen

5.2.4 Niederschlags- Abfluß- Simulation

Bei der Anwendung eines Simulationsmodelles für ein bestimmtes Kanalnetz ist es notwendig, das Modell zunächst auf spezielle nicht meßbare Größen und gebietsspezifische Einflüsse anzueichen. Grundsätzlich wird eine Eichung mit Hilfe der in der Natur gemessenen Niederschlags- Abfluß- Ereignisse vorgenommen. Für diese Arbeit standen sämtliche mit dem zentralen Datenerfassungssystem "Linkes Weserufer" aufgezeichneten Ereignisse des Jahres 1981 zur Verfügung, die in $\Delta t = 2,5$ bis $\Delta t = 10$ Min diskretisiert sind.

Die Aufzeichnungen umfassen Niederschlagsdaten von 3 Regenmeßgeräten, sowie die Wasserstandsdaten von 23 Pegelstellen. Außerdem sind die Laufzeiten von 25 ausgewählten Pumpen sowie die vom Hauptpumpwerk zur Kläranlage geförderten Wassermengen pro Zeitintervall erfaßt.

Von den vorliegenden N-A-Ereignissen wurden die folgenden 3 Ereignisse ausgewählt:

Ereignis vom	Dauer [min]	Niederschlagshöhe [mm]		
		R1	R2	R3
25.03.81	210	12,32	16,60	40,46
19.08.81	230	7,13	7,76	7,27
10.10.81	165	6,10	8,16	2,44

wobei die Ereignisse vom 25.03. und 19.08.81 zu Rückhaltebeckenfüllungen führten.

Bei der Simulation dieser Ereignisse mit den Programmen HYSTEM und EXTRAN sind grundsätzliche Schwierigkeiten aufgetreten, so daß von einer Eichung des Modells nicht gesprochen werden kann. Zum einen konnten die Ereignisse nicht für das gesamte Kanalnetz auf einmal simuliert werden, da die maximal vorgegebene Haltungsanzahl der Programme HYSTEM und EXTRAN auf 520 festgelegt ist. Zum anderen mußte für die Berechnung mit dem Transportmodell ein Rechenschritt von $\Delta t = 5$ sec gewählt werden, da Haltungslängen von unter 10 m relativ

häufig auftreten.

Die Simulation eines Ereignisses für das gesamte Kanalnetz erfordert 12 Programmläufe und benötigt ca. 7500 CPU sec auf der CYBER 76.

Die einzelnen Teilberechnungen sind unter Berücksichtigung der Einzugsgebiete der 3 Regenschreiber und der zuvor getroffenen Einteilung des Kanalnetzes in 25 Teilgebiete vorgenommen worden. Die aus der als Auslaß eines Teilnetzes definierten Haltung berechneten Abflußganglinie ist dem nächstfolgenden Schacht im nächsten Teilnetz als zusätzliche Zuflußganglinie eingegeben worden.

Die Berechnungen erfolgen mit den standardmäßig vorgegebenen Parametern /12/. Eine überschlägige Volumenbilanz zwischen den gemessenen und berechneten Abflüssen ergaben relativ übereinstimmende Ergebnisse. "Relativ" bedeutet hierbei, daß eine exakte Volumenbilanz nicht möglich ist, da sich zeigte, daß der berechnete Schmutzwasserabfluß von 827 l/s als eine mögliche Trockenwetterspitze anzusehen ist.

5.3 Das vergrößerte Kanalnetz

5.3.1 Erstellung des Grobnetzes

5.3.1.1 Erste Version

Für die on-line Steuerung einer Mischwasserkanalisation ist es notwendig, daß optimale Steuerungseingriffe in kurzer Zeit ermittelt werden können. Dieses setzt u.a. voraus, daß die teilweise recht umfangreichen und komplexen Kanalsysteme drastisch vereinfacht werden müssen, wobei das hydraulische Verhalten des Kanalnetzes möglichst unverändert bleiben soll.

Das Mischwasserkanalnetz "Linkes Weserufer", Bremen, umfaßt ca.3200 Haltungen.

Die Aufgabe besteht nun darin, die Haltungsanzahl des Netzes für eine schnellere Niederschlags-Abflußberechnung zu verringern.

Der Ausgangspunkt der Vergrößerung sind die 25 Gebiete, in die das Kanalnetz anhand der Hauptsammler aufgeteilt worden ist (s. Abschnitt 5.2 und Anlage 5.2), wobei jedes dieser Teilnetze durch eine Haltung beschrieben werden soll. Alle Rohre mit einem Durchmesser von weniger als 80 cm werden nicht weiter berücksichtigt.

Die verbleibenden Hauptsammler werden entsprechend ihres Durchmessers und Profils zusammengefaßt. Hierbei haben seitliche Zuführungen von anderen größeren Rohren das Ende einer Haltung bestimmt. Das Kanalnetz konnte auf diese Weise auf ca. 150 Haltungen reduziert werden. Im Hinblick auf die Anwendung des hydrologischen Abflußmodells KMR0UT sind die vorhandenen Eiprofile in entsprechende Kreisprofile umgewandelt worden /20,,22,,24/ . Hierdurch konnten weitere Haltungen zusammengefaßt werden, so daß die Haltungszahl auf ca. 80 gemindert wurde. Für diese Haltungen ergaben sich neue mittlere Gefälle und Längen zwischen 20 und 1250 m. Eine weitere Haltungsreduzierung erscheint nicht sinnvoll, da die Lagen der Meßstellen im existierenden Kanalnetz berücksichtigt bleiben sollen.

5.3.1.1.2 Zweite Version

Die erste Grobnetz-Version ist verworfen worden, da nach Euler /11/ , die Haltungslängen für die Anwendung des K.-M.-Verfahrens möglichst weniger als 300 m betragen sollten. Außerdem liegen die Sohlgefälle größtenteils unter 1⁰/oo, was wiederum zu Berechnungsschwierigkeiten beim K.-M.-Verfahren führen würde. Unter dem Gesichtspunkt, die Haltungslänge möglichst nicht über 300 m zu wählen, wurden die Hauptsammler erneut unter Berücksichtigung ihrer Durchmesser und Profiltypen zusammengefaßt. Nach dieser Vergrößerung besteht das Kanalnetz aus 130 Haltungen, wobei die Lage der Wasserstandsmeßstellen gegenüber dem Feinnetz unverändert geblieben sind.

5.3.2 Niederschlags- Abfluß- Simulation

Mit dem ermittelten Grobnetz wurden die Niederschlagsereignisse vom 25.03. und 19.08.81 mit den Programmen HYSTEM und EXTRAN simuliert und mit den Feinnetzberechnungen verglichen. Gegenüber dem Feinnetz ergaben sich an einigen untersuchten Haltungen zeitlich verschobene Abflußwellen und an den Pegelstellen niedrigere Wasserstände. Durch künstliche Verminderung der Sohlgefälle wurde der Abflußprozeß für das

das Grobnetz verlangsamt, wodurch eine gute Übereinstimmung zum Feinnetz erreicht wurde. Anlage 5.3.a und b zeigen die Wasserstandsganglinien für die Pegel H21, H25 und H26.

5.4 Abflußsimulation mit dem KMRQUT-Verfahren

Neben der Vereinfachung des Kanalnetzes besteht eine zweite Voraussetzung für eine on-line Steuerung darin, ein Abflußmodell zur Verfügung zu haben, das sowohl ausreichend genau als auch ausreichend schnell gemessene oder vorhergesagte Niederschläge in Abflußzustände im Kanalsystem überführen kann.

Aus diesem Grunde wurde das Modell KMRQUT entwickelt; die beiden letzten Punkte (Exaktheit und Rechenzeit) müssen allerdings - z.B. im Vergleich mit dem hydrodynamischen Modell EXTRAN - überprüft werden.

Mit dem hydrodynamischen Modell wurden vorab für das Grobnetz die Wasserstände in jedem Schacht und der Abfluß aus jeder Haltung für den Trockenwetterabfluß bestimmt. Diese Daten bilden die Grundlage zur Berechnung der Retensionskonstanten K nach Gleichung (4.5) für das KMRQUT-Modell. Durch Anwendung der Gleichung (4.5) anstelle der Gleichung (4.8) ist eine Ersetzung der eiförmigen durch entsprechende kreisförmige Rohre nicht mehr notwendig. Außerdem können gemessene Wasserstände aus Rohren mit Eiprofil direkt im Modell berücksichtigt werden, ohne zunächst eine umfangreiche Umrechnung in einem vergleichbaren Wasserstand eines Kreisrohres vornehmen zu müssen. In Anlage 5.4 ist das gesamte Grobnetz mit seinen wichtigsten Daten tabellarisch dargestellt.

Das KMRQUT-Verfahren wurde zunächst mit den für den Trockenwetterabfluß berechneten KM-Konstanten angewendet. Als Zuflußganglinien $u_i(t)$ wurden die durch das Oberflächenmodell HYSTEM berechneten Wellen plus die Schmutzwassermengen für jede Haltung i mit $\Delta t = 1\text{min}$ Intervallbreite eingegeben. Die Ergebnisse des Wellenablaufs zeigen im Vergleich zu denen mit dem hydrodynamischen Modell EXTRAN ermittelten eine deutliche Abweichung im Bezug auf den Spitzenabfluß und den abfallenden Ast der Welle (Anlage 5.5).

Verbesserungen ergaben sich durch eine Modifikation der KM-Konstanten anhand des Wasserstandes und des Abflusses in jedem Zeitschritt. Dabei wurde die Annahme getroffen, daß eine neue Retentionszeit nach Gleichung (4.5) dann zu berechnen ist, wenn sich der Abfluß bzgl. der scheinbaren Abflußmenge um 10 % ändert. In Anlage 5.5 sind für die Haltung 592, für die Niederschlagsereignisse vom 10.10.81 und 19.08.81 die Abflußganglinien der zwei untersuchten Versionen der KMROUT-Simulation dargestellt. Zusätzlich wird mit der Ganglinie des hydrodynamischen Modells EXTRAN verglichen.

Der Vergleich der 3 Abflußwellen zeigt, daß die variable Version des hydrologischen Berechnungsverfahrens KMROUT mit einer verhältnismäßig einfachen Parameterabschätzung das Abflußverhalten durchaus ausreichend genau beschreibt. Daß der Spitzenabfluß höher liegt und teilweise früher eintritt, dürfte sich für die Anwendung in einem Steuerungskonzept positiv auswirken. Noch bessere Ergebnisse sind evtl. durch eine genauere Ermittlung der Q_A -Abhängigkeit der Retentionskonstante zu erwarten.

Bezüglich der Rechenzeit ist das Modell KMROUT EXTRAN deutlich überlegen (KMROUT: ca. 5 CPU sec, Cy 76; EXTRAN: ca. 60 CPU sec, Cray-1). Das Ergebnis dieses Vergleichs zeigt, daß das Modell KMROUT für eine Einbeziehung in ein Steuerungssystem als geeignet erscheint.

6. Anwendung des Steuerungsalgorithmus

6.1. Ziel der Steuerung

Allgemeine Zielsetzung für eine Abflußsteuerung in Kanalnetzen sind u.a.:

- Verminderung der Gewässerbelastung
- Vermeidung von Überschwemmungsschäden
- bessere Nutzung der Netzkapazitäten
- Vergleichmäßigung der Abflußraten zur besseren Abwasserbehandlung
- Verminderung von Betriebskosten

Der Abflußprozeß des Kanalnetzes "Linkes Weserufer", Bremen ist aufgrund der geringen Sammlergefälle und der Anordnung der Regenrückhaltebecken größtenteils durch Pumpwerksbetrieb beeinflussbar. Die Bremer Zielsetzung der Steuerung von Pumpwerken und Rückhaltebecken hat folgenden Inhalt /29/:

- In das unterhalb liegende Netz beziehungsweise zur Kläranlage wird nur soviel Wasser gepumpt, daß dort keine Überlastungen eintreten.
- Die Netz- und Kläranlagenkapazitäten werden voll ausgenutzt.
- Aus dem Mischwassernetz wird nur soviel Wasser in die Überlaufbecken gepumpt, wie aufgrund der Speicherkapazität im Kanalnetz notwendig ist.
- Die Entleerung von Rückhaltebecken wird in Abstimmung mit der Auslastung des Gesamtnetzes, der Pumpwerke und anderen Rückhaltebecken betrieben.

Diese Gesichtspunkte für ein so umfangreiches Steuerungskonzept können natürlich in dieser Arbeit nicht vollständig berücksichtigt werden. Es wird vielmehr versucht, anhand des Lösungsalgorithmus für ein einfaches Regulierungsproblem einen ersten Ansatz für eine mögliche Steuerung zu ermitteln.

Die beeinflussbaren Größen bei einer Steuerung dieses Kanalnetzes sind die Pumpen der Pumpwerke "Linkes Weserufer" und Krimpel, die das Abflußverhalten und den Füllungsgrad der Rückhaltebecken bestimmen. In dieser Arbeit wurde nur das Pumpwerk Krimpel näher untersucht mit dem Ziel, möglichst kostengünstig den Pumpensumpf und das Rück-

haltebecken im Leerzustand zu halten.

6.2 Beschreibung des Steuerungskonzeptes

Die betrachteten Zustandsgrößen sind die Volumina des Pumpensumpfes und des Rückhaltebeckens. Der Zustand des Pumpensumpfes wird hierbei bestimmt durch sein momentanes Volumen, die zulaufende Wassermenge aus dem Kanalnetz und der Pumpenleistung; der des Rückhaltebeckens hängt nur von der Pumpenleistung (in zwei Richtungen) und dem aktuellen Füllungsgrad ab.

Als Kostenfaktor der Zielfunktion ist zum einen der Betrag angesetzt worden, der entsteht, wenn die einzelnen Pumpen 5 Minuten lang laufen - ohne Berücksichtigung der tatsächlich geförderten Wassermenge - und zum anderen der Betrag, den das Pumpen von 1 m³ Wasser kostet.

Die Optimierung wird für einen zuvor festgelegten Untersuchungszeitraum durchgeführt. Anhand der Verträge über die Versorgung mit elektrischer Energie zwischen den Stadtwerken Bremen und dem Stadtentwässerungsamt Bremen sind die der folgenden Tabelle zu entnehmenden Kosten für die Pumpen des Pumpwerk Krimpel ermittelt worden:

Pumpe	Förderleistung (l/s)	Kosten für 5 Min. Laufzeit(DM)
Schneckenpumpe I	115	0.514
Schneckenpumpe II	350	1.403
Schneckenpumpe III	350	1.403
Schneckenpumpe IV	600	2.573
Schneckenpumpe V	1530	6.174
Schneckenpumpe VI	1530	6.174

Dabei dienen die Pumpen IV bis VI zur Beschickung des Rückhaltebeckens. Der Betrag für 1 m³ zu pumpendes Wasser wurde unter Berücksichtigung der oben angegebenen Preise ermittelt und beträgt für 1 m³ im Pumpensumpf 0.001384 DM und für 1 m³ im Rückhaltebecken 0.00138 DM.

Die Minimierung der Kosten bedeutet anschaulich, daß gesteuert wird, welche Pumpenkonstellation die kostengünstigste für die Förderung der gewünschten Wassermenge darstellt.

Damit ergibt sich die quadratische Zielfunktion

$$Z = \min \sum_{k=1}^N K_V \cdot \underline{V}^2(k) + K_P \cdot \underline{P}^2(k-1)$$

mit K_V, K_P - Kostenkoeffizientenmatrizen

\underline{V} - Zustandsvektor (Volumen Pumpensumpf und Volumen Rückhaltebecken)

\underline{P} - Pumpenvektor

Der Lösungsalgorithmus folgt aus dem in Abschnitt 2.5.1.2 beschriebenen Theorem. Mit Hilfe des KMROUT-Verfahrens leistet das Modell OPTICO folgendermaßen die gewünschte Optimierung: es wird zunächst die gain-Matrix anhand der vorgegebenen Systemmatrizen berechnet, wobei die Anzahl der zu durchlaufenden Stufen in Abhängigkeit von der ausgewählten Ereignislänge festgesetzt wird; anschließend wird die Steuergröße Pumpenleistung mit Hilfe des KMROUT-Bausteins berechnet.

Eine Stufe entspricht hierbei einem 5 Minuten Intervall, so daß eine berechnete Pumpenleistung frühestens nach 5 Minuten Laufzeit reguliert werden kann. Da die Berechnung der Pumpenleistung als frei wählbare Größe angenommen wurde, die aber dann für 5 Minuten unverändert bleibt, ergaben sich bei ersten Rechnungen hohe Pumpensumpfvolumina (was einem Rückstau ins Kanalnetz gleichzusetzen wäre).

Durch die Anpassung der ermittelten Pumpenleistung an die tatsächlich mögliche (z.B. ermittelte ca. 98 l/s, tatsächliche aber 115 l/s) ist der für diese Arbeit abschließende Steuerungsalgorithmus festgelegt worden.

Anlage 5.6a bis c enthält die durch die Abflußsimulation mit dem KMROUT-Verfahren ermittelten Abflußganglinien an der ersten durch die Steuerungseingriffe beeinflussten Haltung. Hierbei führte das Ereignis vom 19.08.1981 zur Füllung des Rückhaltebeckens, da die maximale Förderleistung der Schmutzwasserpumpen auf 700 l/s beschränkt ist. Für die Pumpen P I bis P III ergaben sich die folgenden Laufzeiten:

Ereignis	Dauer (min)	Pumpen	Laufzeit (min)
10.10.81	210	PI	185
		PII v PIII	20
25.03.81	245	PI	35
		PII v PIII	170
		PI \wedge PII v PIII	35
19.08.81	295	PI	45
		PII v PIII	90
		PI \wedge PII v PIII	75
		PII \wedge PIII	80

Die Volumenbilanz zwischen gesteuertem und ungesteuertem Abflußprozeß ergab, daß im gesteuerten Fall das Kanalnetzvolumen eher ausgenutzt wurde. Ein zwar gewagter, aber doch erwähnenswerter, Kostenvergleich zwischen den hier gesteuerten und den tatsächlich im Bremer Kanalnetz eingesetzten Pumpen ergab, daß der hier sehr einfache und in vieler Hinsicht verbesserungswürdige Steuerungsansatz geringfügig niedrige Pumpenkosten verursacht hat.

Diese Tatsache sollte nicht überinterpretiert werden, da die angewandten Steuerungseingriffe ohne Berücksichtigung des Systemzustandes des Pumpenwerkes "Linkes Weserufer" ermittelt wurden.

7. Zusammenfassung

Aus den bisher ermittelten Ergebnissen lassen sich für die Praxis noch keine relevanten Aussagen treffen, da die entwickelte Steuerung

- 1) nur ein Teilsystem (Pumpwerk Krimpel) berücksichtigt
- 2) auf die vollständige Beobachtbarkeit des Systemzustandes aufbaut
- 3) die Zielfunktion sehr einfach formuliert wurde
- 4) keine vergleichbaren Ergebnisse mit dem hydrodynamischen Abflußmodell EXTRAN vorliegen, da die Berücksichtigung einer Pumpe bis zum Abschluß dieser Arbeit noch zu großen Instabilitäten der Lösungen führte.

Allerdings ergab die sehr eingeschränkte Problemstellung recht ermutigende Ergebnisse, so daß durch eine weitere Untersuchung mit einer umfassenden Steuerungsstrategie möglicherweise weitergehende Aussagen getroffen werden könnten und sollten.

Für eine on-line-Steuerung tritt neben den in dieser Arbeit dargestellten Problemen, einfache und doch genaue Berechnungsverfahren und Systembeschreibungen zu entwickeln, das Problem des Fehlens von verlässlichen N-Daten, damit die Steuerungsfolgen überhaupt optimal berechnet werden können. Hierbei könnte eine hochaufgelöste on-line-N-Vorhersage (z.B. mit Radardaten) von großem Nutzen sein, um den Schritt vom reaktiven zum prognostischen Steuerungsmodell zu ermöglichen. Die sehr kurze Rechenzeit der OPTICO- und KMROUT-Bausteine läßt den Schluß zu, daß hiermit eine Basis für das weitere mit komplizierteren Steuerungsstrategien und eine Einbeziehung von zusätzlichen Modellbausteinen vorhanden ist.

Schlußwort

Ich möchte allen danken, die mir bei dieser Arbeit geholfen haben, sei es durch fachlichen Rat oder durch ihre persönliche Art der Unterstützung.

Insbesondere danke ich Herrn Winter und Herrn Reinke vom Stadtentwässerungsamt Bremen, die mir alle notwendigen Daten und Unterlagen über das Kanalisationssystem zur Verfügung stellten und mir darüberhinaus in einigen Gesprächen vor Ort die aufgetretenen Fragen bereitwillig beantworteten.

Literaturverzeichnis

- /1/ Abraham, C.: Verringerung der Gewässerbelastung aus Mischwasser durch Abflußüberwachung und Abflußsteuerung
10. Essener Tagung vom 2.-4. März 1977 in Aachen
- /2/ Abraham, C.: Abschätzung der durch Abflußsteuerung in der Hamburger Mischkanalisation zu erreichenden Verringerung der Überlaufwassermengen
DFG-Rundgespräch "Städtische Hydrologie",
26./27.1.1978, Bad Godesberg
- /3/ Anderson, J.J.: Real-time computer control of urban runoff
ASCE, J. Hydraulics Div., HY 1, Jan.1970, 153-164
- /4/ Bellman, R.E.: Adaptive Control Process: A Guided Tour
Princeton, N.Y., University Press 1957
- /5/ Bellman, R.E.: Dynamic programming,
Princeton, N.Y., University Press 1957
- /6/ Bertsehas, D.: Dynamic Programming and Stochastic control
Mathematics in Science and engineering, Volume 125, 1976
- /7/ Bronstein-Semendjajew: Taschenbuch der Mathematik
Neubearbeitung
BSB.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 20. Auflage, 1981
- /8/ Chan, M.L.: Optimal real-time control of urban stormwater drainage,
Techn. Rept. No. 87, Cornell Univ. Wat. Res. and Marine Sciences Center, Ithaca, New York, Aug. 1974

- /9/ Coffee, H.C.
Evenson, D.E.
Giguere, P.R.
Handa, G.T.
Phanartzis, C.A.
Roesner, L.A.:
Demonstrate real time automatic control of combined sewersystems,
Phase 1 Report, Bureau of Sanitary Engineering, City and County of San Francisco, March 1979
- /10/ Euler, G.:
Anwendung des Kalinin-Miljukov-Verfahrens,
5. DVWK-Fortbildungslehrgang für Hydrologie, Barsinghausen, 1973
- /11/ Euler, G.:
Ein hydrologisches Näherungsverfahren für die Berechnung des Wellenablaufs in teilgefüllten Kreisrohren,
Wasser und Boden, Heft 2, 1983,
S. 85-88
- /12/ Fuchs, L.:
HYSTEM-EXTRAN, Hydrologische Oberflächenabfluß- und hydrodynamische Kanalnetz-berechnung
Herleitung, Beschreibung und Anwendung
1983, unveröffentlicht
- /13/ Grigg, S.N.
Labadie, J.W.:
Computing the big picture,
Water and Wastes Engineering, May 1975, pp. 37-39 + 86
- /14/ Grigg, S.N.
Labadie, J.W.
Trimble, G.R.
Wisner, D.A.:
Computerized City-Wide Control of Urban Stormwater
Techn. Mem. No. 29, ASCE Urban Water Resources Research Program, New York, Febr. 1976
- /15/ Labadie, J.W.
Grigg, N.S.
Bradford, B.H.:
Automatic Control of Large-Scale Combined Sewer Systems,
J. Env. Div. ASCE, EE 1, Febr. 1975,
27-39
- /16/ Labadie, J.W.
Lazaro, R.C.
Morrow, D.M.:
Worth of short-term rainfall forecasting for combined sewer overflow control,
Wat. Resources Research, 17/5, 1489-1497,
Oct. 1981

- /17/ Labadie, J.W.
Morrow, D.M.
Chen, Y.H.: Optimal Control of Unsteady combined
Sewer flow,
Journal of the Water Resources Manage-
ment and Planning Division,
ASCE, WR1, March 1980, 205-223
- /18/ Martin, G.
Mecklenburg, H.-J.
Winter, J.
Voigt, D.: Zentrales Datenerfassungssystem zur
Steuerung des städtischen Kanalnetzes
der Stadt Bremen,
Korrespondenz Abwasser Heft 3,
1978, 25. Jahrgang, S. 68-74
- /19/ Meditch, J.S.: Stochastic Optimal Linear Estimation
and Control
Mc Graw - Hill Book Company, 1969
- /20/ Profilbuch, Stadtentwässerungsamt
Bremen
- /21/ Schilling, W.: Vorschläge zur Einführung in den
Problemkreis "Steuerung von Kanal-
netzen"
- /22/ Taschenbuch der Wasserwirtschaft
6. Auflage, Paul Paray, 1982
- /23/ Trotta, P.D.
Labadie, J.W.
Grigg, N.S.: Automatic Control Strategies for Urban
Stormwater,
J. Hydraulics Div., ASCE, Hy 12,
Dec. 1977, 1443-1459
- /24/ Ueker, K.J.: Tabellen zur Hydraulischen Berechnung
von Steinzeugrohren,
Fachverband Steinzeugindustrie e.V.,
72
- /25/ Verworn, H.-R.: Untersuchung der Anwendungsmöglichkei-
ten des Kalinin-Miljukov-Verfahrens
bei kleinen und mittleren Vorflutern,
Diplomarbeit, Institut für Wasserwirt-
schaft, Hydrologie und landwirtschaft-
lichen Wasserbau, Universität Hannover,
1974

- /26/ Verworn, W.
Winter, J.: Steuerung und Datensammlung im Kanal-
netz der Stadt Bremen
Haus der Technik - Vortragsveröffent-
lichungen 447, S. 43-47
- /27/ Weber, H.H.: Dynamische Programmierung
Akademische Verlagsgesellschaft, Frank-
furt a. M., 1974
- /28/ Wenzel, H.G.
Labadie, J.W.
Grigg, N.S.: Detention Storage Control Strategy
Development,
J. Wat. Res. Plann. Manag. Dir.
ASCE, WR1, April 1976, 117-135
- /29/ Winter, J.: Das Niederschlagsverhalten städtischer
Gebiete
13. Abwassertechn. Seminar

Bezeichnungen

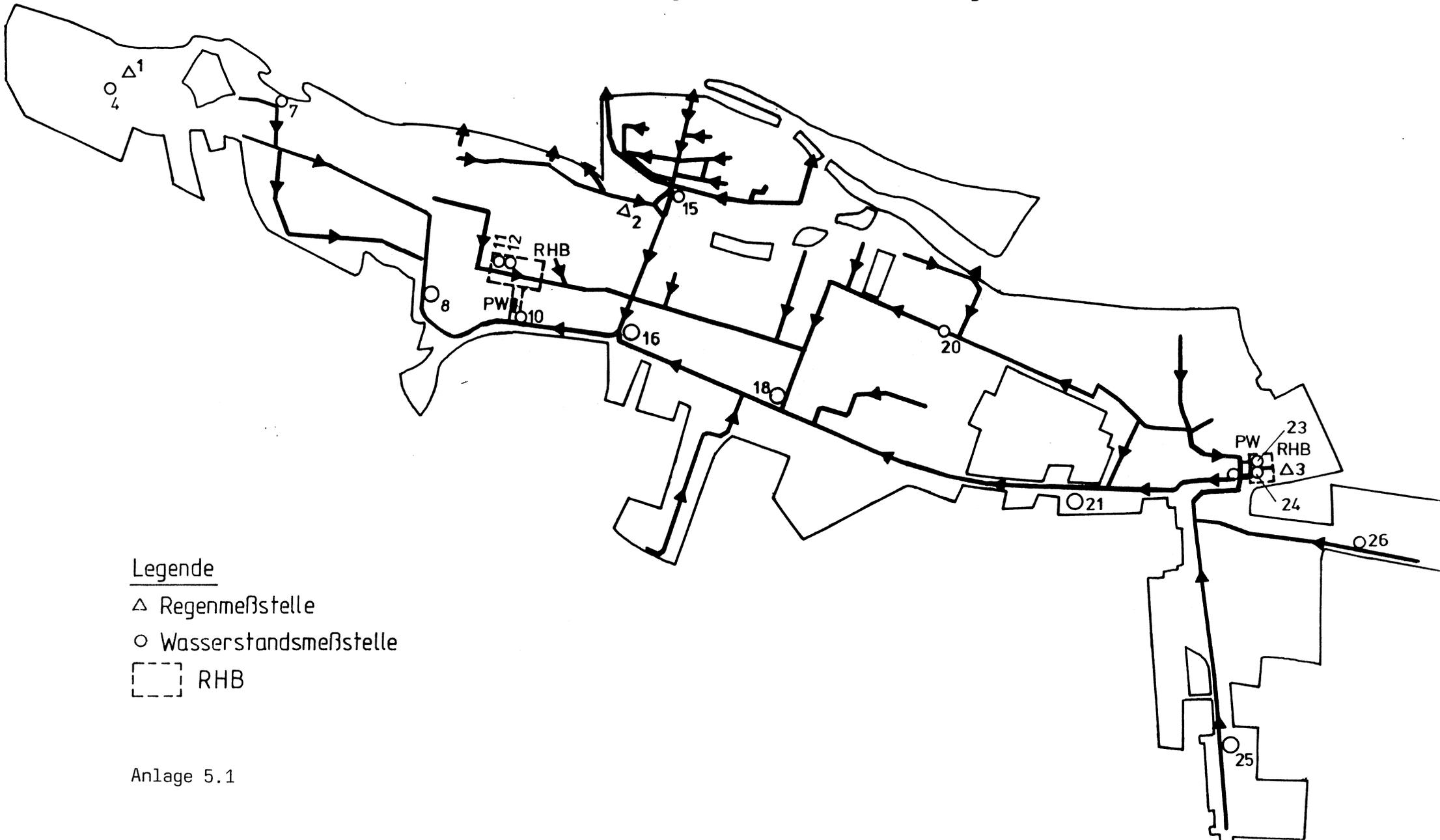
x_i	- Zustandsvariablen
$\underline{x}, \underline{q}$	- Zustandsvektor
$\underline{u}, \underline{y}$	- Steuerungsvektor
\underline{r}	- Störvektor
$\underline{z}, \underline{c}$	- Vektoren
\underline{x}'	- Transponierter Vektor
A, B, M, Q, R, W	- Matrizen
A', B', V(\underline{r})	- Verteilungsfunktion
E(...)	- Erwartungswert
J(...), $f_N(\dots)$	- Zielfunktion
N, k, t	- Stufenindex
μ^k	- physikalisch realisierbare Regelungspolitik
S	- gain-Matrix
C_1, c, c_i, C_2, d, d_i	- Kalinin-Miljukov-Konstanten
K	- Retensionskonstante
L	- Berechnungslänge
$Q_i(t)$	- Abfluß aus Haltung i zum Zeitpunkt t
$u_i(t)$	- Zufluß in Haltung i zum Zeitpunkt t
B	- Wasserspiegelbreite
J_s	- Sohlgefälle
Q_v	- scheinvolle Abflußleistung
n, m	- Dimension
V	- Minimum der Zielfunktion
J	- Zielfunktion
q^*	- gewünschter Zustandsvektor
Q, Q_Z	- Zufluß
Q, Q_A, Q_{ST}	- Abfluß
V	- Volumen
A	- Einzugsgebiet
L	- Länge einer Haltung/Rohres
	- Länge eines charakteristischen Abschnittes

B	- Breite der Einzugsgebietsfläche
l_f	- Länge des Fließweges
c	- Fließlängenkoeffizient
u	- Geschwindigkeit
A	- durchflossene Querschnittsfläche
h, h_{ST}	- Wassertiefe
I_s	- Sohlgefälle
I_R	- Reibungsgefälle
D	- Rohrdurchmesser
g	- Erdbeschleunigung
I_{ST}	- Wasserspiegelgefälle
r	- Radius

ZENTRALES DATENERFASSUNGSSYSTEM - LINKES WESERUFER

- ZDS -

Standort der Regen- und Wasserstandsmeßgeräte

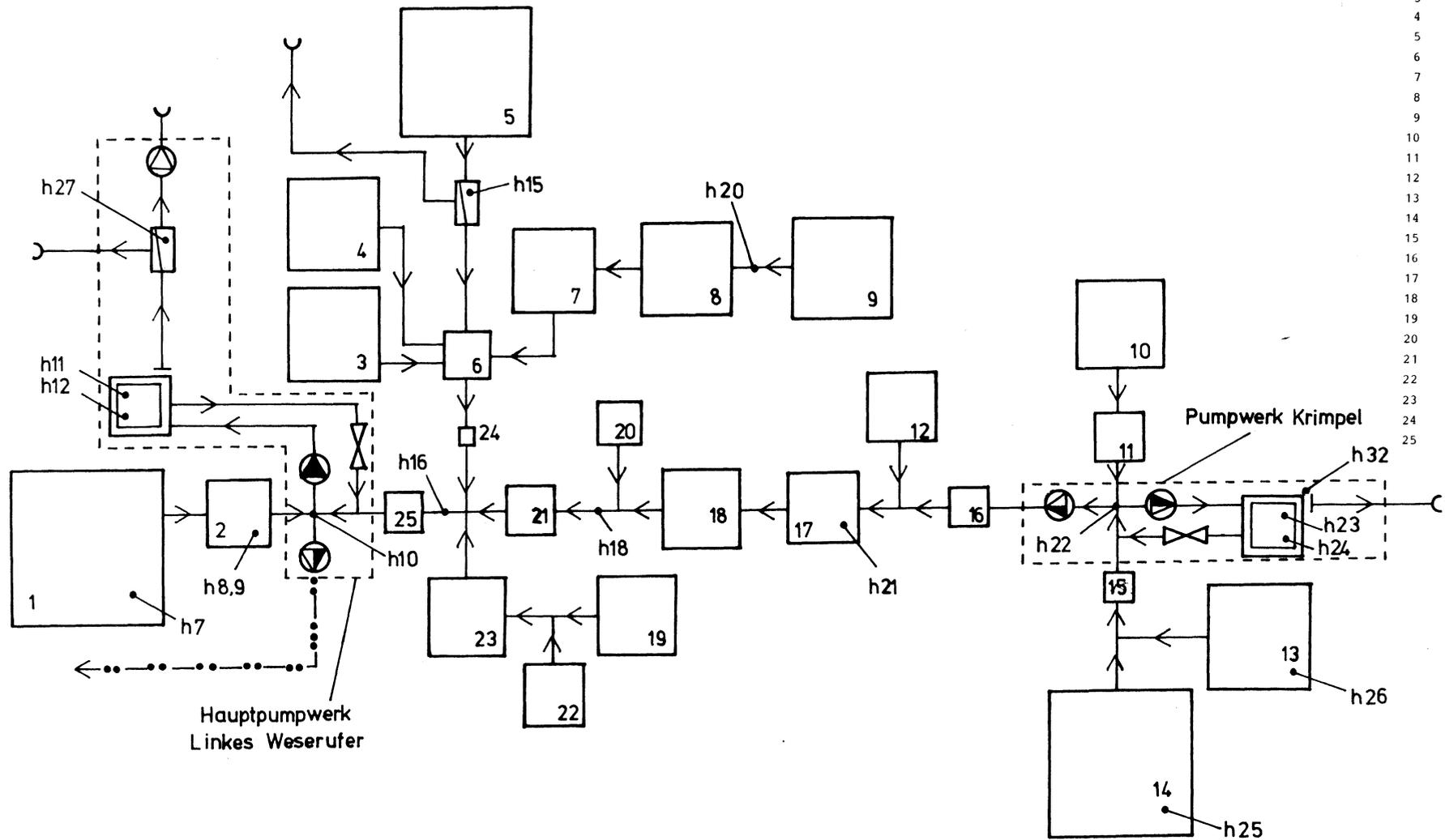


Legende

△ Regenmeßstelle

○ Wasserstandsmeßstelle

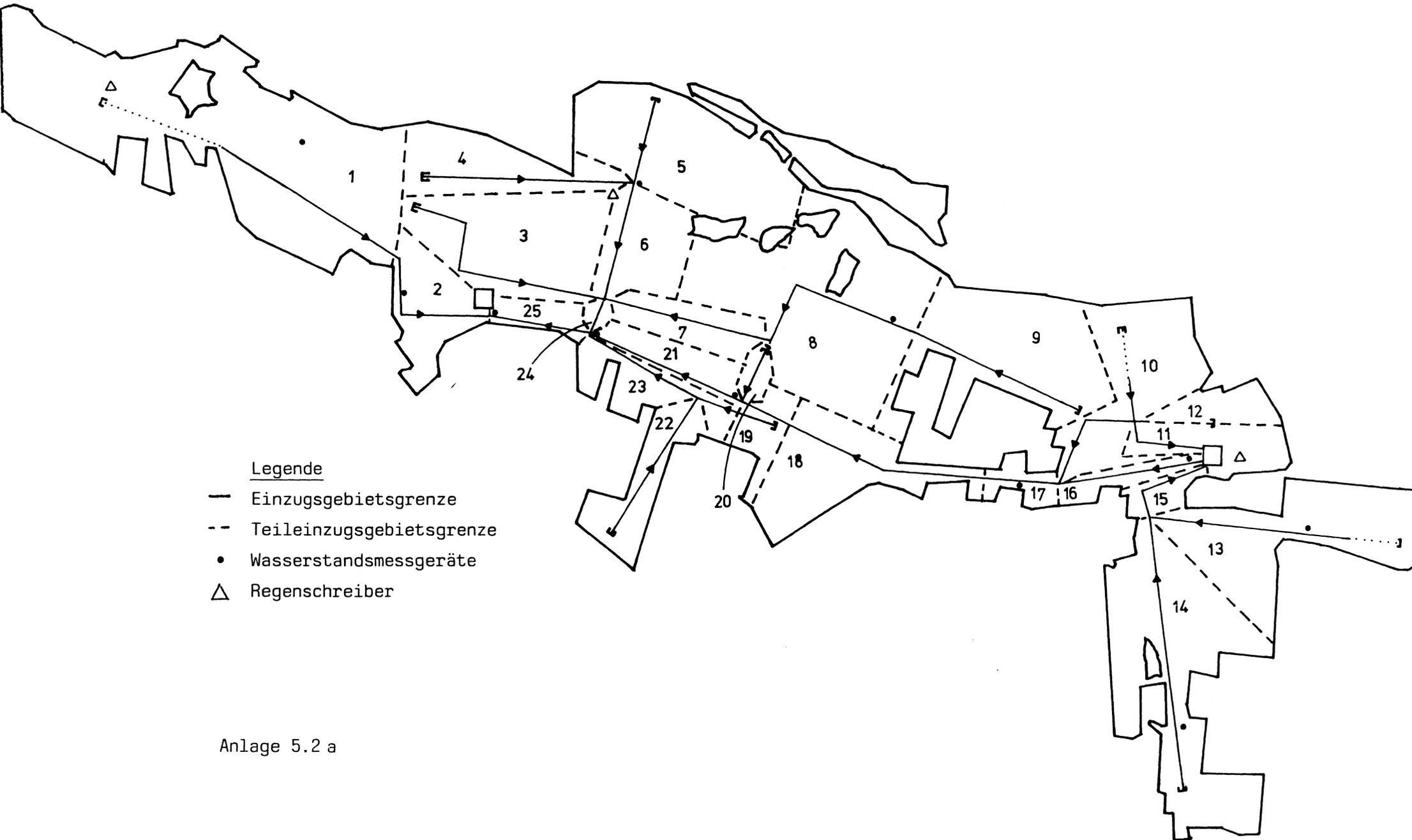
▭ RHB



Einzugsgebiet	A_{ges} (ha)	A_{red} (ha)
1	144	50
2	24.9	6
3	50	20.8
4	51	21.5
5	92.4	60.9
6	13.6	8.5
7	39.6	24.1
8	49	32
9	59	33
10	45	15
11	13.7	2
12	29	11
13	63	28
14	118	32
15	5.7	1.3
16	10	3
17	28	12
18	38	14
19	37	30
20	11	5
21	13	7
22	21.6	15
23	37	29.8
24	1.9	1.2
25	8.5	3.8

Anlage 5.2

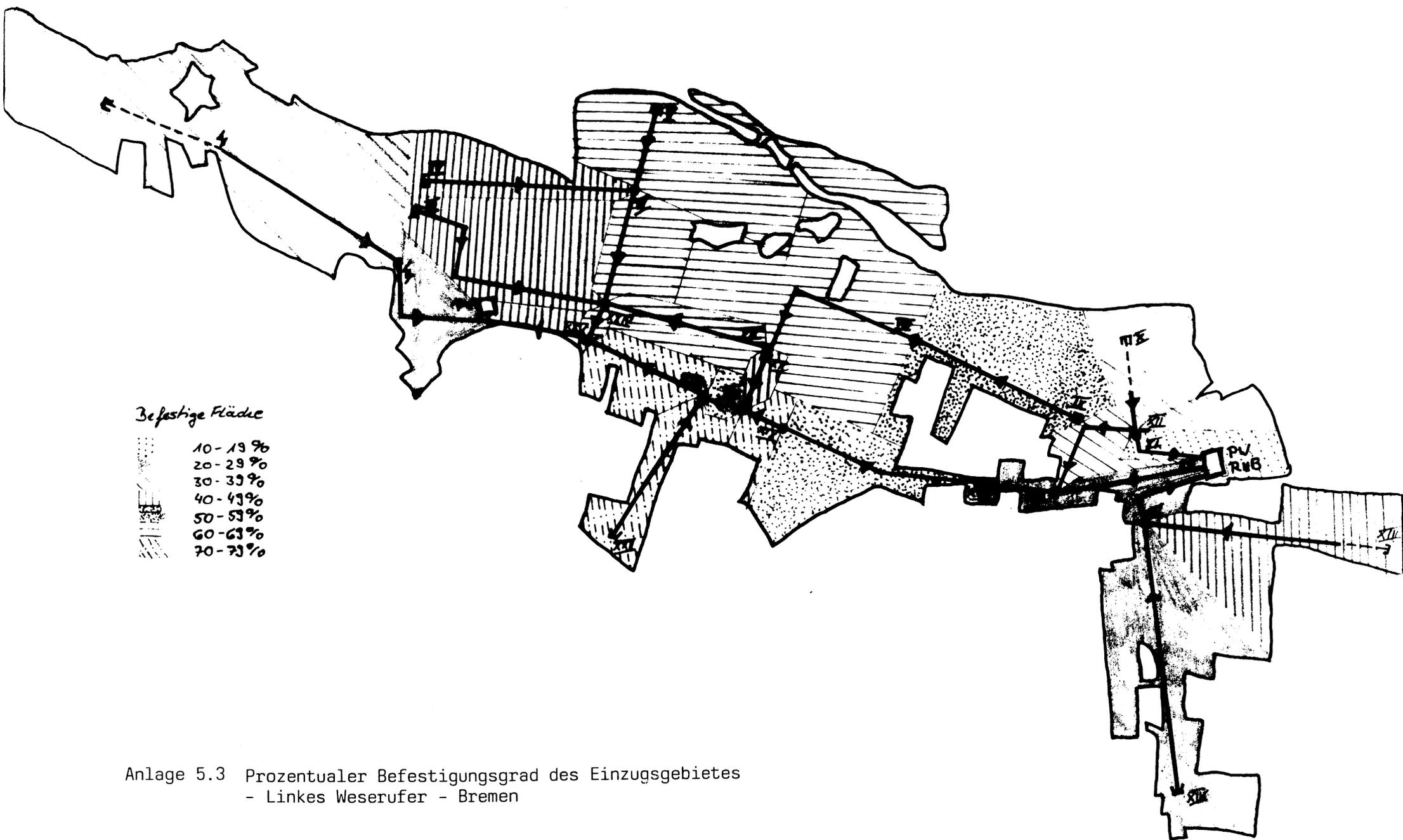
Systemskizze Kanalnetz "Linkes Weserufer", Bremen



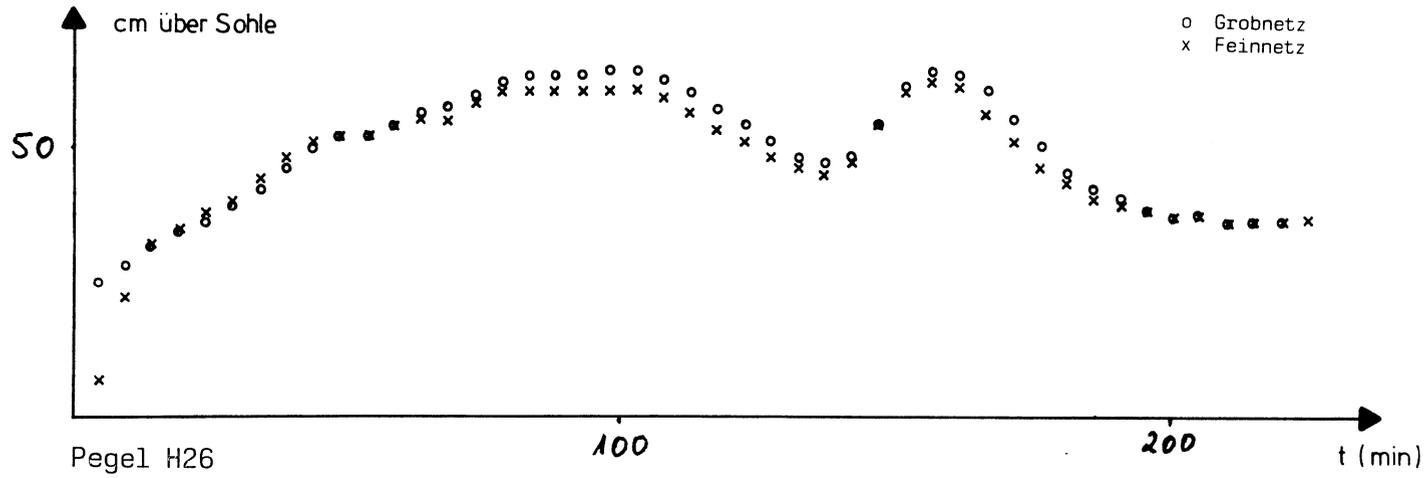
Legende

- Einzugsgebietsgrenze
- Teileinzugsgebietsgrenze
- Wasserstandsmessgeräte
- △ Regenschreiber

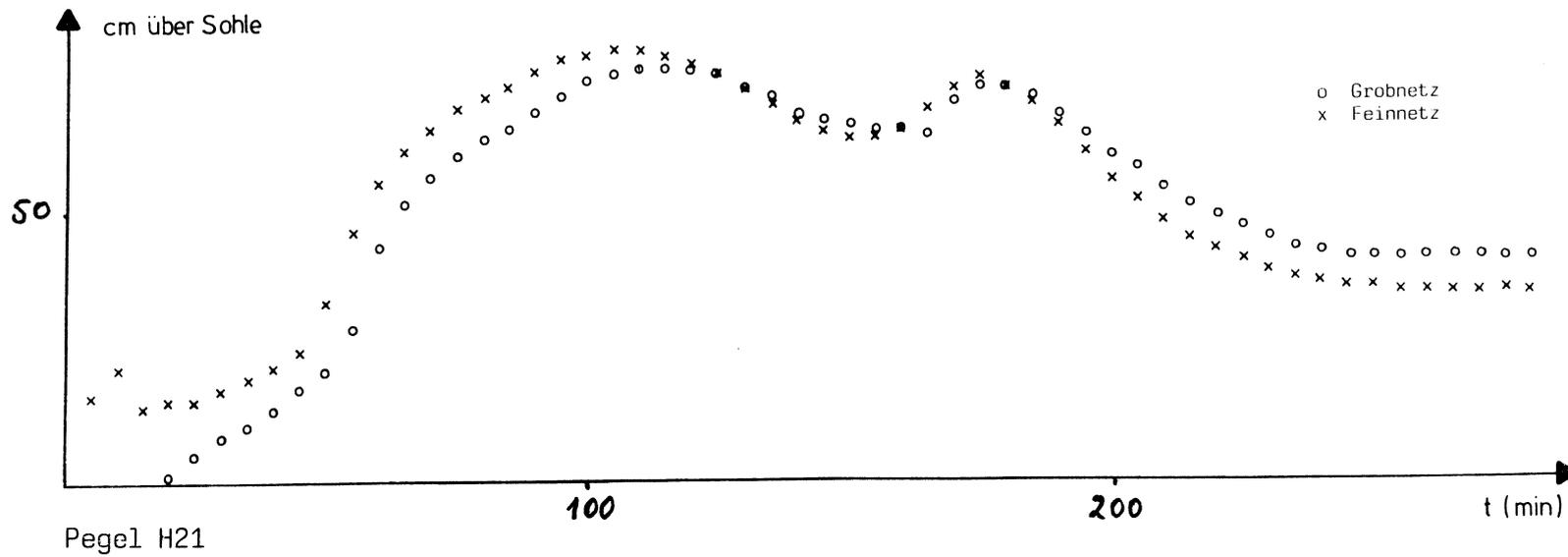
Anlage 5.2 a

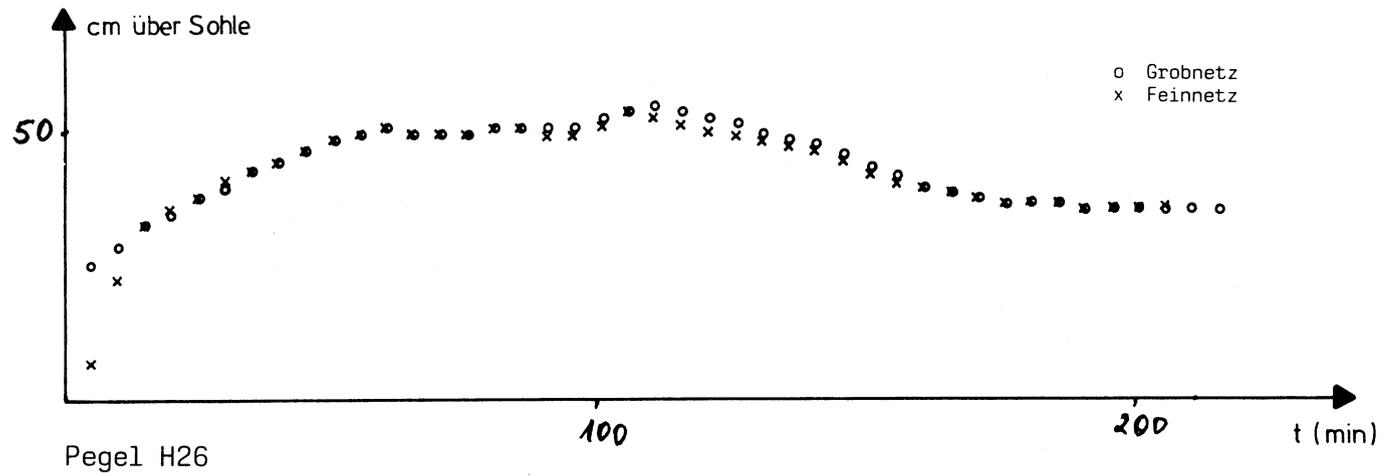


Anlage 5.3 Prozentualer Befestigungsgrad des Einzugsgebietes
 - Linkes Weserufer - Bremen

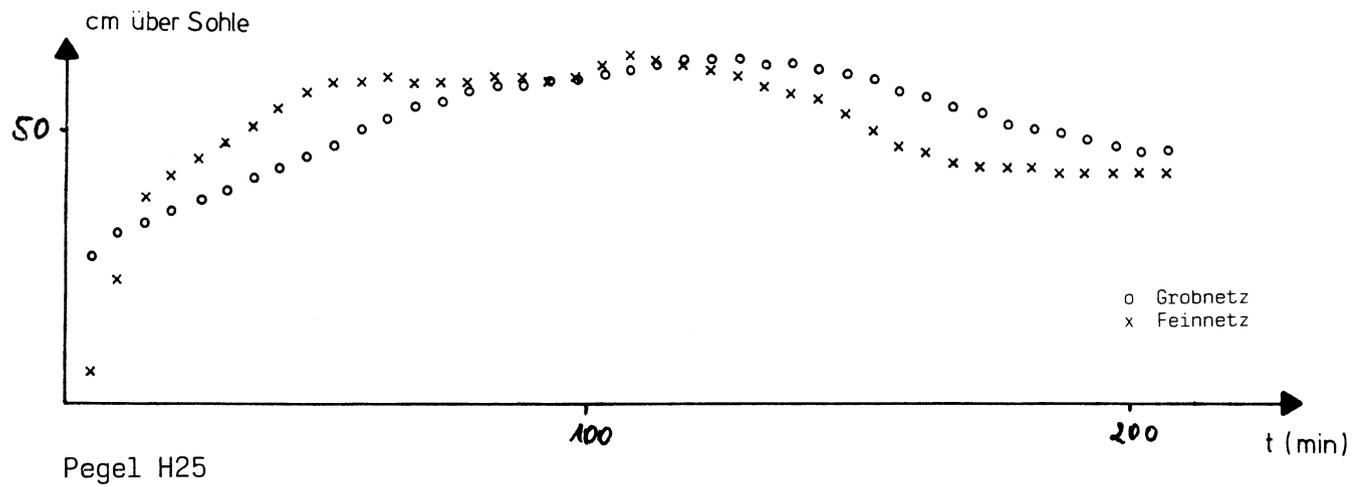


Anlage 5.3.a Wasserstandsganglinien Ereignis vom 19.08.1981





Anlage 5.3.b Wasserstandsganglinien Ereignis vom 25.03.1981



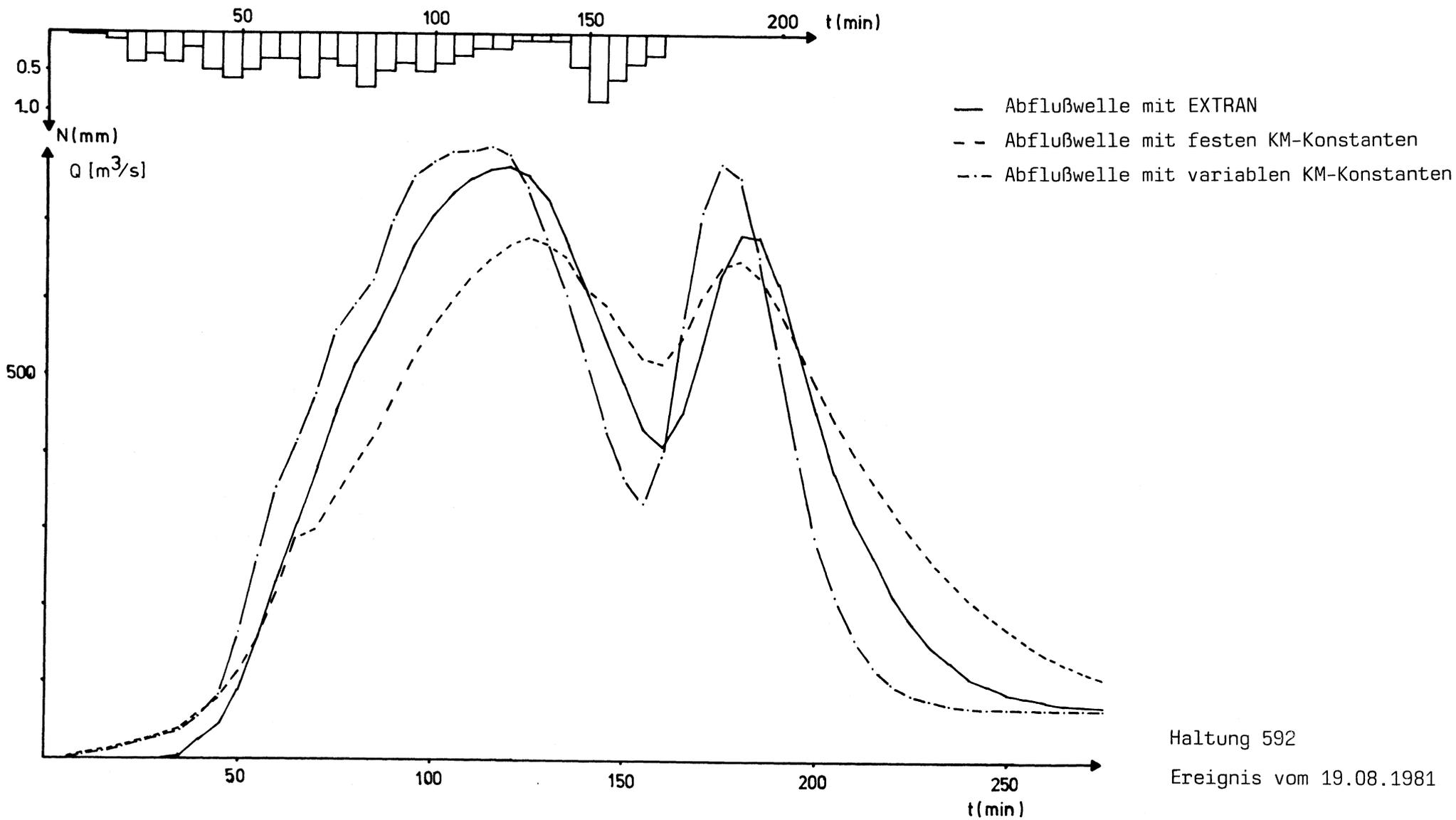
Erläuterungen zur Anlage 5.4:

Es wird das gesamte Grobnetz mit seinen wichtigsten Daten tabellarisch dargestellt. Die Spalte RETCON gibt die ermittelte Retentionskonstante in Minuten für jede an und Spalte "> t" sagt aus, ob die Retentionszeit größer dem fest vorgegebenen Berechnungsintervall von $t = 1$ min ist. KMCN1 entspricht der Größe c und KMCN2 der Größe d in Gleichung (4.9).

**** BERECHNUNG DER KALININ-MILJUKOV-KONSTANTEN FÜR TROCKENWETTERABFLUSS ****

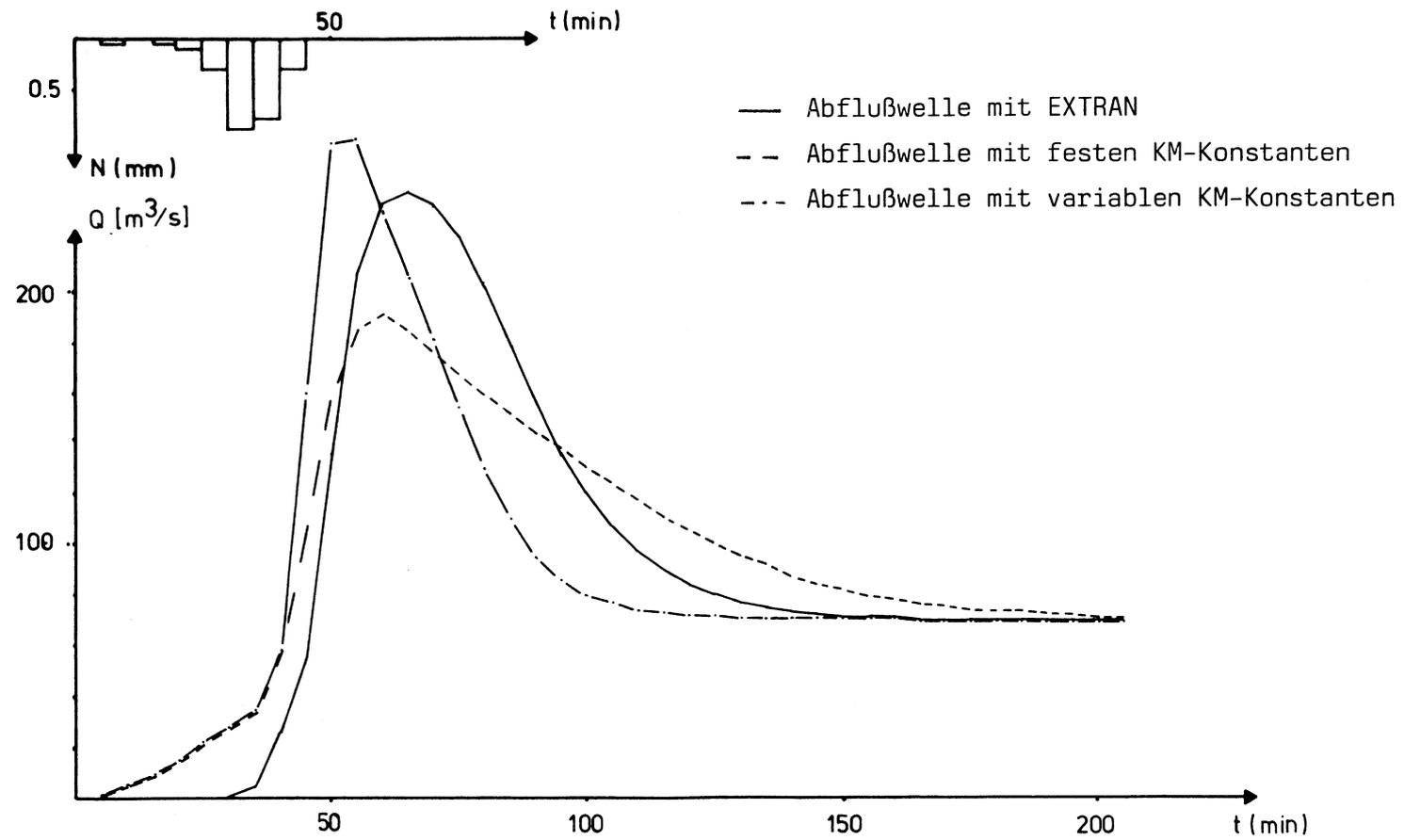
HALTUNG	SCHACHTNR.	NW	JS	LAENGE	RVOLL	RETCON	>T	KMCN1	KMCN2	EXZUFL	PTYP
466	8440584201	1.20	.0009	163.0	.614	4.962	JA	.1825	.0943	.0124	4
435	8420184204	1.20	.0008	195.0	.581	6.645	JA	.1397	.0716	.0110	4
595	8420478702	1.20	.0007	297.0	.557	8.660	JA	.1091	.0556	0.0000	4
601	7870278714	1.20	.0012	280.0	.720	6.828	JA	.1362	.0698	.0093	4
258	7871474612	1.20	.0014	305.0	.779	6.894	JA	.1350	.0691	0.0000	4
630	1280281704	.96	.0009	300.0	.631	21.647	JA	.0451	.0227	.0176	1
148	8170481712	1.20	.0012	227.0	.737	6.730	JA	.1381	.0707	0.0000	4
133	8171281608	1.20	.0008	250.0	.577	8.147	JA	.1155	.0589	0.0000	4
117	8160881419	1.20	.0008	291.0	.576	9.829	JA	.0967	.0492	.0026	4
52	8141981241	1.20	.0006	284.0	.496	9.901	JA	.0961	.0488	.0010	4
303	8124174315	.96	.0005	262.0	.467	17.729	JA	.0548	.0277	.0146	1
255	7481574612	.96	.0012	167.0	.728	7.376	JA	.1268	.0648	0.0000	1
226	7461278322	1.50	.0020	206.0	1.989	2.838	JA	.2970	.1572	.0014	4
592	7832276700	1.50	.0023	228.0	2.104	2.923	JA	.2897	.1531	0.0000	4
360	7058870712	.96	.0031	245.0	1.175	18.935	JA	.0514	.0259	.0046	1
364	7071278101	.96	.0056	219.0	1.583	14.136	JA	.0683	.0346	.0026	1
123	7810178308	.96	.0016	292.0	.845	23.620	JA	.0415	.0209	0.0000	1
152	7830876700	1.20	.0005	282.0	.871	49.539	JA	.0200	.0100	.0020	9
478	7670174411	.96	.0017	326.0	.858	28.165	JA	.0349	.0175	0.0000	1
558	7441174423	1.20	.0018	208.0	1.620	6.651	JA	.1396	.0715	.0012	1
562	7442374258	1.20	.0013	214.0	1.345	9.689	JA	.0985	.0501	0.0000	1
415	7812566801	.96	.0004	282.0	.432	32.557	JA	.0307	.0152	.0110	1
1212	6680166803	1.00	.0009	91.0	.304	3.540	JA	.2461	.1288	0.0000	4
449	6680372902	1.20	.0028	246.0	1.397	3.364	JA	.2571	.1349	.0046	4
454	7290272907	1.40	.0005	148.0	.922	4.383	JA	.2040	.1059	0.0000	4
457	7290774258	1.50	.0036	25.0	2.866	.463	NEIN	.8849	.5907	0.0000	4
563	7425874106	1.40	.0013	52.0	2.083	2.024	JA	.3899	.2109	0.0000	1
568	7410674114	1.40	.0018	285.0	2.380	7.266	JA	.1286	.0658	.0990	1
1137	7411462805	1.60	.0012	280.0	2.809	8.148	JA	.1155	.0589	0.0000	1
871	6280562810	1.60	.0010	267.0	2.609	8.158	JA	.1154	.0589	0.0000	1
876	6281062622	1.60	.0011	280.0	2.637	8.967	JA	.1055	.0537	0.0000	1
3134	6282762328	2.00	.0015	296.0	5.644	7.906	JA	.1188	.0607	.0353	1
3137	6282862133	2.00	.0015	224.0	5.555	6.300	JA	.1468	.0753	0.0000	1
2930	6070160901	1.21	.0008	333.0	1.059	69.615	JA	.0143	.0071	.0009	1
2844	6090162105	1.45	.0005	215.0	1.338	49.306	JA	.0201	.0101	0.0000	1
2850	6210562133	1.45	.0007	213.0	1.593	48.847	JA	.0203	.0102	0.0000	1
3140	6213346753	2.20	.0017	224.0	7.654	5.847	JA	.1572	.0808	.0046	1
1605	4671546737	.97	.0009	186.0	.653	23.916	JA	.0410	.0206	.0020	1
1610	4673746753	.97	.0010	131.0	.631	15.305	JA	.0632	.0320	.0020	1
298	4675342823	2.40	.0013	173.0	8.505	6.278	JA	.1472	.0756	0.0000	1
300	4282342824	2.40	.0007	97.0	6.258	3.364	JA	.2571	.1349	0.0000	1
251	4282442630	2.50	.0014	281.0	9.671	7.967	JA	.1180	.0602	.0065	1
160	4283040805	2.50	.0013	281.0	9.419	8.758	JA	.1079	.0550	.0020	1
98	4080542106	2.60	.0020	121.0	12.817	2.934	JA	.2888	.1526	0.0000	1
2956	6282362311	.96	.0005	278.0	.471	36.302	JA	.0272	.0136	.0007	1
7870	62311627128	.96	.0008	280.0	.575	29.381	JA	.0335	.0168	.0073	1
1658	6212842310	.96	.0005	275.0	.473	33.602	JA	.0293	.0147	0.0000	1
374	4281040307	.96	.0008	203.0	.590	17.954	JA	.0542	.0273	0.0000	1
51	5440358305	.96	.0004	267.0	.444	42.027	JA	.0235	.0118	.0037	1
35	5830558114	.96	.0007	298.0	.571	34.030	JA	.0290	.0145	.0014	1
284	5811442803	.96	.0010	298.0	.667	25.153	JA	.0390	.0196	.0018	1
293	4280342806	.96	.0013	194.0	.756	16.341	JA	.0594	.0300	.0015	1
297	4280640302	.96	.0026	177.0	1.075	8.569	JA	.1101	.0561	.0012	1
240	4030242617	.96	.0006	270.0	.527	19.482	JA	.0500	.0252	0.0000	1
189	4261742404	1.30	.0001	207.0	.453	23.912	JA	.0410	.0206	.0039	1
148	4740442803	1.30	.0030	223.0	2.547	8.331	JA	.1131	.0577	.0050	1
150	4080342106	1.80	.0010	92.0	3.432	5.601	JA	.1635	.0842	.0030	1

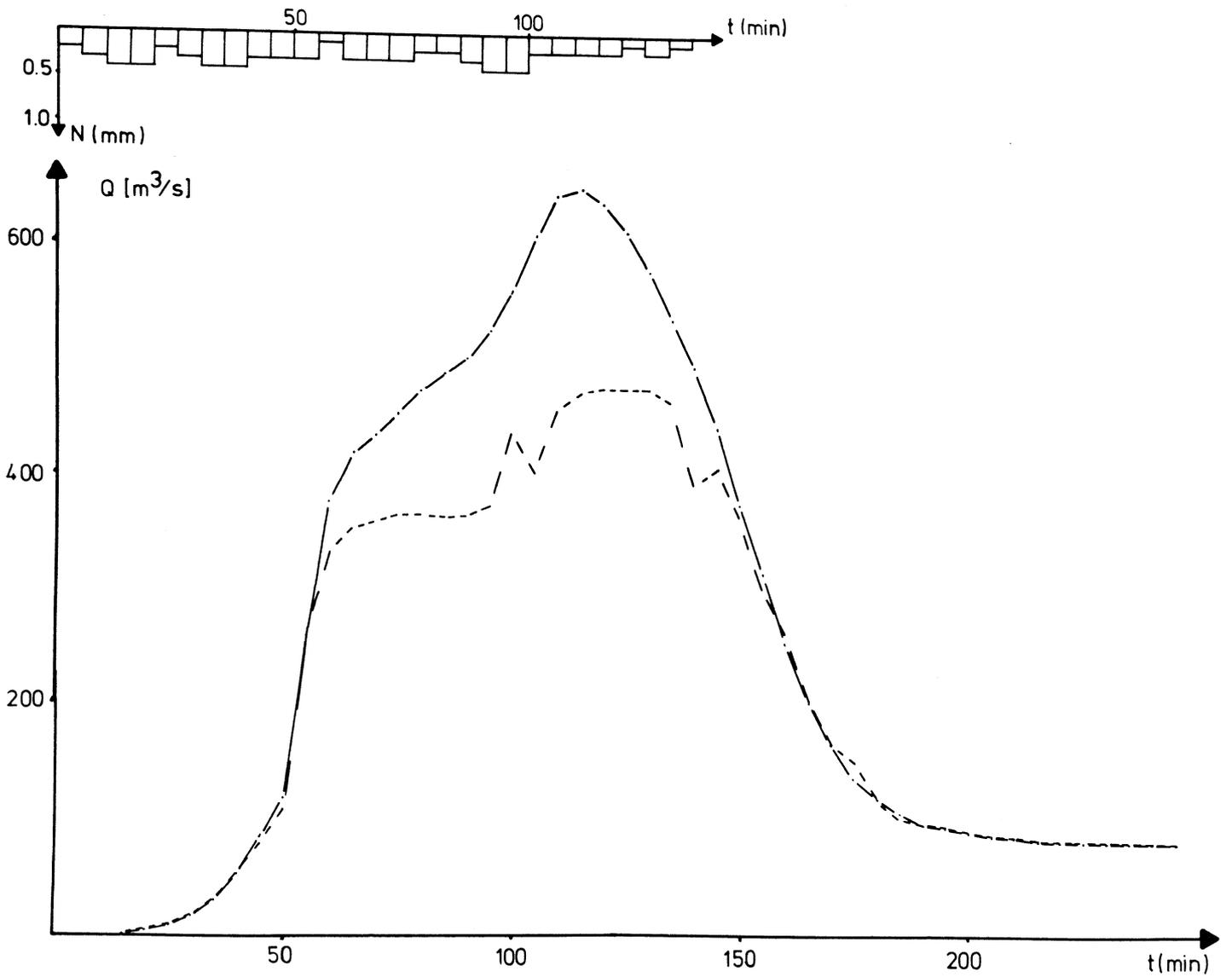
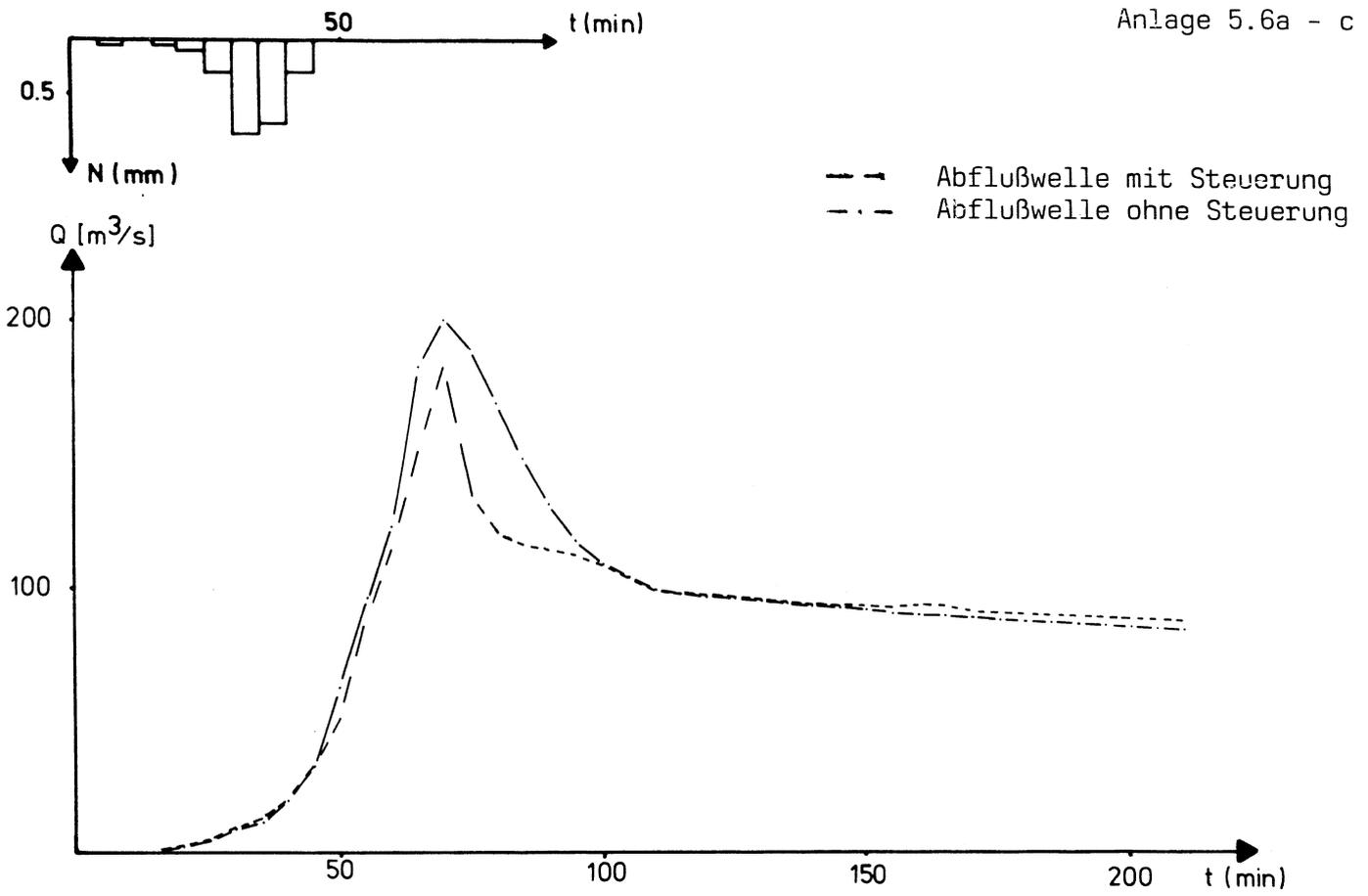
1059	6680566633	.80	.0016	274.0	.516	45.630	JA	.0217	.0109	0.0000	1
1046	6663366652	.96	.0002	237.0	.271	73.432	JA	.0135	.0068	.0015	1
1043	6665264801	.96	.0007	194.0	.564	21.603	JA	.0452	.0228	0.0000	1
944	6480166317	.96	.0009	164.0	.614	30.488	JA	.0323	.0162	.0010	1
892	6631766133	1.40	.0004	315.0	.611	15.775	JA	.0614	.0310	.0135	4
91	5051050737	.80	.0017	272.0	.536	45.297	JA	.0218	.0110	0.0000	1
931	5073766133	.80	.0032	246.0	.735	29.262	JA	.0336	.0169	.0007	1
893	6613366137	1.28	.0022	51.0	2.086	2.523	JA	.3272	.1744	0.0000	1
1582	6613746841	1.40	.0006	287.0	1.419	20.655	JA	.0473	.0238	0.0000	1
1469	4684146618	1.40	.0009	291.0	1.662	16.351	JA	.0593	.0300	.0112	1
1473	4661846429	1.40	.0002	173.0	.857	12.312	JA	.0780	.0395	.0246	1
1435	4642946999	1.26	.0007	258.0	1.166	12.273	JA	.0782	.0397	.0166	1
1547	4699944602	1.26	.0004	274.0	.819	16.604	JA	.0584	.0295	0.0000	1
1552	4460246539	1.26	.0003	287.0	.800	17.070	JA	.0569	.0287	.0052	1
179	4653942426	1.30	.0004	255.0	.874	14.848	JA	.0651	.0329	.0031	1
119	4242640901	1.27	.0004	199.0	.878	10.936	JA	.0874	.0444	.0077	1
124	4090142240	1.27	.0018	176.0	1.846	5.496	JA	.1663	.0857	0.0000	1
1854	3310334336	1.12	.0010	201.0	1.020	7.739	JA	.1212	.0619	.0641	1
1897	3432734536	1.00	.0027	173.0	1.224	16.147	JA	.0601	.0303	0.0000	1
1056	3433644340	1.12	.0015	156.0	1.213	3.886	JA	.2269	.1183	.1263	1
1986	3450734540	.80	.0020	156.0	.581	21.649	JA	.0451	.0227	0.0000	1
1899	3454034340	1.12	.0064	165.0	2.540	5.439	JA	.1680	.0866	0.0000	1
1769	3434032701	1.50	.0006	160.0	1.610	5.544	JA	.1650	.0850	.0232	1
2123	3472534730	.96	.0015	137.0	.805	14.248	JA	.0678	.0343	.0056	1
2208	3240434854	.80	.0060	252.0	1.012	13.948	JA	.0692	.0350	.0042	1
2132	3485434730	.96	.0010	288.0	.656	19.060	JA	.0511	.0258	.0046	1
2017	3473034533	1.12	.0008	298.0	.895	35.282	JA	.0279	.0140	.0002	1
2020	3453332701	1.26	.0008	163.0	1.214	36.698	JA	.0269	.0135	0.0000	1
480	3021130448	.96	.0029	219.0	1.132	16.682	JA	.0582	.0294	0.0000	1
556	3044830451	.96	.0010	115.0	.650	10.221	JA	.0932	.0474	0.0000	1
636	3045132701	.96	.0008	215.0	.608	11.823	JA	.0811	.0411	.0347	1
1970	3270130620	1.60	.0011	82.0	2.669	2.314	JA	.3509	.1881	0.0000	1
590	3062028504	1.26	.0009	74.0	1.323	1.179	JA	.5719	.3259	0.0000	1
1414	1882730109	.96	.0010	271.0	.676	35.388	JA	.0279	.0140	0.0000	1
449	3010930124	.96	.0041	304.0	1.349	25.389	JA	.0386	.0194	.0070	1
534	3017428902	.96	.0027	295.0	1.092	37.727	JA	.0262	.0131	0.0000	1
625	2880230615	1.20	.0007	261.0	1.020	37.481	JA	.0263	.0132	0.0000	1
628	3061528504	1.20	.0007	281.0	1.033	36.123	JA	.0273	.0137	.0066	1
700	2850430817	1.57	.0010	289.0	1.370	3.663	JA	.2389	.1249	0.0000	4
727	3081742740	1.57	.0012	221.0	1.459	2.714	JA	.3082	.1636	.0170	4
832	2620829001	.96	.0002	259.0	.259	78.916	JA	.0126	.0063	0.0000	1
837	2900126403	.96	.0007	247.0	.567	31.272	JA	.0315	.0150	.0046	1
362	2640326604	.96	.0009	279.0	.642	35.324	JA	.0279	.0140	0.0000	1
639	2660430720	.96	.0005	252.0	.476	38.761	JA	.0255	.0128	0.0000	1
584	3050830720	.96	.0011	180.0	.701	33.680	JA	.0293	.0147	.0019	1
646	3072030727	.96	.0026	280.0	1.070	15.314	JA	.0632	.0319	0.0000	1
675	3072742240	.96	.0010	205.0	.657	18.368	JA	.0530	.0267	0.0000	1
136	4224042106	1.80	.0018	244.0	3.264	2.607	JA	.3186	.1694	.0033	4
96	4210642119	3.20	.0009	295.0	15.241	7.205	JA	.1296	.0663	.0006	1
420	4211926813	3.20	.0011	294.0	16.325	6.869	JA	.1355	.0694	.0750	1
512	1680216701	1.20	.0008	282.0	1.080	80.993	JA	.0123	.0061	0.0000	1
732	1670118801	.96	.0004	318.0	.407	67.781	JA	.0146	.0073	.0012	1
785	1880118817	1.04	.0006	133.0	.636	81.907	JA	.0121	.0061	0.0000	1
786	1881718018	1.12	.0004	67.0	.666	4.992	JA	.1815	.0938	.0256	1
417	1881826204	1.20	.0005	256.0	.817	16.333	JA	.0594	.0300	.0085	1
452	2620426407	1.20	.0004	178.0	.800	13.690	JA	.0704	.0357	.0074	1
557	1811017001	1.20	.0009	157.0	.626	4.870	JA	.1856	.0960	.0358	4
581	1700116801	1.30	.0012	224.0	.899	6.398	JA	.1447	.0742	0.0000	4
608	1122816801	1.44	.0006	191.0	1.464	22.196	JA	.0441	.0222	.0105	1
86	1680111614	1.20	.0009	330.5	1.120	19.804	JA	.0492	.0248	0.0000	1
94	1161418701	1.20	.0003	250.0	.674	18.386	JA	.0529	.0267	0.0000	1
730	1870118716	1.20	.0004	255.0	.783	17.579	JA	.0553	.0279	0.0000	1
403	1871626103	1.20	.0003	209.0	.689	14.408	JA	.0671	.0339	0.0000	1
460	2610326407	1.36	.0004	321.0	1.055	22.263	JA	.0439	.0221	0.0000	1
454	2640726409	1.80	.0005	102.0	1.699	2.188	JA	.3668	.1973	0.0000	4
468	2640926502	1.80	.0003	189.0	1.365	4.250	JA	.2096	.1089	0.0000	4
508	2650226803	2.10	.0005	316.0	2.589	6.657	JA	.1395	.0715	0.0000	4
509	2671326803	1.20	.0010	122.0	.657	14.948	JA	.0647	.0327	.0007	4
514	2680326813	2.10	.0003	306.0	2.076	8.387	JA	.1124	.0573	.0006	4
421	2681324401	3.20	.0020	30.0	22.149	.549	NEIN	.8383	.5399	0.0000	1

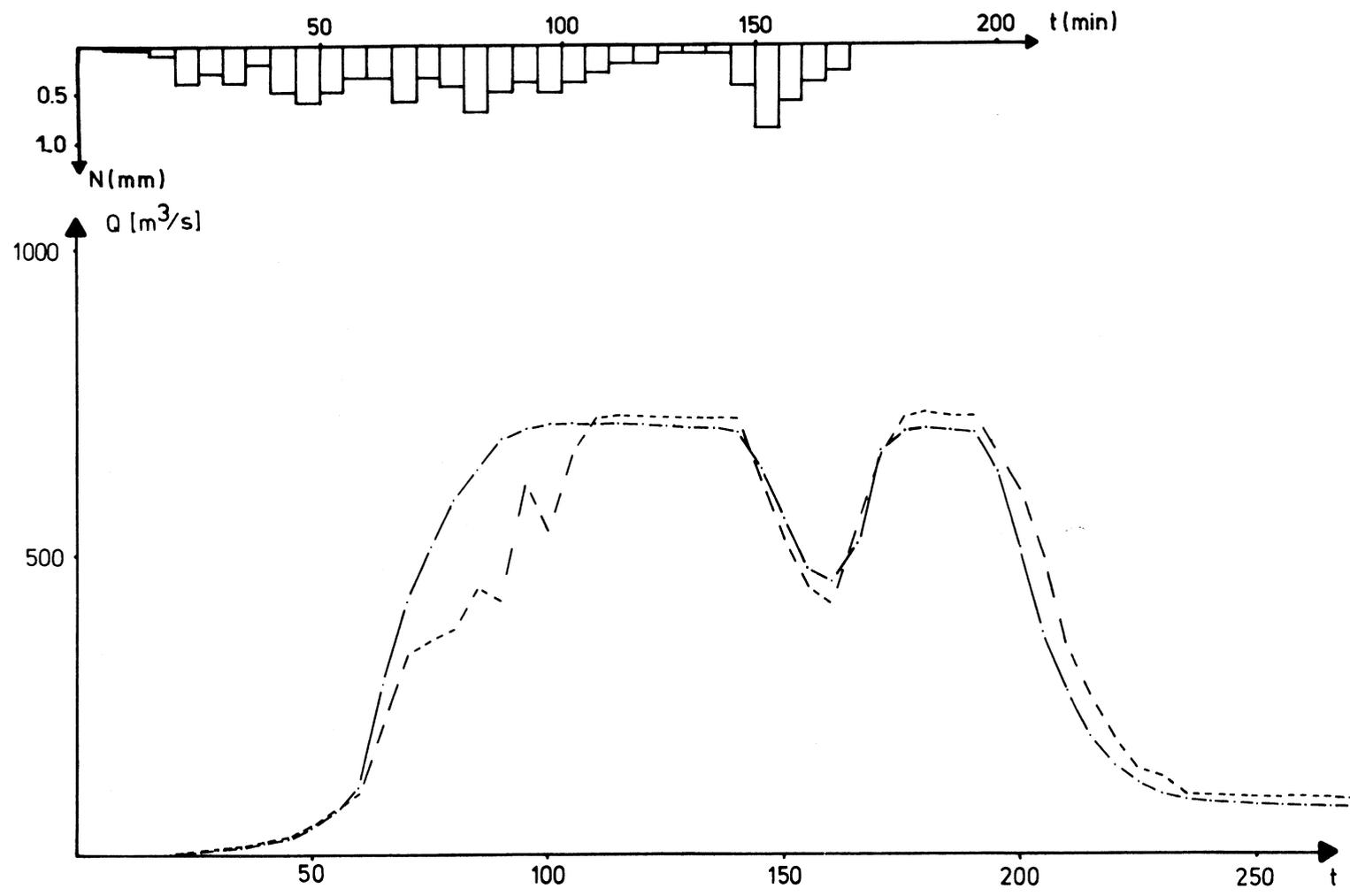


Haltung 592

Ereignis vom 19.08.1981







- - - Abflußwelle mit Steuerung
 - - - Abflußwelle ohne Steuerung

Anhang A

Zustandsformulierung eines Kanalnetzes ausgehend vom K-M-Verfahren

Im folgenden werden die Terme des **Abflußberechnungsmodells**

$$\underline{Q}_{t+1} = A \cdot \underline{Q}_t + B \cdot \underline{u}_t + C \cdot \underline{u}_{t+1}$$

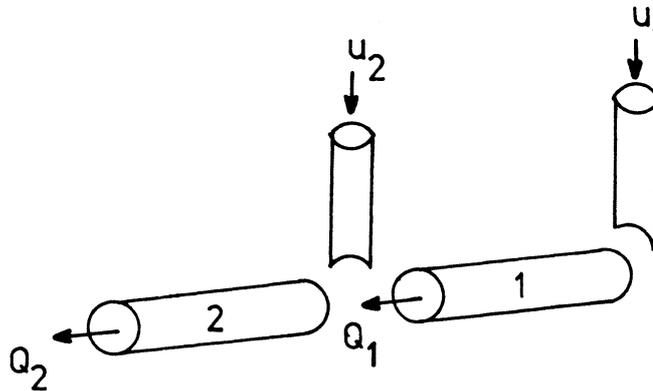
beschrieben. Zur Vereinfachung wird die Annahme getroffen, daß das Kanalnetz aus 2,3 oder n (≥ 5) aufeinanderfolgenden Haltungen oder nur aus einer Vereinigungsstelle zweier Anfangshaltungen besteht.

Ausgangspunkt ist die **Arbeitsgleichung** (4.9)

$$Q_a(t+1) = (1-c) \cdot Q_a(t) + (c-d) \cdot u(t) + d \cdot u(t+1)$$

Zustandsformulierung für 2 Haltungen

$$= (1-c) Q_{a1} + c \cdot u_{a1}$$



$$Q_1(t+1) = (1-c_1) \cdot Q_1(t) + (c_1-d_1) \cdot u_1(t) + d_1 \cdot u_1(t+1) \quad (1)$$

$$Q_2(t+1) = (1-c_2) \cdot Q_2(t) + (c_2-d_2) \cdot [u_2(t) + Q_1(t)] + d_2 \cdot [u_2(t+1) + Q_1(t+1)] \quad (2)$$

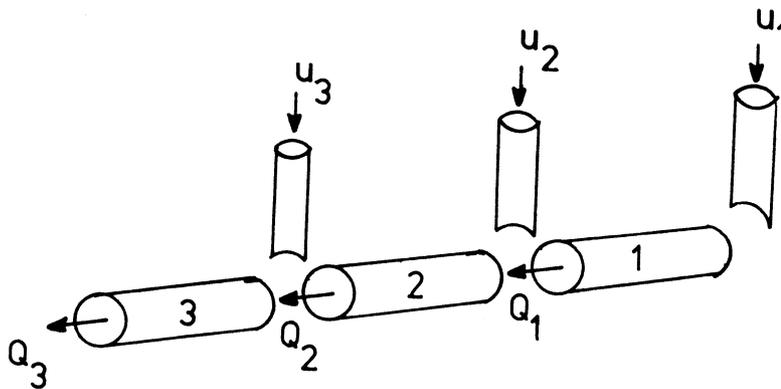
Einsetzen von (1) für $Q_1(t+1)$ in (2) ergibt für (2)

$$\begin{aligned} Q_2(t+1) &= (1-c_2) \cdot Q_2(t) + (c_2-d_2) \cdot Q_1(t) + d_2 \cdot (1-c_1) \cdot Q_1(t) \\ &\quad + (c_2-d_2) \cdot u_2(t) + d_2 \cdot u_2(t+1) + d_2 \cdot (c_1-d_1) \cdot u_1(t) \\ &\quad + d_2 \cdot d_1 \cdot u_1(t+1) \\ &= (1-c_2) \cdot Q_2(t) + ((c_2-d_2) + d_2(1-c_1)) \cdot Q_1(t) \\ &\quad + d_2(c_1-d_1) \cdot u_1(t) + (c_2-d_2) \cdot u_2(t) + d_2 \cdot d_1 \cdot u_1(t+1) \\ &\quad + d_2 \cdot u_2(t+1) \end{aligned} \quad (2')$$

Mit (1) und (2') wird eine Kanalnetzstruktur bestehend aus zwei Haltungen beschrieben durch

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix}_{t+1} = \begin{pmatrix} 1-c_1 & 0 \\ (c_2-d_2) + d_2(1-c_1) & 1-c_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix}_{t+1} + \begin{pmatrix} c_1-d_1 & 0 \\ d_2(c_1-d_1) & c_2-d_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}_t + \begin{pmatrix} d_1 & 0 \\ d_2 d_1 & d_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}_{t+1} \quad (M2)$$

Erweiterung auf 3 Haltungen



Für $Q_1(t+1)$ und $Q_2(t+1)$ gelten (1) und (2) bzw. (2')

$$Q_3(t+1) = (1-c_3) \cdot Q_3(t) + (c_3-d_3) \cdot (u_3(t) + Q_2(t)) + d_3 \cdot (u_3(t+1) + Q_2(t+1)) \quad (3)$$

Nach Einsetzen von (2') in (3) folgt:

$$\begin{aligned} Q_3(t+1) = & (1-c_3) \cdot Q_3(t) + d_3 \cdot (1-c_2) + (c_3-d_3) \cdot Q_2(t) + (d_3 \cdot (c_2-d_3) \\ & + d_2 \cdot (1-c_1)) \cdot Q_1(t) + (c_3-d_3) \cdot u_3(t) + d_3 \cdot (c_2-d_2) \cdot u_2(t) \\ & + d_3 \cdot d_2 \cdot (c_1-d_1) \cdot u_1(t) + d_3 \cdot u_3(t+1) + d_3 \cdot d_2 \cdot u_2(t+1) \\ & + d_3 \cdot d_2 \cdot d_1 \cdot u_1(t+1) \end{aligned} \quad (3')$$

Hieraus folgt für die Modellbeschreibung (M2) die Erweiterung der Vektoren um die Komponenten $Q_3(t+1)$, $Q_3(t)$, $u_3(t)$ und $u_3(t+1)$ und die Erweiterung der Matrizen um eine Zeile bzw. Spalte.

$$A: \begin{pmatrix} 1-c_1 & 0 & 0 \\ (c_2-d_2) + d_2(1-c_2) & 1-c_2 & 0 \\ d_3 \cdot (c_2-d_2) + d_2 \cdot (1-c_1) & (c_3-d_3) + d_3 \cdot (1-c_2) & 1-c_3 \end{pmatrix}$$

$$B: \begin{pmatrix} c_1 - d_1 & 0 & 0 \\ d_2 \cdot (c_1 - d_1) & c_2 - d_1 & 0 \\ d_3 \cdot d_2 \cdot (c_1 - d_1) & d_3 \cdot (c_2 - d_2) & c_2 - d_1 \end{pmatrix}$$

$$C: \begin{pmatrix} d_1 & 0 & 0 \\ d_2 \cdot d_1 & d_2 & 0 \\ d_3 d_2 d_1 & d_3 d_2 & d_3 \end{pmatrix}$$

Aufeinanderfolge von n-Haltungen (n>5):

Aus den obigen Darstellungen ist deutlich, daß die Vektoren der Modellbeschreibung für n-Haltungen aus jeweils n Komponenten bestehen und die 3 Koeffizientenmatrizen untere Dreiecksmatrizen darstellen. Die Matrizen berechnen sich zu

A:

$$\begin{matrix} & 1 & & 2 & & 3 & & \dots & n \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ \vdots \\ n \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 - c_1 & & & & & & & & 0 \\ (c_2 - d_2) + d_2 \cdot (1 - c_1) & 1 - c_2 & & & & & & & 0 \\ d_3 \cdot (c_2 - d_2) + d_2 \cdot (1 - c_1) & (c_3 - d_3) + d_3 \cdot (1 - c_2) & 1 - c_3 & & & & & & 0 \\ \vdots & \vdots \\ d_n \cdot d_{n-1} \cdot \dots \cdot d_3 \cdot [(c_2 - d_2) + d_2 \cdot (1 - c_1)] & d_n \cdot d_{n-1} \cdot \dots \cdot d_4 \cdot [(c_3 - d_3) + d_3 \cdot (1 - c_2)] & d_n \cdot d_{n-1} \cdot \dots \cdot d_5 \cdot [(c_4 - d_4) + d_4 \cdot (1 - c_3)] & \dots & 1 - c_n \end{pmatrix} \end{matrix}$$

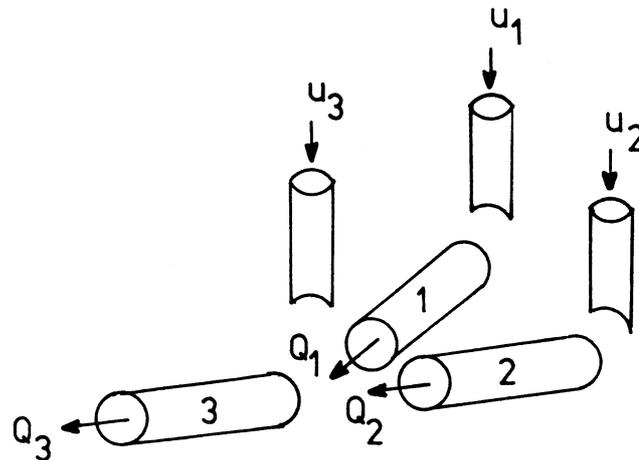
B:

$$\begin{matrix} & 1 & & 2 & & 3 & & \dots & n \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ \vdots \\ n \end{matrix} & \begin{pmatrix} c_1 - d_1 & & & & & & & & 0 \\ d_2 \cdot (c_1 - d_1) & c_2 - d_2 & & & & & & & 0 \\ d_3 \cdot d_2 \cdot (c_1 - d_1) & d_3 \cdot (c_2 - d_2) & c_3 - d_3 & & & & & & 0 \\ \vdots & \vdots \\ d_n \cdot d_{n-1} \cdot \dots \cdot d_3 \cdot d_2 \cdot (c_1 - d_1) & d_n \cdot d_{n-1} \cdot \dots \cdot d_3 \cdot (c_2 - d_2) & d_n \cdot d_{n-1} \cdot \dots \cdot d_4 \cdot (c_3 - d_3) & \dots & c_n - d_n \end{pmatrix} \end{matrix}$$

C:

$$\begin{array}{cccc}
 & 1 & 2 & 3 & \dots & n \\
 1 & d_1 & 0 & 0 & & 0 \\
 2 & d_2 \cdot d_1 & d_2 & 0 & & 0 \\
 3 & d_3 \cdot d_2 \cdot d_1 & d_3 \cdot d_2 & d_3 & & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 n & d_n \cdot d_{n-1} \cdot \dots \cdot d_3 \cdot d_2 \cdot d_1 & d_n \cdot d_{n-1} \cdot \dots \cdot d_3 \cdot d_2 & d_n \cdot d_{n-1} \cdot \dots \cdot d_3 & \dots & d_n
 \end{array}$$

Zustandsformulierungen für die Vereinigung zweier Anfangshaltungen



wie aus der Skizze ersichtlich ist, werden an Vereinigungsstellen mehrere Zuflüsse aus Haltungen (hier Q_1 und Q_2) für die weitere Berechnung summiert. Für Q_1 , Q_2 und Q_3 ergeben sich die folgenden Gleichungen:

$$Q_1(t+1) = (1-c_1) \cdot Q_1(t) + (c_1-d_1) \cdot (u_1(t) + 0) + d_1 \cdot (u_1(t+1) + 0) \quad (4)$$

$$Q_2(t+1) = (1-c_2) \cdot Q_2(t) + (c_2-d_2) \cdot (u_2(t) + 0) + d_2 \cdot (u_2(t+1) + 0) \quad (5)$$

$$Q_3(t+1) = (1-c_3) \cdot Q_3(t) + (c_3-d_2) \cdot (u_3(t) + Q_1(t) + Q_2(t)) + d_3 \cdot (u_3(t+1) + Q_1(t+1) + Q_2(t+1)) \quad (6)$$

Einsetzen von (4) und (5) in (6) ergibt für $Q_3(t+1)$:

$$\begin{aligned}
 Q_3(t+1) = & (1-c_3) \cdot Q_3(t) + [(c_3-d_3) + d_3 \cdot (1-c_2)] \cdot Q_2(t) + [(c_3-d_3) + d_3 \cdot (1-c_1)] \cdot Q_1(t) \\
 & + (c_3-d_3) \cdot u_3(t) + d_3 \cdot (c_2-d_2) \cdot u_2(t) + d_3 \cdot (c_1-d_1) \cdot u_1(t) + d_3 \cdot u_3(t+1) \\
 & + d_3 \cdot d_2 \cdot u_2(t+1) + d_3 \cdot d_1 \cdot u_1(t+1) \qquad (6')
 \end{aligned}$$

Es folgt aus (4), (5), (6') das Modell:

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix}_{t+1} = \begin{pmatrix} 1-c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1-c_2 & 0 \\ c_3-d_3c_1 & c_3-d_3c_2 & 1-c_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix}_t + \begin{pmatrix} c_1-d_1 & 0 & 0 \\ 0 & c_2-d_2 & 0 \\ d_3(d_1-d_1) & d_3(c_2-d_2) & c_3-d_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}_t + \begin{pmatrix} d_1 & 0 & 0 \\ 0 & d_2 & 0 \\ d_3d_1 & d_3d_2 & d_3 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}_{t+1}$$

Wenn der Zufluß in eine Haltung aus zwei zusammentreffenden Rohren stammt, die keine Anfangshaltungen sind, so sind anstelle der Nullen in Gleichung (4) und/oder (5) entsprechend die Zuflüsse Q_i aus den oberhalb liegenden Haltungen einzusetzen und Gleichung (6') wird sich um die entsprechenden Terme erweitern. Es sei noch bemerkt, daß das gesamte KMROUT-Modell aus den zuvor beschriebenen Strukturen - Vereinigungsstellen und/oder Aufeinanderfolge von Haltungen - besteht und die drei benötigten Matrizen die Gestalt unterer Dreiecksmatrizen haben, was für die Programmierung nicht unerhebliche Speicherplatzersparnisse nach sich ziehen kann.

Anhang B

Programme zur Aufbereitung der Datenbank des Kanalisationsnetzes "Linkes Weserufer", Bremen

Ausgehend von dem Programm VORSORT ist eine umfangreiche Neuerstellung der Datenbank vorgenommen worden, da für eine weitere Verwendung der Daten, das folgende Datenformat für jede Haltung /12/ vorliegen muß:

1. Karte

Format	Spalte	Beschreibung
I5	1-5	Haltungsnummer
I5	6-10	Schachtnummer oberhalb
I5	11-15	Schachtnummer unterhalb
F5.0	16-20	Haltungslänge (m)
I1	21	Profiltyp: hieverwendet: 1: Kreis 2: Ei
F4.0	22-25	Rauhigkeitsbeiwert (mm) vorgegeben: 1.5
F5.0	26-30	Profilhöhe
F5.0	31-35	Profilbreite
F5.0	36-40	Querschnittsfläche des Profils Typ 4
F5.0	41-45	Sohlhöhe oben (m)
F5.0	46-50	Sohlhöhe unten (m)
F5.0	51-55	Deckelhöhe oben
F5.0	56-60	Deckelhöhe unten
F5.0	61-65	Konstanter Zufluß Schacht oben
F5.0	66-70	Konstanter Zufluß Schacht unten
	71-80	hier nicht verwendet

2.Karte

Format	Spalte	Beschreibung
	1-5	blank
I5	6-10	Haltungsnummer
F5.0	11-15	Haltungsfläche (ha)
F5.0	16-20	versiegelte Haltungsfläche (ha)
	21-25	nicht berücksichtigt
I5	26-30	Neigungsklasse (Standard 1)
I5	31	C-Wert senkrecht siehe Abschnitt 4.2.1
I1	32	C-Wert waagrecht.
I3	33-35	Regenschreibernummer
	36-80	Standmäßig vorgegebene Parameterwerte, die nicht unbedingt erforderlich sind.

Erstellung der neuen Datenbank

1. VORSORT

- sortiert die Datensätze aus der Bremer Datenbank, entsprechend der 4-stelligen Nummer der Planquadrante, in die das gesamte Netz aufgeteilt ist und schreibt diese für eine bessere weitere Verarbeitung auf vorgegebene Dateien.

Ergebnis:

6 Dateien, wodurch das Kanalnetz "Linkes Weserufer" in 6 Teilgebiete aufgeteilt wird.

2. RAUS

- sucht nur die Datensätze aus den Dateien, die zum Mischwasserkanalnetz "Linkes Weserufer" gehören und erstellt eine neue Haltungsnummerierung für jede Planquadratnummer.

3. KANETZ

- unter Vorgabe einer Schachtnummer wird das gesamte an diesen Schacht angeschlossene Kanalsystem entgegen der Fließrichtung ermittelt, wobei alle möglichen Weiterführungen mit berücksichtigt werden, so daß das Kanalnetz in einer Baumstruktur erstellt wird. Durch dieses Verfahren werden bzw. sind fehlerhafte Kanalverbindungen ersichtlich.

4. EXDAT

- erstellt, unter Vernachlässigung aller nicht mehr weiter benötigten Informationen, Dateien im zuvor beschriebenen Datenbankformat. Außerdem werden die auftretenden Sonderprofile in entsprechende Eiprofile umgewandelt.

Programmlisten

```

PROGRAM VORSORT(INPUT,OUTPUT,BREMEN,DAT1,DAT2,DAT3,DAT4,DAT5,
*           TAPE1=INPUT,TAPE2=OUTPUT,TAPE3=BREMEN,
*           TAPE4=DAT1,TAPE5=DAT2,TAPE6=DAT3,TAPE7=DAT4,
*           TAPE8=DAT5)

DIMENSION NRDAT(8)
INTEGER HALTG,HALTKA,HALTNR,ESY
DATA (NRDAT(I),I=1,8)/8*0/

REWIND 3
REWIND 4
REWIND 5
REWIND 6
REWIND 7
REWIND 8

5 CONTINUE
1000 READ(1,1000) KARTE,(NRDAT(I),I=1,3)
      FORMAT(A4,2X,4(I),1X)
      IF( EOF(1).NE. 0.0 ) GOTO 999
      IF( NEUKA .NE. 1 ) GOTO 10
      NEUKA = 0
      GOTO 15
10 CONTINUE
* READ(3,1010) NR,HALTKA,HALTNR,HALTG,KZKN,KBEB,OHG,S00,S0U,
      HL,KQ,PRBR,PRHO,ESY
1010 FORMAT(1X,A4,2X,A4,A6,A9,A5,2X,I3,3F6.2,F8.2,1X,I2,2F5.2,A5)
      IF( EOF(3) .NE. 0.0 ) GOTO 999
15 CONTINUE
      IF(KARTE .NE. HALTKA) GOTO 30

      DO 20 I=1,3
      IF(NRDAT(I) .EQ. 0) GOTO 20
      IOUT = NRDAT(I)
      NRDAT(IOUT) = NRDAT(IOUT) + 1
      WRITE(IOUT,2000)NRDAT(IOUT),HALTKA,HALTNR,HALTG,KZKN,KBEB,OHG,S00,
*      S0U,HL,KQ,PRBR,PRHO,ESY
2000 FORMAT(I4,2X,A4,A6,A9,A5,2X,I3,3F6.2,F8.2,1X,I2,2F5.2,A5)
20 CONTINUE
      GOTO 10
30 CONTINUE
      NEUKA = 1
      GOTO 5
999 CONTINUE
      REWIND 3
      REWIND 4
      REWIND 5
      REWIND 6
      REWIND 7
      REWIND 8
      END

```

```

PROGRAM RAUS(INPUT,OUTPUT,DAT,DATEN,TAPE1=INPUT,TAPE2=OUTPUT,
*           TAPE3=DAT,TAPE4=DATEN)

DIMENSION IANZ(4),KARTE(4),NRF(4000)
INTEGER HALTKA,HALTNR,ESY,HALTG
DATA (KARTE(J),J=1,4)/4*0/

REWIND 3
REWIND 4

      I = KANR = 0
      READ(1,1000) (KARTE(J),J=1,4)
1000 FORMAT(4(A4,1X))
      IF(EOF(1) .NE. 0.0) GOTO 10
      DO 5 J=1,4
      IF(KARTE(J) .EQ. 0) GOTO 10
5 IANZ(J) = (J-1) * 1000
10 CONTINUE
      READ(3,3000) NR,HALTKA,HALTNR,HALTG,KZKN,KBEB,OHG,S00,S0U,
*      HL,KQ,PRBR,PRHO,ESY
3000 FORMAT(I4,2X,A4,A6,A9,A5,2X,I3,3F6.2,F8.2,1X,I2,2F5.2,A5)
      IF(EOF(3) .NE. 0.0) GOTO 900
      IF(ESY .EQ. 5H SE .OR. ESY .EQ. 5H SD ) GOTO 10
      IF(ESY .EQ. 5H RE .OR. ESY .EQ. 5H RD ) GOTO 10
      DO 12 J=1,4
12 IF(HALTKA .EQ. KARTE(J)) GOTO 20
      I = I + 1
      IF(HALTKA .EQ. KANR) GOTO 14
      WRITE(2,2000) HALTKA,I
2000 FORMAT(/," KARTENNR. ",A4," BEGINN BEI ZEILENNR. ",I4)
      KANR = HALTKA
14 WRITE(4,3000) I,HALTKA,HALTNR,HALTG,KZKN,KBEB,OHG,S00,S0U,
*      HL,KQ,PRBR,PRHO,ESY
      GOTO 10
20 CONTINUE
      IND = IANZ(J) + 1
      NRF(IND) = NR
      IANZ(J) = IND
      GOTO 10
900 CONTINUE
      DO 910 J=1,4
      IF(IANZ(J) .LT.1) GOTO 999
      IEND = IANZ(J)
      REWIND 3
      IND = (J-1) * 1000 + 1
      DO 908 K=IND,IEND
906 READ(3,3000) NR,HALTKA,HALTNR,HALTG,KZKN,KBEB,OHG,S00,S0U,
*      HL,KQ,PRBR,PRHO,ESY
      IF(EOF(3) .NE. 0.0 ) GOTO 910
      IF(NR .NE. NRF(K)) GOTO 906
      I = I + 1
      WRITE(4,3000) I,HALTKA,HALTNR,HALTG,KZKN,KBEB,OHG,S00,S0U,
*      HL,KQ,PRBR,PRHO,ESY
      IF(K .EQ. IEND) WRITE(2,2000) HALTKA,I
908 CONTINUE
910 CONTINUE
999 CONTINUE
      WRITE(2,2010) HALTKA,I
2010 FORMAT(/," KARTENNR. ",A4," ENDET BEI ZEILENNR. ",I4)
      REWIND 3
      REWIND 4

```

```

PROGRAM KANETZ (INPUT,OUTPUT,DATEN,KABAUM,
*          TAPE1=INPUT,TAPE2=OUTPUT,TAPE3=DATEN,TAPE4=KABAUM)
DIMENSION KARTE(15),KAZEI(16),NRFELD(5000),IBAUM(2000),KAFELD(3),
*          (ERW(1000))
INTEGER HALTGO,HALTGU
DATA NULL/0/, (KAFELD(I),I=1,3)/3*0/,KENN/1HU/,NEUN/9999/

REWIND 4

IND = IEBENE = INDEX = 0
READ(1,1000) (KARTE(I),I=1,15)
READ(1,1010) (KAZEI(I),I=1,16)
READ(1,1020) KAHALT,KAWERT
1000 FORMAT(15(A4,1X))
1010 FORMAT(16(I4))
1020 FORMAT(A4,1X,A9)
C
DO 2 I=1,16
IF(KAZEI(I7-1) .EQ. 0) GOTO 2
J = KAZEI(I7-1)
REWIND 3
IER = -2
DO 4 K=1,J
READ(3,3000) NR,HALTGO,HALTGU
IF(EOF(3) .NE. 0,0) GOTO 10
DECODE(9,1040,HALTGO) KAR1,KALT
DECODE(9,1040,HALTGU) KAR2,KALT
IF(KAR1 .NE. KAR2) GOTO 3
NRFELD(K) = 1
GOTO 4
3  NRFELD(K) = 2
IER = IER + 3
IERW(IER) = NR
IERW(IER+1) = HALTGO
IERW(IER+2) = HALTGU
4  CONTINUE
GOTO 10
2  CONTINUE
C
10 CONTINUE
C
C   DATEI NACH HALTUNG DURCHSUCHEN
C
REWIND 3
IEBENE = IEBENE + 1
IANZ = IEND = 0
C
DO 12 I=1,15
IF(KARTE(I) .NE. KAHALT) GOTO 12
IANF = KAZEI(I) - 1
IEND = KAZEI(I+1)
NR = 0
GOTO 20
12 CONTINUE
WRITE(2,2000) KAHALT,KAWERT
2000 FORMAT(/," HALTUNGSENDE, DA KARTE ",A4," FFHLT. ( ",A9," )")

```

```

WRITE(4,4000) NULL,KAWERT
GOTO 90
C
20 CONTINUE
C
C   UEBERLESEN NICHT BENOTIGTER ZEILEN
C
IF(IANF .EQ. 0) GOTO 30
DO 22 I=1,IANF
22 READ(3,3000) NR
C
30 CONTINUE
IF(NR .GE. IEND) GOTO 40
READ(3,3000) NR,HALTGO,HALTGU
3000 FORMAT(I4,2X,A9,1X,A9)
IF(EOF(3) .NE. 0,0) GOTO 900
IF(NRFELD(NR) .EQ. 0) GOTO 30
IF(HALTGO .NE. KAWERT .AND. HALTGU .NE. KAWERT) GOTO 30
C
IF(NRFELD(NR) .NE. 2) NRFELD(NR) = 0
C
IANZ = IANZ + 1
IND = IND + 5
IBAUM(IND-4) = IEBENE
IBAUM(IND-3) = NR
IF(HALTGO .NE. KAWERT) GOTO 35
C
C   OBERE HALTUNG
C
IF(HALTGU .NE. 9H 0. 0) GOTO 32
IBAUM(IND-2) = IHE
GOTO 38
32 IBAUM(IND-2) = IHU
IBAUM(IND-1) = HALTGU
GOTO 38
35 CONTINUE
C
C   UNTERE HALTUNG
C
IBAUM(IND-1) = HALTGO
IBAUM(IND-2) = IHU
38 CONTINUE
IBAUM(IND) = IANZ
IF(NR .LT. IEND) GOTO 30
C
40 CONTINUE
C
C   AUSWERTUNG FINES KNOTENS
C
IF(IANZ .NE. 0) GOTO 60
400 CONTINUE
DO 41 L=1,3
41 IF(KAFELD(L) .GT. 0) GOTO 50
IF(KAFELD(1) .EQ. -1) GOTO 56
DECODE(9,1040,KAWERT) KH,KANR
1040 FORMAT(I4,1X,I1,3X)
KA = MOD(KANR,2)
IF(KA .EQ. 0) GOTO 44
KAFELD(1) = KH - 100
IF(KANR .NE. 1 .AND. KANR .NE. 7) GOTO 50

```

```

KAFELD(2) = KH + 1
KAFELD(3) = KH - 99
GOTO 50
42 KAFELD(2) = KH - 1
KAFELD(3) = KH - 101
GOTO 50
44 KAFELD(1) = KH + 100
IF(KANR .NE. 2 .AND. KANR .NE. 8) GOTO 50
IF(KANR .EQ. 8) GOTO 46
KAFELD(2) = KH + 1
KAFELD(3) = KH + 101
GOTO 50
46 KAFELD(2) = KH - 1
KAFELD(3) = KH + 99
50 CONTINUE
IEBENF = IEBENE - 1
DO 53 L=1,3
IF(KAFELD(L) .NE. 0) GOTO 53
DO 51 K=1,9
ENCODE(4,1050,KAF) KAFELD(L)
1050 FORMAT(14)
IF(KARTE(K) .NE. KAF) GOTO 51
KAHALT = KAF
KAFELD(L) = -1
GOTO 10
51 CONTINUE
KAFELD(L) = -1
53 CONTINUE
56 CONTINUE
DO 57 L=1,3
57 KAFELD(L) = 0
C
C HALTUNGSKENNUNG NICHT GEFUNDEN
C
WRITE(2,2050) NULL,KAWERT
2050 FORMAT(14," HALTUNGSSENDE " ,A9," NICHT GEFUNDEN")
WRITE(4,4000) NULL,KAWERT
IF( INDEX .EQ. 1) GOTO 900
GOTO 90
60 CONTINUE
IF( IBAUM(IND) .LE. 1) GOTO 80
IE = IND - ( IBAUM(IND)-1) * 5
DO 69 L=1,IANZ
IF( IBAUM(IE-2) .EQ. KENN) GOTO 66
WRITE(2,2060) KAWERT, IBAUM(IE-2)
2060 FORMAT(7," HALTUNG " ,A9," IST " ,A2)
IF( IBAUM(IE-2) .EQ. JHE ) GOTO 66
IF( NRFELO( IBAUM(IE-3)) .NE. 2) NRFELO( IBAUM(IE-3)) = 1
IND = IND - 5
IF( L .EQ. IANZ) GOTO 69
I) = IE
IAN = IANZ - 1
DO 63 M=L,IAN
IBAUM(II) = IBAUM(II+5) - 1
DO 61 K=1,4
61 IBAUM(II-K) = IBAUM(II+5-K)
63 II = II + 5
GOTO 62
66 IE = IE + 5
69 CONTINUE

```

```

(F( IND) .LE. 1) GOTO 400
IF( IBAUM(IND) .NE. 1) GOTO 70
WRITE(2,2065) NULL,KAWERT
2065 FORMAT(14," HALTUNG : " ,A9," HAT ZU- U. ABFLUESSE !")
IF( IBAUM(IND) .GT. 0) GOTO 90
WRITE(2,2050) NULL,KAWERT
WRITE(4,4000) NULL,KAWERT
GOTO 90
70 WRITE(2,2070) KAWERT, IBAUM(IND)
2070 FORMAT(7," BEGINN EINER VERZWEIGUNG BEI " ,A9," ANZ.: " ,14)
IO = IBAUM(IND) * 1111
WRITE(4,4000) IO,KAWERT
IF( INDEX .EQ. 1) INDEX = 0
80 CONTINUE
IF( IBAUM(IND-2) .EQ. KENN ) GOTO 90
IENOF = 1
C
C REGULAERES HALTUNGSSENDE
C
IF( IBAUM(IND-2) .EQ. JHE ) GOTO 90
IF( NRFELO( IBAUM(IND-3)) .NE. 2) NRFELO( IBAUM(IND-3)) = -1
WRITE(2,2080) KAWERT
2080 FORMAT(7," SCHACHT " ,A9," ENDE UND ANFANG EINER HALTUNG !")
WRITE(4,4000) NULL,KAWERT
90 CONTINUE
IF( IENDE .EQ. 0) GOTO 100
92 IND = IND - 5
IF( IND ) 900,94,96
94 INDEX = 1
IF( IENDE .EQ. 1) GOTO 900
96 IF( IENDE .EQ. 0) GOTO 10
C
100 CONTINUE
IF( IND .LE. 0 ) GOTO 900
DECODE(9,1060, IBAUM(IND-1))KAHALT,KALT
1060 FORMAT(A4,A5)
IEBENE = IBAUM(IND-4)
KAWERT = IBAUM(IND-1)
WRITE(4,4000) IBAUM(IND-3), IBAUM(IND-1), IBAUM(IND-2), IBAUM(IND-4)
4000 FORMAT(14,2X,A9,2X,A1,2(2X,I4))
WRITE(2,4000) IBAUM(IND-3), IBAUM(IND-1), IBAUM(IND-2),
* IBAUM(IND-4), IND
IF( NRFELO( IBAUM(IND-3)) .NE. 2) GOTO 110
NRFELO( IBAUM(IND-3)) = 0
DO 103 L=1,IER,3
103 IF( IBAUM(IND-3) .EQ. IERW(L)) IERW(L) = 0
110 CONTINUE
DO 111 L=1,3
111 KAFLD(L) = 0
IF( IENDE .EQ. 1) IENDE = 0
GOTO 92
900 CONTINUE
DO 904 I=1,IER,3
REW(ND 4)
IF( IERW(I) .EQ. 0) GOTO 904
902 READ(4,4000) IZEILE,KAWERT,KH,IEBENE
IF( FOF(4) .NE. 0.0) GOTO 904
IF( KAWERT .NE. IERW(I+2)) GOTO 902
DECODE(9,1060, IERW(I+1)) KAHALT,KALT
903 READ(4,4000) IO

```

```

IF(EOF(4) .EQ. 0.0) GOTO 903
BACKSPACE 4
WRITE(2,2090) NULL,IZEILE,KAWERT,IERW(I)
2090 FORMAT(2(I4)," WEITERFUEHRUNG DER HALTUNG : ",A9," ZEILE ",I4)
WRITE(4,4000) NEUN,KAWERT,KH,IZEILE,IERW(I)
IERW(I) = 0
INDEX = 0
GOTO 10
904 CONTINUE
IF = 12
IA = 1
905 WRITE(2,2095) (IERW(I),I=IA,IE)
2095 FORMAT(4(I4,2(A9)))
IF(IE .GE. 1FK) GOTO 906
IA = IE + 1
IE = 1E + 12
GOTO 905
906 K = 1
WRITE(2,2100)
2100 FORMAT(/," KANALNETZ ABGEARBEITET ! FOLGENDE ZEILEN WURDEN NICHT
*BERUECKSICHTIGT :")
DO 910 I=1,J
IF(NRFELD(I) .EQ. 0 ) GOTO 910
KAZEL(K) = I
IF(K .LT. 10 .AND. I .NE. J) GOTO 907
IO = K
WRITE(2,2110) (KAZEL(K),K=1,IO)
2110 FORMAT(/,10(1X,I4))
K = 1
GOTO 910
907 K = K + 1
910 CONTINUE
REWIND 3
REWIND 4
END

```

```

PROGRAM EXDAT(INPUT,OUTPUT,KABAUM,DATEN,EXDAT,TAPE1=INPUT,
* TAPE2=OUTPUT,TAPE3=KABAUM,TAPE4=DATEN,TAPE5=EXDAT)

DIMENSION IERW(50),NRW(50),LZEI(50),L7(50),DECKEL(200),KARTE(25),
* INDEX(25),IVERZW(50),FAKTOR(7)

INTEGER PROTYP,PROFIL(7)

DATA (KARTE(I),I=1,25)/8284,8384,8484,8383,8483,8583,8482,8582,
*8682,8782,8581,8681,8781,8480,8580,8680,8780,8880,8779,8879,
*8778,8878,8978,8777,8877/

DATA (INDEX(I),I=1,25)/2,5,8,11,18,22,26,30,34,38,42,46,50,54,
*58,62,66,70,74,78,81,84,87,14,89/

DATA (IVERZW(I),I=1,50)/50*0/

DATA (PROFIL(I),I=1,7)/20,23,24,26,94,95,98/

DATA (FAKTOR(I),I=1,7)/.512,.597,.647,.604,.868,1.386,.696/

PI = 4 * ATAN(1.0)

EINLESEN 1.DECKELHOEHE UNTEN + 10.0

READ(1,1000) HGU
1000 FORMAT(F5.0)
HGU = HGU + 10.0

KENNZEICHNUNG DER ERWEITERUNGEN AUF DATEI KABAUM

IND = IZNR = IERW = J = IE = 0
REWIND 5
REWIND 3
10 READ(3,3000) NR,IZFILE,IZNR
3000 FORMAT(I4,14X,2(2X,I4))
IF(EOF(3) .NE. 0.0) GOTO 20
IF(NR .NE. 9999) GOTO 10

IND = IND + 1
IERW(IND) = IZFILE
NRW(IND) = IZNR
READ(3,3000) NR,IZNR
IANZ = MOD(NR,1111)
IF(IANZ .GT. 0 .OR. IZNR .GT. 0) GOTO 10
READ(3,3000) NR
NRW(IND) = NR
IVERZW(IND) = I
GOTO 10

20 CONTINUE
DO 21 I=1,IND
21 WRITE(2,1020) IERW(I),NRW(I),IVERZW(I)
1020 FORMAT(3(2X,I4))
REWIND 3

IZFILE = IT = 1
30 READ(3,3000) NR,IZNR
IF(EOF(3) .NE. 0.0) GOTO 900
IF(NR .NE. 0) GOTO 32
IT = IT + 1
HGU = DECKEL(IT)
GOTO 30

32 IF(NR .EQ. 9999) GOTO 900

```

```

C
C 7ZEILENNR. VIELFACHES VON 1111
C
C IF(IANZ .GT. 0 .OR. IZNR .GT. 0) GOTO 50
C
C HALTUNGSVERZWEIGUNG
C
C IANZ = I1 - 2 + (NR/1111)
DO 33 I=1,IANZ
DECKEL(I) = HGU
I1 = IANZ + 1
GOTO 30
33 CONTINUE

C
C UFREKLESEN NICHT BENOETIGTER ZEILEN
C
C IF(NR .NE. IZEILE-1) GOTO 55
BACKSPACE 4
BACKSPACE 4
GOTO 60
55 CONTINUE
IF(NR .GT. IZEILE) GOTO 60
REWIND 4
IEND = NR - 1
IF(IEND .EQ. 0) GOTO 60
DO 57 I=1,IEND
57 READ(4,3000) IZEILE
60 CONTINUE

C
C EINLESEN DER KANALDATEN
C
C K1 = K2 = KE = 0
READ(4,4000) IZFILE,KAR1,K10,K20,K30,KAR2,K1U,K2U,K3U,HGU,H50,H5U
* HL,KQ,FRBR,FRHO
4000 FORMAT(I4,1X,2(1X,I4,1X,I1,I1,I2),11X,3(F5.2,1X),1X,F6.2,1X,I2,
* 2F5.2)
IF(EOF(4) .NE. 0.0) GOTO 999
IF(IZEILE .NE. NR) GOTO 60
IF(KAR1 .NE. KAR2) GOTO 90
DO 93 K = 1,25
IF(KARTE(K) .NE. KAR1) GOTO 93
IN1 = IN2 = INDEX(K)
GOTO 100
93 CONTINUE
DO 97 K = 1,25
IF(KARTE(K) .NE. KAR1) GOTO 95
IN1 = INDEX(K)
IF(K2 .EQ. 1) GOTO 100
K1 = 1
95 IF(KARTE(K) .NE. KAR2) GOTO 97
IN2 = INDEX(K)
IF(K1 .EQ. 1) GOTO 100
K2 = J
97 CONTINUE
100 CONTINUE
IN1 = IN1 * 10 + K10
IN2 = IN2 * 10 + K1U
K1 = K20
K2 = IN1

```

```

      K3 = K10
110  CONTINUE
      IF(K1 .EQ. 3) GOTO 120
      K2 = K2 - K1 - 2*K3
120  CONTINUE
      IF(K2 .EQ. 1) GOTO 130
      IOBEN = K2 * 100 + K30
      K1 = K20
      K2 = IN2
      K3 = K10
      KE = 1
      GOTO 110
130  IUNTEN = K2 * 100 + K30
C
C      HOEHENLAGE VERAENDERN
C
      HSO = HSO + 10.
      HSU = HSO + 10.
      HGO = HGO + 10.
C
C      PROFILTYPE BESTIMMEN
C
      IF(K9 .EQ. 10) GOTO 64
C
C      PROFILE - UMRECHNUNG AUF KREISPROFIL
C
      DO 62 I=1,7
      IF(K9 .NE. PROFIL(I)) GOTO 62
      RADK = PRHO * SQRT(FAKTOR(I) / PI)
      PRBR = PRHO - 2 * RADK
62   CONTINUE
      WRITE(2,2000) IZEILE
2000  FORMAT(2X,I4," HALTUNGSDATEN NICHT VOLLSTAENDIG !")
64   PROTYP = 1
      IF(HL .LT. 100.) GOTO 72
      WRITE(5,5010) IZEILE,IOBEN,IUNTEN,HL,PROTYP,PRHO,
*      PRBR,HSO,HSU,HGO,HGU
5010  FORMAT(3(I5),F5.1,I1," 1.0",2(F5.2),5X,4F5.2)
      GOTO 74
72   WRITE(5,5000) IZEILE,IOBEN,IUNTEN,HL,PROTYP,PRHO,
*      PRBR,HSO,HSU,HGO,HGU
5000  FORMAT(3(I5),F5.2,I1," 1.0",2(F5.2),5X,4F5.2)
74   HGU = HGO
      WRITE(5,5020) IZEILE
5020  FORMAT(5X,I5,15X," 132")
C
C      ERWEITERUNGSZEILEN ARBEITEN
C
      IF(LERW .EQ. -1) GOTO 30
      DO 85 I=1,IND
      IF(NRW(I) .EQ. 0) GOTO 85
      IF(IZEILE .NE. IERW(I)) GOTO 85
      LZFILE = NR
      IF(IF .EQ. 0) GOTO 80
      IF(NRW(IE) .EQ. 0) GOTO 80
      J = J + 1
      LZFI(J) = IERW(IE)
      LZ(J) = IF
80   IE = I

```

```

      DECKEL(II) = HGU
      JI = JJ + 1
82   READ(3,3000) NR
      IF(EOF(3) .NE. 0.0) GOTO 900
      IF(NRW(I) .NE. NR) GOTO 82
      IF(1VERZW(I) .EQ. 0) GOTO 50
      BACKSPACE 3
      BACKSPACE 3
      GOTO 30
85   CONTINUE
      GOTO 30
900  CONTINUE
      IF(NRW(IE) .NE. 0) GOTO 902
      IF(LERW .EQ. -1 .OR. J .LE. 0) GOTO 999
      LZFILE = LZFI(J)
      IE = LZ(J)
      J = J - 1
      IF(J .NE. 0) GOTO 902
      DO 901 I=1,IND
      IF(NRW(I) .NE. 0) GOTO 902
901  CONTINUE
      LERW = -1
902  CONTINUE
      REWIND 3
903  READ(3,3000) NR
      IF(NR .NE. LZFILE) GOTO 903
      NRW(IE) = 0
      GOTO 30
999  CONTINUE
      REWIND 4
      REWIND 3
      REWIND 5
      END

```

21.54.43. END OF PRINTING, RBB/GI. 22/10/84 (000000B PAGES)

Programme für Abflußsimulation

KMROUT

Programmbeschreibung:

Zweck: Berechnung des Abflußprozesses für jede Haltung eines Kanalnetzes nach dem Kalinin-Miljukov-Verfahren

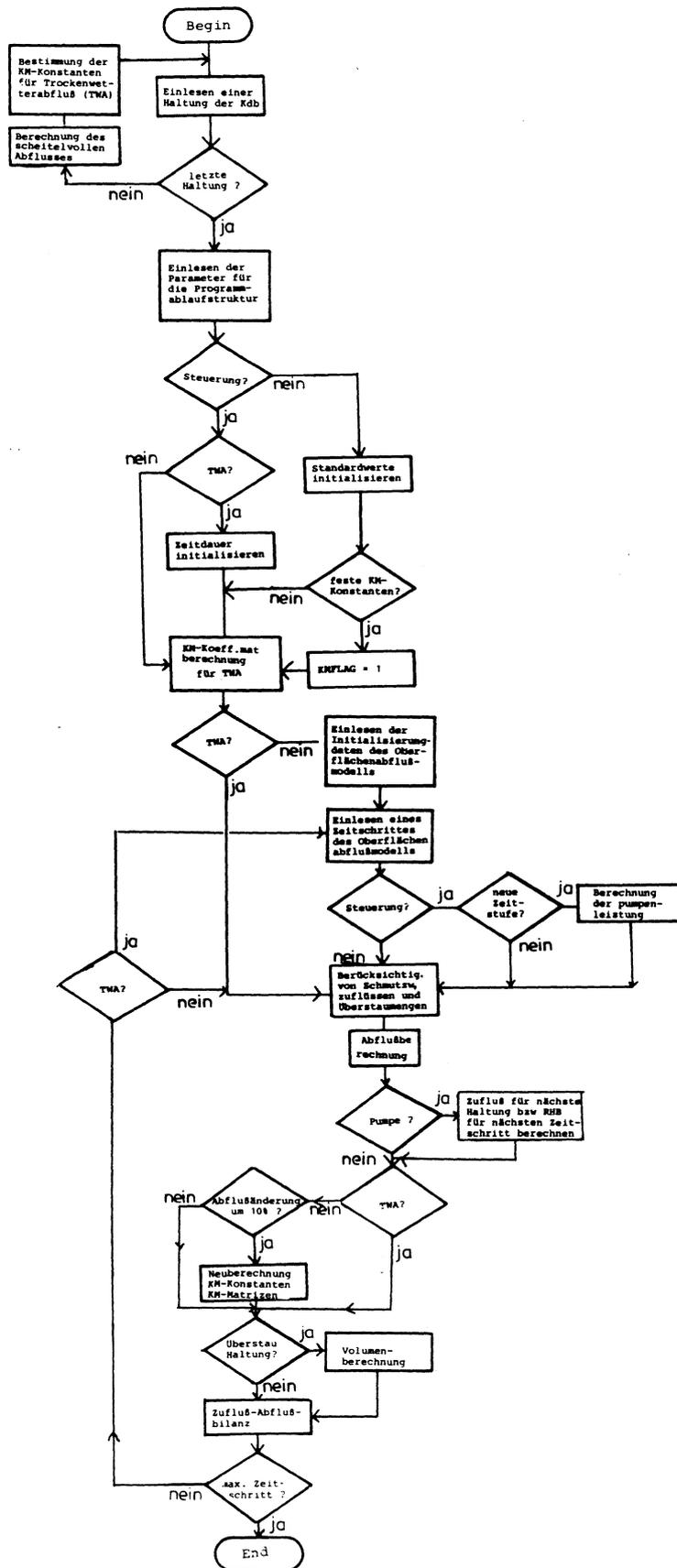
Benötigte Unterprogramme: KMMATR, HYS9, ZUFLUSS, KMCONS, KMAT

Möglichkeiten der Anwendung:

- 1 - nur Trockenwetterberechnung ohne Steuerung der Pumpen
(ITROCK = 1)
- 2 - Abflußberechnung mit festen KM-Konstanten (KMFLAG = 1)
- 3 - Abflußberechnung mit variablen KM-Konstanten ohne Steuerung
- 4 - wie 3 und zusätzliche Berechnung von Steuerungseingriffen

Standardversion ist 4

Programmablaufplan:



```
PROGRAM KMROUT(INPUT,OUTPUT,KANETZ,ABFLUS,HYSTEM,
* TAPE1=INPUT,TAPE2=OUTPUT,TAPE10=KANETZ,
* TAPE30=ABFLUS,TAPE40=HYSTEM)
```

```
C *****
C ***** KMROUT IST EIN PROGRAMM FUER DAS KALININ-MILJUKOV-AB- *****
C ***** FLUSSMODELL. *****
C ***** FRSTFELT: JUNI 1984 BZW. OKT. 1984 *****
C *****
```

```
DIMENSION QNEU(135),QT(135),IPROZ(135),IPROZN(135),
* QSTAU(135),QTR(135),VHALT(135),PUMP(6),PFELD(6),
* LDRUCK(20),IDRUCK(20),QFELD(18225),UFELD(18225),
* PKFELD(6),PKMAT(6)
```

```
INTJGFR HALTUNG,SCHACHT,CMAT(270)
```

```
REAL KMCON1,KMCON2,LAE,NW,NW2,JS,KB
```

```
COMMON /KANETZ/ HALTUNG(135),IOBEN(135),IUNTEN(135),LAE(135),
* ITYP(135),NW(135),EXZUFL(135),QVOLL(135)
COMMON /INDEX/ IZMAX,IZU1(135),IZU(135,2),LETZTER,SCHACHT(135),
* MDLTA,LDLTA,IDLTA,MINZ,MAXZ
COMMON /KMFAR/ DELTAT,RCONS(135),KMCON1(135),KMCON2(135),
* QMAT(135,135),UMAT(135,135)
COMMON /FLUSS/ UZUFL(135),UZUFLN(135)
```

```
EQUIVALENCE (QMAT(1,1),QFELD(1)),(UMAT(1,1),UFELD(1)),
* (IZU(1,1),CMAT(1)),
* (QUERER,HYRAD),(VUEBER,GESCHW),(JS,HALT),
* (WU,UALT),(BR1,UNEU)
```

```
C LEVEL 2,HALTUNG,IOBEN,IUNTEN,ITYP,EXZUFL,QVOLL,NW,LAE
C LEVEL 2, /KANETZ/, /KMFAR/
C LEVEL 2,QMAT,QFELD,UFELD,UMAT,KMCON1,KMCON2,RCONS,DELTAT
```

```
C ***** DATA *****
```

```
C ***** FESTSETZUNG DER AUSZUDRUCKENDEN HAL- *
C ***** TUNGS-R-WERTE *
C *****
```

```
DATA (LDRUCK(I),I=1,20)/2,7,14,18,19,21,26,40,65,80,85,88,89,
* 105,106,107,114,122,126,127/
```

```
DATA (IDRUCK(I),I=1,20)/435,148,592,152,478,562,457,298,893,1969,
* 2020,636,1970,136,96,420,557,454,514,421/
```

```
DATA (QNEU(I),I=1,135)/135 * 0./
DATA (QT(I),I=1,135)/135 * 0./
DATA (VHALT(I),I=1,135)/135 * 0./
DATA (UZUFL(I),I=1,135)/135 * 0./
DATA (UZUFLN(I),I=1,135)/135 * 0./
DATA (IZU(I),I=1,135)/135 * 0/
DATA (SCHACHT(I),I=1,135)/135 * 0/
DATA IDLTA/0,IZMAX/0,KMFLAG/0/
DATA MINZ/135,MAXZ/0,ITROCK/0,ABLAUF/0./
DATA (PKFELD(I),I=1,6)/6*0./,VPUMP/0./,VRHB/0./,ZULAUF/0./
```

```
DATA GE/78.4532/,ZAEHW/.0000032881/,DELTAT/1./
```

```
C ***** EINZELPUMPENLEISTUNG *****
```

```
DATA (PFELD(I),I=1,6)/.115,.350,.350,.600,1.530,1.53/
DATA (PKMAT(I),I=1,6)/.51,1.403,1.403,2.57,6.174,6.174/
DATA RHBMAX/10000./
```

```
OPEN(20,ACCESS='DIRECT',FORM='UNFORMATTED',RECL=126,FILE='GAIN')
REWIND 10
```

```
DO 3 I=1,18225
QFELD(I) = 0.0
3 UFELD(I) = 0.0
```

```
DO 5 I=1,270
5 CMAT(I) = 0
```

```
WRITE(2,2000)
2000 FORMAT(1H1,/" ***** BERECHNUNG DER KALININ-MILJUKOV-KONSTANTEN FU
*R TROCKENWETTERABFLUSS *****",
*// " HALTUNG SCHACHTNR. NW JS LAENGE (VOLL RETCON )T
* KMCON1 KMCON2 EXZUFL PTYP %(Q)",//)
```

```
I = 0
```

```
10 CONTINUE
C *****
C KANALNETZDATEN EINLESEN U. KM-KONSTANTEN-BERECHNUNG FUER *****
C TROCKENWETTERABFLUSS FUER JEDE HALTUNG *****
C *****
```

```
I = I + 1
READ(10,1000,END=100)HALTUNG(I),IOBEN(I),IUNTEN(I),LAE(I),ITYP(I),
* KB,NW(I),FLAECH,SOU,SOU,EXZUFL(I),HTR,QTR(I)
```

```
C *****
C READ(10,1000,END=100) NKART *****
C *****
C *****
```

```
1000 FORMAT(3I5,F5.0,I1,F4.0,F5.0,5X,3F5.0,10X,F5.0,5X,2F5.0)
IF(HALTUNG(I).EQ.9999)GOTO 100
```

```
C *****
C ***** BERECHNUNG DES SCHEITELVOLLEN ABFLUSSES *****
C *****
```

```
NW2 = NW(I) * NW(I)
JS = (SOU - SOU) / LAE(I)
KB = KB / 1000.
```

```
IF(ITYP(I).EQ.1.OR.ITYP(I).EQ.9)HYRAD = .25 * NW(I)
IF(ITYP(I).EQ.4)HYRAD = .193 * NW(I)
```

```
WU = SQRT(GE * HYRAD * JS)
BR1 = ZAEHW / (4 * HYRAD * WU)
BR2 = KR / (14.84 * HYRAD)
```

```
GESCHW = -2. * ALOG10(BR1 + BR2) * WU
IF(ITYP(I).NE.4)FLAECH = .785 * NW2
QVOLL(I) = FLAECH * GESCHW
```

```

C      **** BESTIMMUNG DER GRENZWERTE F. UEBERSTAU (10 % UEBER QVOLL) ***
      QSTAU(I) = QVOLL(I) + (QVOLL(I) / 10.)

C      *****
C      **** BESTIMMUNG DER RETENSIONSKONSTANTE F. TROCKENWETTERABFLUSS **
C      *****
      IF(ITYP(I) .EQ. 1 .OR. ITYP(I) .EQ. 9) GOTO 18

C      ***** EIPROFIL *****
      WBREIT = 2 * (NW(I) / 3)
      IF(WBREIT .GE. HTR) GOTO 15
      HTR = NW(I) - HTR
      GOTO 20
15     WBREIT = SQRT(NW2 - (WBREIT - HTR)**2) - WBREIT
      GOTO 30

C      ***** KREISPROFIL *****
18     WBREIT = NW(I)
20     WBREIT = 2 * SQRT( HTR * WBREIT - HTR**2)
30     RCONS(I) = (LAE(I) * WBREIT * (HTR / QTR(I)) ) / 60.

C      **** PROZENTUALER ANTEIL DES TROCKENW.-ABFLUSSES
C      ****
      IPROZ(I) = (FIX( ( (100 * QTR(I) / QVOLL(I)) + 5. ) / 10)

C      **** ZEIT ) DELTA T ****
C      ****
      IF(RCONS(I) .LT. DELTAT) GOTO 40
      IDELTA = "JA"
      GOTO 50
40     CONTINUE
      IDELTA = "NEIN"
50     CONTINUE

C      **** KALININ-MILJUKOV-KONSTANTEN ****
C      ****
      KMCON1(I) = 1 - EXP( -DELTAT / RCONS(I))
      KMCON2(I) = 1 - (RCONS(I) / DELTAT ) * KMCON1(I)

      WRITE(2,2010) HALTUNG(I),IOBEN(I),IUNTEN(I),NW(I),JS,LAE(I),
*      QVOLL(I),RCONS(I),IDELTA,KMCON1(I),KMCON2(I),
*      FXZUFL(I),ITYP(I),IPROZ(I)
2010  FORMAT(4X,I5,1X,I5,1X,F6.2,F6.4,3X,F6.1,2F8.3,1X,A4,1X,
*F6.4,2X,2(F6.4,3X),J1,4X,I3)
      GOTO 10
100    CONTINUE

      IZMAX = I - 1

C      *****
C      EINLESEN DER PARAMETER ZUM ABLAUF DES PROGRAMMES *****
C      *****
      READ(1,1100,END=110) ISTUFE, IDELTA, IDT, ITROCK, MDELTA, MINZ, MAXZ
1100  FORMAT(7I3)

```

```

      IF(ISTUFE .EQ. 999) GOTO 115
      IF(ITROCK .EQ. 0) GOTO 140
      LDELTA = MDELTA
      GOTO 140

110   CONTINUE
C      ***** STANDARDWERTE *****
      ISTUFE = 5
115   ITROCK = 0
      (F(IDELTA .EQ. 999) KMFLAG = 1
      IDELTA = 1
      MDELTA = LDELTA = 120
      IDT = 5
      MINZ = 1
      MAXZ = IZMAX

140   CONTINUE
      DELTAT = IDELTA * 60.
      IF(ISTUFE .EQ. 999) GOTO 145

      READ(20,REC=1) MSTUFF,IPF,IPZ
      IS = MSTUFF + 1
      IN1 = 0

145   CONTINUE

C      *****
C      KM-MATRIZENBERECHNUNG FUER TROCKENWETTERABFLUSS *****
C      *****

      CALL KMATR

150   CONTINUE
      IF(ITROCK .EQ. 1) GOTO 190

C      *****
C      EINLESEN DER ERSTEN NEUN ZEILEN DER DATEI "HYSTEM" *****
C      EINLESEN DER SCHAECHTE U. IHRE ANZAHL (LETZTER) *****
C      EINLESEN DES ZEITINTERVALL (MDELTA) *****
C      *****

      CALL HYS9

190   CONTINUE

      WRITE(2,2030) MINZ,MAXZ,MDELTA,IDELTA,MSTUFE
2030  FORMAT(" ***** ABFLUSSGEBIET LIEGT IM BEREICH ",I3," BIS ",I3,
* " ***** DAS ERIGNIS UMFASST ",I3," ZEITSCHRITTE A ",I2," MIN
*/" ***** STEUERENGRIFFE FUER ",I3," STUFEN A 5 MIN")

200   WRITE(30,2100) (IDRUCK(I),I=1,20)
      CONTINUE
      IF(ITROCK .EQ. 1) GOTO 300

C      *****
C      EINLESEN EINES ZEITSCHRITTE DES OBERFLAECHEABFLUSSES *****
C      ***** UZUFL - FELD FUER ZEITSCHRITT T *****
C      ***** UZUFLN- FELD FUER ZEITSCHRITT T+1 *****
C      *****

      CALL ZUFLUSS

```

```

300 CONTINUE
C *****
C BERECHNUNG DES ABFLUSSES F. ZEITPKT. T+1 *****
C UEBER DAS GESAMTE KANALNETZ *****
C *****

ITIME = MDELTA - LDELTA
IF(ISTUFE .EQ. 999) GOTO 310

C *****
C EINLESEN UND BERECHNUNG DER NEUEN REGELUNGSSTRATEGIE ANHAND *****
C DER "GAIN"-MATRIX FUER DIE SONDERBAUWERKE (PUMPEN) FUER DIE *****
C NAECHSTE ZEITSTUFE (ISTUFE) *****
C *****

IF(ITIME .EQ. 0) GOTO 302
IN1 = MOD(ITIME,ISTUFE)
IF(IN1 .NE. 0) GOTO 310
INI = ITIME / ISTUFE
IS = MSTUFE + 1 - IN1

302 CONTINUE
READ(20,REC=15) (QFELD(18089+I),I=1,126)

IF(ITIME .NE. 0) GOTO 303
DO 333 I=1,IPZ
PUMP(I) = 0.0
DO 334 J=1,18
PUMP(I) = PUMP(I) + QFELD(18089 + (J-1)*IPZ + I) * QTR(J)
334 WRITE(2,7777) QFELD(18089 + (J-1)*IPZ + I),QTR(J)
7777 FORMAT("...",2(F30.15,2X))
PUMP(I) = PUMP(I) + QFELD(18089 + 20*IPZ + I) * QTR(19)
333 WRITE(2,7777) QFELD(18089 + 20*IPZ + I),QTR(19)
GOTO 336

C ***** BERECHNUNG DER NEUEN PUMPENKONSTELLATION *****

303 CONTINUE
DO 305 I=1,IPZ
PUMP(I) = 0.0
DO 304 J=1,18
304 PUMP(I) = PUMP(I) + QFELD(18089 + (J-1)*IPZ + I) * QT(J)
PUMP(I) = PUMP(I) + (QFELD(18089 + 18*IPZ + I) * VPUMP) / DELTAT
PUMP(I) = PUMP(I) + (QFELD(18089 + 19*IPZ + I) * VRHB) / DELTAT
PUMP(I) = PUMP(I) + QFELD(18089 + 20*IPZ + I) * QT(19)

C ***** QUADRIERUNG DER PUMPENKONSTELLATION FUER KOSTENFKT.

PKFELD(I) = PUMP(I)**2 + PKFELD(I)
305 CONTINUE
C ***** BERECHNUNG DER GESAMTPUMPENFOERDERLEISTUNG *****
33A PLEIST = 0.0
C DO 306 I=1,IPZ
DO 306 J=1,IPZ
PLEIST = PLEIST + PUMP(J)
IF(J .NE. 3) GOTO 306
IF(PLEIST .GT. .700) PLEIST = .700
PTWA = PLEIST
306 CONTINUE

```

```

2040 WRITE(2,2040) IN1,ITIME,(PUMP(I),I=1,6),IPZ,IPS,PLEIST,PTWA
FORMAT(/" ***** PUMPENVEKTOR FUER STUFE ",I3," AB TSTEP ",I3,
* " LAUTET : ",/,6(2X,F10.8)," MIT MATRIX (" ,I2," ,",I2," )"/
* " ***** PUMPENLEISTUNG BETRAEGT : ",F9.4," CUM/S MIT ",
* F6.4," CUM/S TWA-ANTEIL")

310 CONTINUE

DO 400 IZ=MINZ,MAXZ
IS = IZU1(IZ)
IF(IS .EQ. IZ) GOTO 330
320 CONTINUE

IF(IS .EQ. IZUJ(JS)) GOTO 330
IS = IZU1(IS)
GOTO 320
330 CONTINUE

C *****
C ADDIFREN VON EXTERNEN ZUFLUESSEN Z. OBERFLAECHEANFLUSS *****
C U. BERUECKSICHTIGUNG FVTL. ABFLIESSENDER UEBERSTAUENGEN AUS *****
C OBERHALBLIEGENDEN HALTUNGEN *****
C *****

IF(EXZUFL(IZ) .EQ. 0.) GOTO 335
C ***** EXTERNER ZUFLUSS FUER IDFLTA IN M3/S
UZUFLN(IZ) = UZUFLN(IZ) + EXZUFL(IZ)
335 CONTINUE

C ***** ABBAU DES UEBERLAUFS, FALLS VORHANDEN

IF(IZU1(IZ) .EQ. IZ) GOTO 350
J = IZUJ(IZ)
GOTO 340
337 IF(I .EQ. IZU(IZ,2)) GOTO 350
IF(I .NE. IZU1(IZ)) GOTO 339
IF(IZU(IZ,1) .EQ. 0) GOTO 350
I = IZU(IZ,1)
GOTO 340
339 IF(IZU(IZ,2) .EQ. 0) GOTO 350
I = IZU(IZ,2)
340 IF(VHALT(I) .LE. 0. .OR. QT(I) .EQ. QSTAU(I)) GOTO 337
QUEBER = (QSTAU(I) - QT(I))
VUEBER = QUEBER * DELTAT
IF(VUEBER .LT. VHALT(I)) GOTO 343
UZUFLN(IZ) = UZUFLN(IZ) + VHALT(I) / (DELTAT)
VHALT(I) = 0.
GOTO 337
343 VHALT(I) = VHALT(I) - VUEBER
UZUFLN(IZ) = UZUFLN(IZ) + QUEBER
WRITE(2,2060) HALTUNG(IZ),HALTUNG(I),UZUFLN(IZ),QUEBER,VHALT(I),
* QT(I)
2060 FORMAT(" ***** RUECKLAUF IN HALTUNG ",I5," VON HALTUNG ",I5,
* " MIT : ",2X,F9.4,3(2X,F12.4))
GOTO 337

350 CONTINUE

```

```

GALT = UALT = UNEU = 0
(IZ = IZMAX - IZ + 1)
DO 355 ISP=IS,I7
ISP1 = IZMAX - ISP + 2
QALT = QMAT(IZ,ISP) * QT(ISP) + GALT
UALT = UMAT(IZ,ISP) * UZUFL(ISP) + UALT
UNEU = UMAT(IZ1,ISP1) * UZUFLN(ISP) + UNEU
355 CONTINUE

C ***** ZUFLUSSVOLUMENBILANZ

IF(IZ .EQ. 1) GOTO 357
IF(ITYP(I7-1) .EQ. 9) ZULAUF = ZULAUF - DELTAT * EXZUFL(IZ)
357 ZULAUF = ZULAUF + DELTAT * UZUFLN(I7)

L ***** ABFLUSS FUER T+1
QNEU(I7) = GALT + UALT + UNEU
IF(QNEU(I7) .GT. 0.) GOTO 360
IPROZN(I7) = IPROZ(I7)
IF(ITYP(I7) .EQ. 9) GOTO 370
GOTO 400
360 IPROZN(I7) = IF(X((100 * QNEU(I7) / QVOLL(I7)) + 5.) / 10)
IF(ITYP(I7) .NE. 9) GOTO 400

370 CONTINUE

C ***** SONDERBAUWERKBERECHNUNG / PUMPENSUMPF U. RHB

QUEBER = QT(I4) + QT(I8)

IF(ISTUFE .NE. 999) GOTO 373
IF(QUEBER .LE. .700) GOTO 380
RHB = QUEBER - .700
PTWA = .700
GOTO 376
373 VPUMP = VPUMP + DELTAT * (QUEBER - PLEIST)
IF(VPUMP .GT. 0) GOTO 374
VPUMP = 0.0
IF(QUEBER .LE. PTWA) GOTO 380
RHB = QUEBER - PTWA
GOTO 376
374 RHB = PLEIST - PTWA
WRITE(2,2190) VPUMP,ITIME,PLEIST,PTWA,QUEBER
2190 FORMAT(" ***** PUMPENSUMPF KRIMPEL VOLUMEN : ",F9.4," CUM IN ZEIT-
*CHRITT ",I3," MIT FUERDERLEISTUNG ",F7.4," CUM/S (TWA : ",F7.4,
*"CUM/S)"/" *****",20X,"ZUFLUSS : ",F9.4," CUM/S")
376 QUEBER = PTWA
IF(RHB .LE. 0.) GOTO 380
VRHB = VRHB + DELTAT * RHB
IF(VRHB .LT. RHBMAX) GOTO 378
VUEBER = VRHB - RHBMAX
WRITE(2,2200) VUEBER,ITIME
2200 FORMAT(" ***** RHB-KRIMPEL VOLL, UEBERLAUF VON ",F7.4," CUM IN ZEIT-
*TSCHRITT ",I3)

378 IF(VRHB .GE. .001) GOTO 379
WRITE(2,2240)
GOTO 380
379 PRO = (VRHB * 100.) / RHBMAX
WRITE(2,2250) VRHB,PRO,ITIME

```

```

WRITE(2,2250) VRHB,PRO,ITIME
2240 FORMAT(" ***** RHB-KRIMPEL MINIMALER ZUFLUSS *****")
2250 FORMAT(" ***** RHB-KRIMPEL FUELLUNG ***** VOLUMEN : ",F12.3,"CUM",
* " / ",F6.2," % IN ZEITSCHRITT ",I3)
380 CONTINUE
EXZUFL(I7+1) = QUEBER

400 CONTINUE
KMIND = 0
DO 500 I=MINZ,MAXZ
QT(I) = QNEU(I)
IF(KMFLAG .EQ. 1) GOTO 500
IF(IPROZN(I) .EQ. IPROZ(I)) GOTO 430
IF(QTR(I) .GE. QNEU(I)) GOTO 500

C
C ABFLUSSAENDERUNG UM CA. 10 % - NEUBERECHNUNG DER KM-KONSTANTEN
C
IF(IPROZN(I) .LT. 10) GOTO 410
2050 FORMAT(" ***** VOLLFUELLUNG BEI HALTUNG ",I5," ERREICHT MIT : ",
* 3(2X,F12.4),2(2X,I3))
IF(IPROZ(I) .EQ. 9) GOTO 440
IPROZN(I) = 9
410 CALL KMCONS(IPROZ(I),IPROZN(I),I)

IPROZ(I) = IPROZN(I)
IF(KMIND .LE. 0) KMIND = I
430 CONTINUE

C ***** UEBERSTAU DER HALTUNG ? *****

440 IF(QNEU(I) .LE. QSTAU(I)) GOTO 500
VHALT(I) = VHALT(I) + DELTAT * (QNEU(I) - QSTAU(I))
QT(I) = QSTAU(I)
WRITE(2,2050) HALTUNG(I),QSTAU(I),QNEU(I),VHALT(I)
500 CONTINUE

C ***** ZUFLUSS / ABFLUSS VOLUMENBILANZ

ABLAUF = ABLAUF + DELTAT * QNEU(MAXZ)
QNEU(MAXZ) = QNEU(MAXZ) + UZUFLN(IZMAX+1)
UZUFLN(IZMAX+1) = 0.
IF(KMIND .EQ. 0) GOTO 510

C
C NEUBERECHNUNG DER KM-MATRIZEN AB HALTUNG -KMINU-
C
CALL KMMAT(KMIND)

C
C ***** AUSDRUCK DER ABFLUSSWERTE ALLE "IDT" ZEITSCHRITTE
C
510 IJDELTA = IDELTA - 1
IF(ITRUCK .EQ. 1) GOTO 520
IN1 = MOD(ITIME,1DT)
IF(IN1 .NE. 0) GOTO 530
WRITE(2,2100) (IDRUCK(I),I=1,20)
WRITE(2,2110) ITIME,(UZUFLN(LDRUCK(I)),I=1,20),UZUFLN(IZMAX+1)
2100 WRITE(30,2110) ITIME,(QT(LDRUCK(I)),I=1,19),QNEU(LDRUCK(20))
2110 FORMAT(" TSTEP",20(2X,I4))
530 CONTINUE
IF(ITRUCK .LE. 0 .AND. IDELTA .GT. 0) GOTO 200
IF(ITRUCK .LE. 0) GOTO 900

```

```

DO 535 J=MINZ,MAXZ
UZUFL(I) = UZUFLN(I)
535  UZUFLN(I) = 0.
      IF(LDELTA .GT. 0) GOTO 200
      ITROCK = 0
      GOTO 150
900  CONTINUE

      WRITE(2,9999)
      WRITE(2,9999)
      WRITE(2,2400) ZULAUF,IDRUCK(20),ABLAUF
2400  FORMAT(" ***** GESAMTER ZULAUF INS SYSTEM : ",F10.3," M**3",/
*      " ***** ABFLUSS AUS HALTUNG ",I5," : ",F11.3," M**3")
      IF(VRHB .GT. 0.) WRITE(2,2450) VRHB
2450  FORMAT(" ***** VOLUMEN RHB KRIMPEL :          ",F10.3," M**3")

      IF(ISTUFE .EQ. 999) GOTO 999
C     ***** KOSTENFUNKTIONSBERECHNUNG

      QUEBER = 0.0
      DO 560 I=1,18
560   QUEBER = QUEBER + VHALT(I)**2 * 100.
      RHB = (VPUMP**2 + VRHB**2) * .0138

      VUEBER = 0.0
      DO 570 I=1,IPZ
570   VUEBER = VUEBER + PKFFLD(I) * PKMAT(I)

      PLEIST = VUEBER + QUEBER + RHB

      WRITE(2,9999)
      WRITE(2,2500)QUEBER,RHB,VUEBER,PLEIST
9999  FORMAT(100(" "))
2500  FORMAT(" ***** QUADTR. KOSTENFKT. MIT ",2(F10.2,2X),"ENDZUSTANDSKO
*STEN UND ",F10.2," LEISTUNGSKOSTEN BETRAEGT ",F10.2," FUER DAS ERE
*IGNIS")
999   WRITE(2,9999)
      WRITE(2,9999)
      REWIND 30

      END

```

```

SUBROUTINE KMMATR
C *****
C *** PROGRAM KMMATR BERECHNET DIE VERKNUEPFUNGSTABELLE *****
C *** ZUR BESTIMMUNG DER HALTUNGSWEITERFUEHRUNGEN EINES *****
C *** KANALNETZES *****
C *** AUSSEKDEM WERDEN DIE KM-MATRIZEN ERSTMALS ERSTELLT *****
C *****
DIMENSION IOUT(18)

INTEGER HALTUNG,SCHA0B,SCHAUN

COMMON /KANETZ/HALTUNG(135),SCHA0B(135),SCHAUN(135)

COMMON /INDEX/IZMAX,IZU1(135),(IZU(135,2),L,SCH(135),IX(5)

COMMON /RMAK/DELTAT,X(405),QMAT(135,135),UMAT(135,135)
C LEVEL 2,HALTUNG,SCHA0B,SCHAUN,X,QMAT,UMAT
LEVEL 2,/KANETZ/,/RMAK/

C *****
C *** SCHLEIFF UEBER ALLE HALTUNGEN ZUM AUFBAU DER *****
C *** VERKNUEPFUNGSTABELLE IZU1,IZU *****
C *****

DO 130 IZ=1,IZMAX
I71 = IZMAX - IZ + 1
IF(IZ .NE. 1) GOTO 105
IZU1(1) = 1
GOTO 130

C
C SCHACHT SCHON VORHANDEN ?
C
105 I = IZ - 1
I = 1
DO 110 J=1,I71
IF(SCHA0B(IZ) .NE. SCHAUN(J)) GOTO 110
IF(I .NE. 1) GOTO 108
IZU1(IZ) = J
GOTO 109
108 IZU(IZ,I-1) = J
109 I = I + 1
110 CONTINUE

C
C INDEXFESTLEGUNG FALLS ANFANGSSCHACHT
C
IF(I .NE. 1) GOTO 130
IZU1(IZ) = IZ

130 CONTINUE
C *****
C *** AUSGABE DER VERKNUEPFUNGSTABELLEN FUER DAS KANALNETZ ***
C *****

IA= 1
IN1 = 6

```

```

200 CONTINUE
WRITE(2,2000) (IZ,SCHA0B(IZ),IZ=IA,IN1)
I = 1
DO 205 IZ=IA,IN1
IOUT(I) = IZU1(IZ)
IOUT(I+1) = IZU(IZ,1)
IOUT(I+2) = IZU(IZ,2)
205 I = I + 3
I = I - 1
WRITE(2,2010) (IOUT(IZ),IZ=1,I)
2000 FORMAT(6(2X,I3,2X,I5,1X))
2010 FORMAT(1X,6(1X,3(I3,1X)))

IF(IN1 .GE. IZMAX) GOTO 210
IA = IN1 + 1
IN1 = IN1 + 6
IF(IN1 .GT. IZMAX) IN1 = IZMAX
GOTO 200

210 CONTINUE

C *****
C *** AUFBAU DER KM-MATRIZEN FUER ALLE HALTUNGEN DES KANALNETZES**
C *****

CALL KMMAT(1)

C DO 215 IZ=1,20
C215 WRITE(2,2020) (QMAT(IZ,IA),IA=1,I7)
C DO 220 IZ=1,IZMAX
C WRITE(2,2020) (QMAT(127,IA),IA=1,127)
C DO 230 IZ=1,IZMAX
C IN1 = IZMAX - IZ + 1
C230 WRITE(2,2020) (UMAT(IN1,IZMAX + 2 - IA),IA=1,IZ)
C2020 FORMAT(15(1X,F7.4))

RETURN
END

```

KMMATR

verwendet in KMROUT

Zweck: Berechnung der Verknüpfungstabelle zur Bestimmung der Haltungsverführungen eines Kanalnetzes und Bestimmung der Koeffizientenmatrizen des Abflußmodells

Benötigte Unterprogramme: KMMAT

SUBROUTINE HYS9

DIMENSION IDUMM(5)

INTEGER TITLE(38),SCHACHT

COMMON /KANETZ/THALTG(135),IOBEN(135),IUNTEN(135)
COMMON /INDEX/IZMAX,IZU1(135),IZU(135,2),LETZTER,SCHACHT(135),
* MDELTA,LDELTA,IDELTA,MINZ,MAXZ

C LEVEL 2,THALTG,IOBEN,IUNTEN
C LFVEL 2,/KANETZ/

C *****
C EINLESEN DER ERSTEN 9 DATENKARTEN DER DATEI MIT DEN OBERFLAECHE-
C ABFUSSGANGLINIEN --) HYSTEMFORMAT *****
C ***** MDELTA - ZEITINTERVALLANZAHL *****
C ***** LETZTER - SCHACHTANZAHL = GANGLINIENANZAHL *****
C ***** SCHACHT(I) - FELD FUER DIE SCHACHTKENNUNGEN *****
C *****

READ(40) (TITLE(I),I=1,38)
READ(40) IDUM,DUM,IDUM1
READ(40) (TITLE(I),I=1,38)
READ(40) (IDUMM(I),I=1,5),MDELTA,DUM,LETZTER,IDUM,DUM,IDELTA
READ(40) (SCHACHT(J),J=1,LETZTER)
READ(40)
READ(40)
READ(40)
READ(40) DUM

LDELTA = MDELTA
IFAIL = 1

C *****
C ZUORDNUNG DER GANGLINIEN ZU DEN KANALNETZSCHACHTEN *****
C *****

DO 20 I=1,LETZTER

DO 10 IZ=1,IZMAX
IF(SCHACHT(I).NE. IOBEN(IZ)) GOTO 10
SCHACHT(I) = IZ
MINZ = MIN0(SCHACHT(I),MINZ)
MAXZ = MAX0(SCHACHT(I),MAXZ)
GOTO 20

10 CONTINUE
IF(I.NE. LETZTER) GOTO 15
IF(SCHACHT(I).NE. IUNTEN(IZMAX)) GOTO 15
SCHACHT(I) = IZMAX + 1
GOTO 30
15 IFAIL = IFAIL + 1
WRITE(2,2000) SCHACHT(I)
SCHACHT(I) = IZMAX + IFAIL
20 CONTINUE

2000 FORMAT(" ***** GANGLINIE FUER SCHACHT ",I5," NICHT ZUORDBAR !")

C *****
C FESTSTIMMUNG DES ABFLUSSGEBIETSINDEXES *****
C *****
30 I = IZU1(MINZ)
IF(I.EQ. MINZ) RETURN
MINZ = I

SUBROUTINE UFLUSS

C *****
C EINLESEN EINES ZEITSCHRITTES DES OBERFLAECHEABFLUSSMODELLS ****
C UZUFL - WERTE ZUM ZEITPKT. T ****
C UZUFLN- WERTE ZUM ZEITPKT. T+1 ****
C *****

COMMON /KANETZ/IWERT(810),EXZUFL(135)
COMMON /INDEX/IZMAX,IZU1(135),IZU(135,2),LETZTER,ISCH(135),MDELTA,
* LDELTA,IDELTA,MINZ,MAXZ
COMMON /FLUSS/UZUFL(135),UZUFLN(135)

C LEVEL 2,IWERT,EXZUFL
C LEVEL 2,/KANETZ/

C *****
C WERTE ZUM ZEITPKT. T+1 JETZT WERTE ZUM ZEITPKT T ****
C *****

DO 10 I=MINZ,MAXZ
UZUFL(I) = UZUFLN(I)
10 UZUFLN(I) = 0.0

C *****
C EINLESEN DER NEUEN ZEITSCHRITT WERTE FUER T+1 ****
C *****

READ(40) DUM,IDUM,DUM1,(UZUFLN(ISCH(I)),I=1,LETZTER)
2000 WRITE(2,2000) (ISCH(I),UZUFLN(ISCH(I)),I=1,LETZTER)
RETURN
END

HYS 9

Zweck: Einlesen der ersten neun Zeilen der Datei HYSTEM, auf der sich die Oberflächenabfluß-ganglinien befinden.

ZUFLUSS

Verwendet in KMR0UT

Zweck: Einlesen eines Zeitschrittes des Oberflächen-abflußmodells für das gesamte Kanalnetz

```

SUBROUTINE KMMAT(INDEX)
*****
*** PROGRAM KMMAT BERECHNET DIE MATRIZEN FUER EIN KANAL.- *****
*** NETZ, DAS MIT DEM KALININ-MILJUKOV-VERFAHREN ABFLUES- *****
*** BERECHNET. *****
*** QMAT - MATRIX FUER Q ZUM ZEITPKT T *****
*** UMAT - MATRIX FUER U ZUM ZEITPKT T *****
*** UMAT1- MATRIX FUER U ZUM ZEITPKT T + 1. *****
*****

INTEGER SCHA0B
REAL KMCON1,KMCON2

COMMON /KANETZ/ IX(135),SCHA0B(135),IXX(270),ITYP(135)
COMMON /INDEX/ IZMAX, IZU1(135), IZU(135,2), L, SCH(135), MDelta,
* IDELTA, IDELTA, MINZ, MAXZ
COMMON /KMFAB/ DELTAT, X(135), KMCON1(135), KMCON2(135), QMAT(135,135),
* UMAT(135,135)

C LEVEL 2, IX, SCHA0B, IXX, ITP, X, KMCON1, KMCON2, QMAT, UMAT
C LEVEL 2, /KANETZ/, /KMFAB/

DO 100 IZ=INDEX, IZMAX
  IZ1 = IZMAX - IZ + 1
  C BERECHNUNG DER MATRIZENZEILEN
  C
  IF (IZU1(IZ) .NE. IZ) GOTO 10
  QMAT(IZ,IZ) = 1 - KMCON1(IZ)
  UMAT(IZ,IZ) = KMCON1(IZ) - KMCON2(IZ)
  UMAT(IZ1,IZ1+1) = KMCON2(IZ)
  GOTO 100
CONTINUE

  IN1 = 1
  IF (IZU(IZ,1) .EQ. 0) GOTO 20
  IN1 = 2
  IF (IZU(IZ,2) .EQ. 0) GOTO 20
  IN1 = 3

20 CONTINUE
DO 40 J=1, IN1
  IF (J .NE. 1) GOTO 35
  IND = IZU1(IZ)
  ISPA = IZU1(IND)
  IF (ISPA .EQ. IND) GOTO 33
  IF (ISPA .EQ. IZU1(ISPA)) GOTO 33
  ISPA = IZU1(ISPA)
  GOTO 31

31 DO 34 K=ISPA, IZ
  ISP = IZMAX - K + 2
  QMAT(IZ,K) = 0.
  UMAT(IZ,K) = 0.
  UMAT(IZ1,ISP) = 0.
  GOTO 36

33 IND = IZU(IZ, J-1)
  ISPA = K + 1
  CONTINUE
  IND1 = IZMAX - IND + 1

```

```

DO 37 K=ISPA, IZ
  ISP = IZMAX - K + 2
  IF (K .EQ. IZ) GOTO 40
  IF (K .EQ. IND) QMAT(IZ,K) = KMCON1(IZ) - KMCON2(IZ)
  QMAT(IZ,K) = KMCON2(IZ) * QMAT(IND,K) + QMAT(IZ,K)
  UMAT(IZ,K) = KMCON2(IZ) * UMAT(IND,K)
  UMAT(IZ1,ISP) = KMCON2(IZ) * UMAT(IND1,ISP)
  IF (K .EQ. IND .AND. J .LT. IN1) GOTO 40
37 CONTINUE
40 CONTINUE
C HAUPTDIAGONALELEMENTE DER MATRIZEN
C
  QMAT(IZ,K) = 1 - KMCON1(IZ)
  UMAT(IZ,K) = KMCON1(IZ) - KMCON2(IZ)
  UMAT(IZ1,ISP) = KMCON2(IZ)
100 CONTINUE

C WRITE(2,2000) INDEX, IZMAX
2000 FORMAT(" ***** KMMAT BERECHNET FUER DEN BEREICH ", I3, " BIS ", I3)
C DO 150 J=INDEX, IZMAX
C WRITE(2,2010) (QMAT(I9, I), I=1, I9)
2010 FORMAT(15(2X, F8.4))
RETURN
END

```

23.08.12. END OF PRINTING, RBB/GL 22/10/84 (000000B PAGES)

KMMAT

verwendet in KMROUT, UMMATR

Aufruf: KMMAT (Index)

Zweck: Berechnung der Koeffizientenmatrizen für das Kalinin-Miljukov-Abflußmodell

```

SUBROUTINE KMCONS(IPALT,IPNEU,INDEX)
DIMENSION (PROH(20))

INTEGER HALTUNG
REAL NW,KMCON1,KMCON2,LAE

COMMON /KANETZ/HALTUNG(135),IX(270),LAE(135),ITYP(135),NW(135),
* EXZUFL(135),QVOLL(135)
COMMON /KMAK/DELTAT,RCONS(135),KMCON1(135),KMCON2(135)

C LEVEL 2,HALTUNG,IX,LAE,ITYP,NW,EXZUFL,QVOLL
C LEVEL 2,/KANETZ/,/KMAK/
C LEVEL 2,DELTAT,RCONS,KMCON1,KMCON2

DATA (IPROH(I),I=1,20)/21,23,31,34,38,43,44,50,57,57,63,63,
* 69,70,76,79,83,90,90/

C
C BESTIMMUNG DER PROZENTUALEN WASSERSTANDSHOEHEN
C
IPRO = (2 * IPALT) + 1
IF(ITYP(INDEX) .EQ. 4) IPRO = IPRO + 1

HALT = (NW(INDEX) * IPROH(IPRO)) / 100.
QALT = (IPALT * QVOLL(INDEX)) / 10.

IPNEU = (2 * IPNEU) + 1
IF(ITYP(INDEX) .EQ. 4) IPNEU = IPNEU + 1

HNEU = (NW(INDEX) * IPROH(IPRO)) / 100.
QNEU = ((IPNEU * QVOLL(INDEX)) / 10.

C *****
C **** BESTIMMUNG DER RETENSIONS KONSTANTE ****
C *****
IF(ITYP(INDEX) .NE. 4) GOTO 1A

C ***** EIPROFIL *****

WBREIT = 2 * (NW(INDEX) / 3)
IF(WBREIT .GE. HNEU) GOTO 15
HN = NW(INDEX) - HNEU
WBREIT = 2 * SQRT( HN * WBREIT - HN**2)
GOTO 30
15 WBREIT = SQRT(NW(INDEX)**2 - (WBREIT - HNEU)**2) - WBREIT
GOTO 30

C ***** KREISPROFIL *****

1A WBREIT = NW(INDEX)
WBREIT = 2 * SQRT( HNEU * WBREIT - HNEU**2)
30 RCONS(INDEX) = (LAE(INDEX) * WBREIT *
* ( (HNEU - HALT) / (QNEU - QALT) ) ) / 60.

C
C **** ZF(T) DELTA T ****
C
DELTA = DELTAT / 60.
IF(RCONS(INDEX) .LT. DELTA) GOTO 40

```

```

IDELTA = " JA"
40 GOTO 50
CONTINUE
IDELTA = "NEIN"
50 CONTINUE
C
C **** KALININ-MILJUKOV-KONSTANTEN ****
C
KMCON1(INDEX) = 1 - EXP( -DELTA / RCONS(INDEX))
KMCON2(INDEX) = 1 - (RCONS(INDEX) / IDELTA) * KMCON1(INDEX)

C WRITE(2,2010) HALTUNG(INDEX),NW(INDEX),RCONS(INDEX),IDELTA,
C * KMCON1(INDEX),KMCON2(INDEX),ITYP(INDEX),IPALT,IPNEU
2010 FORMAT(" ***** NEUE KM-KONST. FUER HALTUNG ",15," : ",F6.2,
*2X,F9.3,1X,A4,2(2X,F6.4),2X,11,2(2X,I3))
RETURN
END

```

KMCONS

Verwendet in KMCONS

Zweck: Berechnung der Kalinin-Miljukov-Konstante anhand von prozentual geschätzter Wasserstands- und Abflußwerte.

OPTICO

Programmbeschreibung:

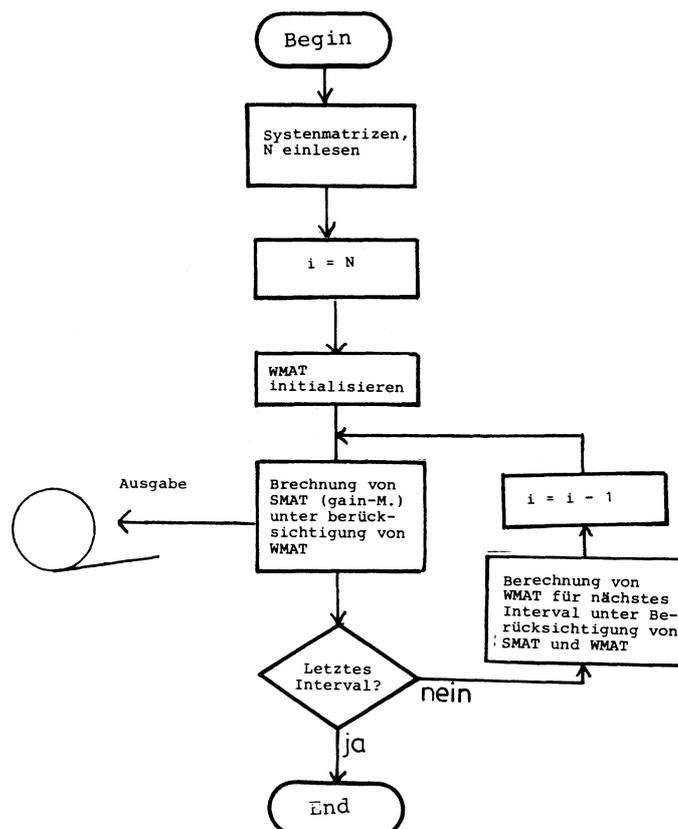
Zweck: Berechnung der gain-Matrix für einen N-stufigen Prozeß

Benötigte Unterprogramme: MAMUL, FO1AAF (UP zur Matrizeninversion,
NAG-Bibliothek-RRZN)

Bedeutung der Variablen:

- QMAT - Zustandsübertragungsmatrix - (n,n)
- PMAT - Steuerungsübertragungsmatrix - (n,m)
- QKMAT - Kostenkoeff-matrix für Zustandsvektor (n,n)
- PKMAT - Kostenkoeff-matrix für Steuerungsvektor (mxm)
- IQZ, IQS - Dimensionen von QMAT
- IPZ, IPS - Dimensionen von PMAT
- KQZ, IQS - Dimensionen von QKMAT
- KAZ, KPS - Dimensionen von PKMAT
- ISTUFE - Anzahl der Berechnungen (Stufen)
- IDELTA - Intervallbreite einer Stufe
- SMAT - gain-Matrix

Programmablaufplan:



```

PROGRAM OPTICO(INPUT,OUTPUT,TAPE1=INPUT,TAPE2=OUTPUT)
C *****
C ***** DAS PROGRAMM BERECHNET DIE "GAIN" MATRIX FUER EIN *****
C ***** REGULATOR PROBLEM DAS MIT HILFE DER DYNM, OPTIMIERUNG *****
C ***** GELOEST WIRD *****
C ***** SMAT IST DIE SOGEN. GAIN MATRIX UND WIRD FUER JEDE *****
C ***** STUFF BERECHNET *****
C *****
COMMON/MATRIX/ QMAT(21,21),WMAT(21,21),X(21,21),H(21,21),
* PMAT(21,6),Y(21,6),SMAT(6,21),W(6,21),Z(6,21),
* PKMAT(6,6),VERS(6,6),V(6,6),QKMAT(21,21)
DIMENSION A(441),B(441),C(126),D(36),E(441),F(126),G(441),
* Q(126),P(126),R(441),S(36),T(126),WKSPACE(6)
EQUIVALENCE(A(1),QMAT(1,1)),(B(1),QKMAT(1,1)),
* (C(1),PMAT(1,1)),(D(1),PKMAT(1,1)),
* (E(1),WMAT(1,1)),(F(1),SMAT(1,1)),(T(1),W(1,1)),
* (G(1),X(1,1)),(Q(1),Y(1,1)),(P(1),Z(1,1)),
* (R(1),H(1,1)),(S(1),VERS(1,1)),(V(1),V(1,1))
C LEVEL 2,QMAT,PMAT,QKMAT,PKMAT,WMAT,SMAT,V,W,X,Y,Z,H,VERS
C LEVEL 2,/MATRIX/
C LEVEL 2,A,B,C,D,E,F,G,H,P,Q,R,S,T
C DATA IANZ /126/
C OPEN (40,ACCESS='DIRECT',FORM='UNFORMATTED',RECL=IANZ,FILE='GAIN')
C ***** EINLESEN DER INDIZES FUER DIE EINZELNEN MATRIZEN
C
C READ(1,1000) IQZ,IQS,IPZ,IPS,KQZ,KQS,KPZ,KPS,ISTUFE,DELTA
1000 FORMAT(8(I2,1X),I3,I5)
C
C WRITE(2,1500) ISTUFE,DELTA
1500 FORMAT(10X,90(" "),/,10X,"***** OPTICO FUER NETZ BREMEN MIT ",
* I3," STUFEN A ",I5," MINUTEN U. ZFITSCHRITT 1 MINUTEN *****",
* /,10X,90(" ")//)
C ***** EINLESEN DER MATRIZEN
C
C DO 1 I=1,441
A(I) = 0.0
B(I) = 0.0
E(I) = 0.0
G(I) = 0.0
1 Q(I) = 0.0
C
C DO 2 I=1,126
C(I) = 0.0
F(I) = 0.0
D(I) = 0.0
T(I) = 0.0
2 P(I) = 0.0
C
C DO 3 I=1,36
D(I) = 0.0
S(I) = 0.0
3 R(I) = 0.0

```

```

DO 10 I=1,IQZ
READ(1,1010) (QMAT(I,J),J=1,IQS)
DO 5 J=1,IQS
8 QMAT(I,J) = IDELTA * QMAT(I,J)
10 CONTINUE
1010 FORMAT(12(F6.2))
DO 15 I=14,21
15 WRITE(2,2010) (QMAT(I,J),J=1,IQS)
C
C DO 20 I=1,IPZ
READ(1,1010) (PMAT(I,J),J=1,IPS)
DO 18 J=1,IPS
18 PMAT(I,J) = IDELTA * PMAT(I,J)
20 CONTINUE
DO 22 I=14,21
22 WRITE(2,2010) (PMAT(I,J),J=1,IPS)
(F(KQZ .NE. 0) GOTO 30)
C ***** NUR DIAGONALELEMENTE
C
C KQZ = KQS
READ(1,1020) (QKMAT(I,J),I=1,KQS)
WRITE(2,2010) (QKMAT(I,I),I=1,KQS)
1020 FORMAT(10(F7.5))
GOTO 40
30 CONTINUE
DO 35 I=1,KQZ
35 READ(1,1020) (QKMAT(I,J),J=1,KQS)
40 CONTINUE
IF(KPZ .NE. 0) GOTO 45
C ***** NUR DIAGONALELEMENTE
C
C KPZ = KPS
READ(1,1020,FND=50) (PKMAT(I,I),I=1,KPS)
WRITE(2,2010) (PKMAT(I,I),I=1,KPS)
GOTO 50
45 CONTINUE
DO 47 I=1,KPZ
47 READ(1,1020,END=50) (PKMAT(I,J),J=1,KPS)
50 CONTINUE
WRITE(40,REC=1) ISTUFE,IQS,IPS
C *****
C ***** REBERECHNUNG VON SMAT(T) UND WMAT(T) *****
C *****
C ***** ANFANGSWERT ZUFWISUNG
C
C (ST = ISTUFE
C ***** WMAT(ISTUFE) WIRD AUF QKMAT(ISTUFE) GESETZT
C
C DO 55 I=1,KQZ
DO 55 J=1,KQS
55 WMAT(I,J) = QKMAT(I,J)

```

```

60 CONTINUE
C ***** BERECHNUNG VON SMAT(T) MIT WMAT(T+1)

ITRANS = 1
C ***** MATRIZENMULTIPLIKATION MIT DEM UP MAMUL
C ***** MUL. VON PMAT TRANSP. MIT WMAT(T+1) --> Z
CALL MAMUL(IPZ,21,IPS,6,KGZ,21,KGS,21,1764,441,2268,6,21,ITRANS)
IF(ITRANS .GT. 1) GOTO 900
9000 FORMAT(" *****")
ITRANS = 0
C ***** MUL. VON Z MIT PMAT --> V
CALL MAMUL(IPS,6,KGS,21,IPZ,21,IPS,6,2268,1764,2466,6,6,ITRANS)
IF(ITRANS .GT. 0) GOTO 900
C ***** ADDITION MIT DER PUMPENKOSTENMATRIX
IF(IPS .NE. KPZ .OR. IPS .NE. KPS) GOTO 900
DO 70 I=1,IPS
DO 70 J=1,IPS
70 V(I,J) = V(I,J) + PKMAT(I,J)
C WRITE(2,2000)
2000 FORMAT(" ***** ZU INVERTIERENDE MATRIX LAUTET : ")
C DO 75 I=1,KPZ
C75 WRITE(2,2010) (V(I,J),J=1,KPS)
2010 FORMAT(10(F13,6))
C ***** INVERTIERUNG DER MATRIX Y
I = 6
CALL FO1AAF(V,I,IPS,VERS,I,WKSPCE,ITRANS)
IF(ITRANS .EQ. 0) GOTO 80
WRITE(2,2020) ITRANS
2020 FORMAT(" ***** FEHLER ",I2," BEI SR INVERSENBILDUNG *****")
GOTO 900
80 CONTINUE
C WRITE(2,2000)
C DO 78 I=1,IPS
C78 WRITE(2,2010) (VERS(I,J),J=1,IPS)
C WRITE(2,9000)
C ***** MUL. VON Z MIT QMAT --> W
CALL MAMUL(IPS,6,KGS,21,IGS,21,IGS,21,2268,0,2142,6,21,ITRANS)
IF(ITRANS .GT. 0) GOTO 900
DO 84 I=1,IPS
DO 84 J=1,IGS
84 W(I,J) = (-1) * W(I,J)
C ***** MUL. VON INVERSER VERS MIT W --> SMAT
CALL MAMUL(IPS,6,IPS,6,IPS,6,IGS,21,2430,2142,2016,6,21,ITRANS)
IF(ITRANS .GT. 0) GOTO 900
WRITE(2,2030) IST
DO 88 I=1,IPS
88 WRITE(2,2010) (SMAT(I,J),J=1,IGS)

```

```

CALL MAMUL(IPZ,21,IGS,21,KGZ,21,KGS,21,0,441,882,21,21,ITRANS)
IF(ITRANS .GT. 1) GOTO 910
ITRANS = 0
C ***** MUL. VON X MIT QMAT --> H
CALL MAMUL(IQZ,21,IGS,21,IQZ,21,IGS,21,882,0,1323,21,21,ITRANS)
IF(ITRANS .GT. 0) GOTO 910
C ***** MUL. VON X MIT PMAT --> Y
CALL MAMUL(IQZ,21,IGS,21,IPZ,21,IPS,6,882,1764,1890,21,6,ITRANS)
IF(ITRANS .GT. 0) GOTO 910
C MUL. VON Y MIT SMAT --> X
CALL MAMUL(IQZ,21,IPS,6,IPS,6,IGS,21,1890,2016,882,21,21,ITRANS)
IF(ITRANS .GT. 0) GOTO 910
C ***** ADDITION DER MATRIZEN FUER WMAT(T)
DO 90 I=1,IQZ
DO 90 J=1,IGS
WMAT(I,J) = H(I,J) + X(I,J) + QKMAT(I,J)
C IF(IST .NE. ISTUFE) GOTO 90
C WMAT(I,J) = WMAT(I,J) + QKMAT(I,J)
90 CONTINUE
C WRITE(2,2050) IST
C2050 FORMAT(" ***** W-MATRIX FUER STUFE : ",I3)
C DO 95 J=1,IQZ
C95 WRITE(2,2010) (WMAT(I,J),J=1,IGS)
IST = IST - 1
IF(IST .GE. 0) GOTO 60
GOTO 999
900 CONTINUE
WRITE(2,2060) IST
2060 FORMAT(" ***** ABRUCH VON PROGRAMM OPTICO : FEHLER IN STUFE ",I3,
*" BEI DER BERECHNUNG DER MATRIX SMAT *****")
GOTO 999
910 CONTINUE
WRITE(2,2070) IST
2070 FORMAT(" ***** ABRUCH VON PROGRAMM OPTICO : FEHLER IN STUFE ",I3,
*" BEI DER BERECHNUNG DER MATRIX WMAT *****")
999 CONTINUE
END

```

```

SUBROUTINE MAMUL(ID1Z,M1Z, ID1S,M1S, ID2Z,M2Z, ID2S,M2S,
*             MAT1,MAT2,MAT3,M3Z,M3S, ITRANS)
C *****
C ***** PROGRAMM ZUR MULTIPLIKATION ZWEIER MATRIZEN *****
C ***** ( A * B = C (ODER A * B T = C) *****
C ***** PARAMETER ID1Z - ZEILENDIMENSION VON MAT1 *****
C ***** ID1S - SPALTENDIMENSION VON MAT1 *****
C ***** ID2Z - ZEILENDIMENSION VON MAT1 *****
C ***** ID2S - SPALTENDIMENSION VON MAT1 *****
C ***** MAT3 - ERGEBNISMATRIX, UNGLEICH MAT1/MAT2 *****
C ***** ITRANS - = 1 : MAT1 WIRD TRANSPONIERT *****
C *****
COMMON/MATRIX/ RF(2510)
LEVEL 2,/MATRIX/
IF(ITRANS .EQ. 0) GOTO 30
***** BERECHNUNG MIT TRANSPONIERTER MAT1
IF(ID1Z .NE. ID2Z) GOTO 900
DO 20 I=1, ID2S
DO 15 J=1, ID1S
XW = 0.0
DO 10 K=1, ID1Z
XW = XW + RF(MAT1 + K + (J-1)*M1Z) * RF(MAT2 + K + (I-1)*M2S)
RF(MAT3 + (I-1)*M3Z + J) = XW
15 CONTINUE
20 CONTINUE
RETURN
30 CONTINUE
IF(ID1S .NE. ID2Z) GOTO 900
DO 40 I=1, ID2S
DO 36 J=1, ID1Z
XW = 0.0
DO 34 K=1, ID1S
XW = XW + RF(MAT1 + J + (K-1)*M1Z) * RF(MAT2 + K + (I-1)*M2Z)
RF(MAT3 + (I-1)*M3Z + J) = XW
36 CONTINUE
40 CONTINUE
RETURN
900 CONTINUE
WRITE(2,2000) ID1Z, ID1S, ID2Z, ID2S
2000 FORMAT(/" ***** SR MAMUL AUFRUF MIT FALSCHEN DIMENSIONEN : ",
*          4(I3,1X))
ITRANS = 2
RETURN
END

```

MAMUL

verwendet in OPTICO
 Aufruf: MAMUL (ID1Z, M1Z, ID1S, M1S, ID2Z, M2Z, ID2S, M2S, MAT1, MAT2, MAT3, M3Z, M3S, ITRANS)

Zweck: Multiplikation zweier Matrizen, wobei die zweite zwar transponiert werden kann.

Bedeutung der Parameter:

- ID1Z, ID2Z - Zeilendimension
- ID1S, ID2S - Spaltendimension
- M1Z, M2Z, M3Z - maximale Zeilendimension
- M1S, M2S, M3S - maximale Spaltendimension
- MAT1, MAT2 - die zu multiplizierende Matrize
- MAT3 - Ergebnismatrize ungleich MAT1 oder MAT2
- ITRANS - 1: Matrix MAT2 wird transponiert