

DIPLOMAUFGABE

für cand.-ing. Marko Siekmann Matr. Nr. 111 92 75

Erweiterung des hydrologischen Kanalnetzrechnungsmodells KMROUT auf Fließvorgänge im Einstau- bzw. Überstau-Bereich

Zur Kanalnetzrechnung in der Stadthydrologie werden entweder hydrologische oder hydrodynamische Modelle eingesetzt. Hydrodynamische Modelle beruhen auf die Saint-Venant'sche Differentialgleichung, die theoretisch für jede infinitesimale Kanalstrecke gilt und vollständig oder in vereinfachter Form gelöst wird. Die explizite Formulierung der Beziehungen zwischen den relevanten Fließzustandsvariablen Durchfluß, Wasserstand und Geschwindigkeit ermöglicht eine realistische Nachbildung der Vorgänge im Freispiegelabfluß. Eine Erweiterung der numerischen Simulation auf den Einstau- bzw. Überstau-Bereich ist auch möglich.

In den hydrologischen Modellen beruht die numerische Simulation jeder einzelnen Kanalstrecke auf vereinfachten Annahmen über das Verhältnis zwischen dem Wasserstand und dem Durchfluß. Dieses läßt sich in vielen Fällen nicht direkt aus den physikalischen Gesetzmäßigkeiten ableiten, sondern entstammt einem sogenannten Modell-Konzept. Eine Erklärung des jeweiligen Konzepts ist jedoch jederzeit in hydraulischen Termen möglich und liefert wichtige Hinweise über die impliziten Einschränkungen, denen das hydrologische Modell bzw. sein Konzept unterliegt.

Das Modell KMROUT basiert auf der Speicheranalogie. Jede Kanalstrecke wird als Becken betrachtet, dessen Abfluß vom gespeicherten Volumen abhängt. Die Beziehungen zwischen Abfluß und gespeichertem Volumen werden in Form von Abflußkurven ausgedrückt, die in dem ATV A 110 veröffentlicht wurden. Diese Abflußkurven gelten, streng genommen, nur für Freispiegelabfluß und im Normalabfluß. Vergleiche mit Ergebnissen des hydrodynamischen Berechnungsmodells EXTRAN haben gezeigt, daß sich im Freispiegelabfluß für

Sohlgefälle größer als 0,5% die hydrologische Berechnung mit **KMROUT** kaum von der hydrodynamischen unterscheidet.

Weitere Untersuchungen wurden im Einstau- bzw. Überstau-Bereich eingeleitet, um das Verhalten von **KMROUT** und **EXTRAN** gegenüberzustellen. Es wurde versucht, den Gültigkeitsbereich der Abflußkurve auf den Einstau- bzw. Überstau-Bereich zu erweitern (Methodik 1). Die Untersuchung wurde allerdings für ein einfaches Netzgebilde durchgeführt, so daß allgemeine Aussagen über die Zuverlässigkeit der Vorgehensweise derzeit nicht erlaubt sind.

Parallel zu der oben genannten Untersuchung wurde ein neuer Berechnungsalgorithmus für den Einstaufall entwickelt und in **KMROUT** implementiert. Dieser Algorithmus hat den Vorteil das aktuelle Wasserstandsgefälle bei der Durchflußberechnung im Einstau zu berücksichtigen (Methodik 2).

Herrn Siekmann soll in seiner Diplomarbeit Methodik 1 und 2 eingehend beschreiben und an Hand von Simulationsergebnissen, so weit es geht, ihre Zuverlässigkeit dokumentieren. Die Gestaltung des Simulationsprotokolls (Aufbau von künstlichen Kanalnetzen, Wahl von Niederschlagsbelastungen, Bestimmung der Simulationsparameter) ist Herrn Siekmann überlassen. Es soll versucht werden, möglichst aussagekräftige Schlußfolgerungen aus den Ergebnissen zu ziehen.

Im einzelnen sind dazu folgende Teilaufgaben zu bewältigen:

- Beschreibung der verschiedenen Methoden zur Erweiterung der Abflußkurven auf den Einstau-Bereich und Erläuterung der damit verbundenen theoretischen Einschränkungen der Modellierung
- praktische Beurteilung der Vorgehensweise an Hand von Vergleichsberechnungen mit dem Modell **EXTRAN**
- Beschreibung der Grundlagen von Methodik 2. Diese Vorgehensweise soll aus theoretischer Sicht begründet werden und der erwartete Gewinn gegenüber Methodik 1 erläutert.
- Beschreibung der Implementierung in **KMROUT**. Die möglichen Auswirkungen der damit verbundenen Vereinfachungen sollen erläutert werden.
- Verifizierung der Vorgehensweise an Hand von Vergleichsberechnungen mit dem Modell **EXTRAN** und mit Methodik 1. Das dem Kandidaten zur Verfügung gestellte Programm ist derzeit nur unzureichend auf mögliche Ungereimtheiten getestet. Daher soll der Kandidat

jede Diskrepanz der Simulationsergebnisse genau untersuchen und die mögliche Ursache erforschen.

Es stehen alle notwendigen Programme zur Verfügung. Jedes erhaltene Ergebnis soll nachvollziehbar sein. Dementsprechend sind die durchgeführten Arbeiten ausführlich darzustellen und nach Möglichkeiten durch Abbildungen, Diagramme und Graphiken zu dokumentieren.

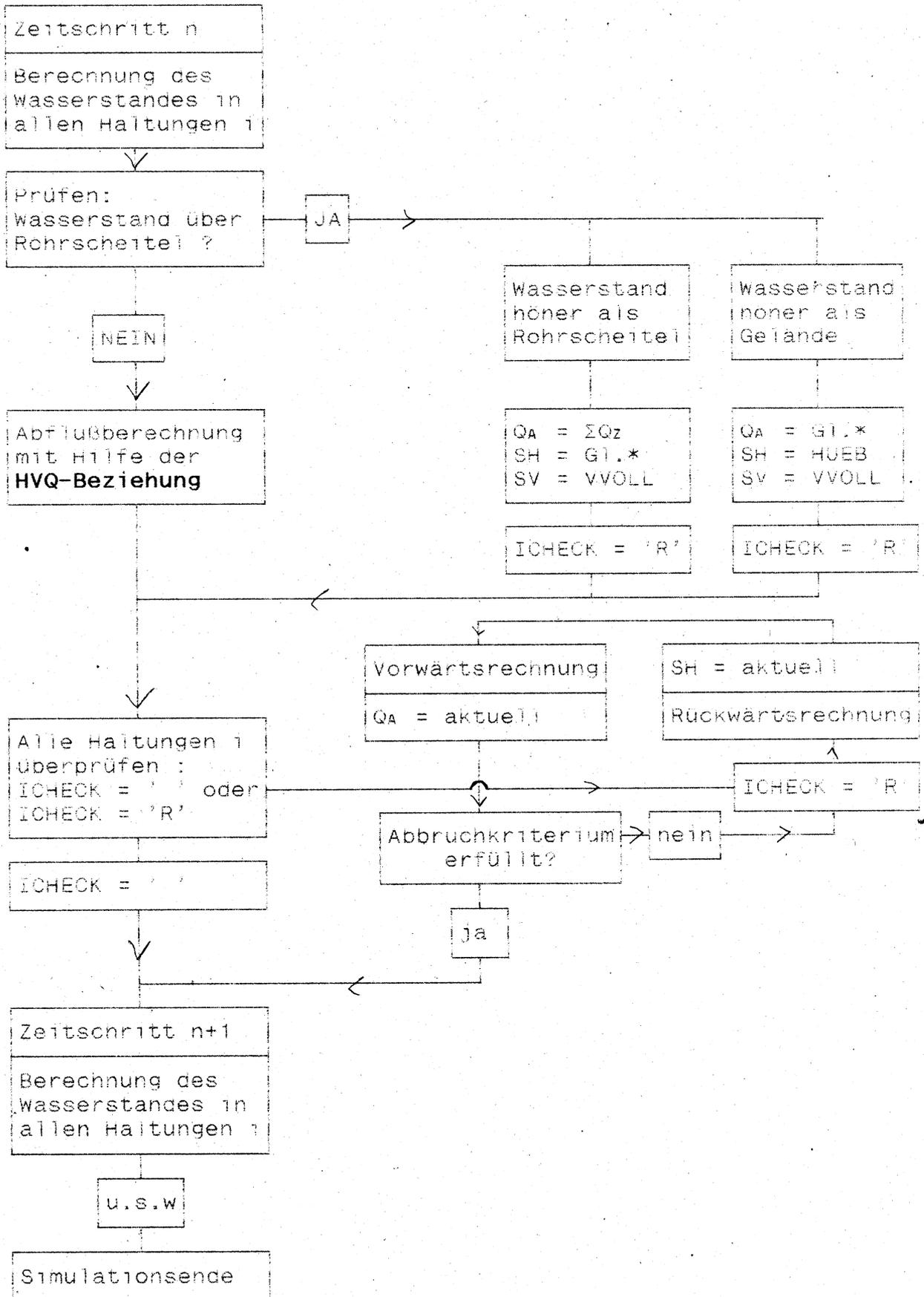
Die Diplomarbeit ist in vierfacher Ausfertigung mit einer eidesstattlichen Erklärung zur selbständigen Bearbeitung abzugeben.

Ausgabe:

Abgabe :

(Prof. Dr.-Ing. F. Sieker)

Neues Berechnungsschema in KMROUT:



Ich erkläre hiermit eidesstattlich,
diese Diplomarbeit selbständig angefertigt zu haben.

Lemgo, Dezember 1992

Inhaltsverzeichnis:

	Seite		
<u>1. Einleitung</u>	1		
1.1 Beschreibung der verwendeten Programme	2		
1.1.1 Das Abflußtransportmodell EXTRAN	2		
1.1.2 Kurzbeschreibung des Modelles HYSTEM	2		
1.2 Berechnungsgrundlagen zum Vergleich zweier Ganglinien	3		
<u>2. Einführung in die Berechnungsgrundlagen des Programmes KMROUT</u>	6		
2.1 KALININ-MILJUKOV-Verfahren	6		
2.2 Abflußberechnung im Programm KMROUT	12		
2.2.1 Programmstruktur und Datenfluß in KMROUT	12		
2.2.2 Umsetzung des KALININ-MILJUKOV-Verfahrens	13		
2.2.2.1 Einfach-analytische Methode	14		
2.2.2.2 Einfach-graphische Methode	15		
2.2.3 Gestaltung der Abflußberechnung	16		
2.2.4 Simulationsergebnisse (einfach-graphische Methode)	17		
<u>3. Erweiterte QH-Beziehungen für Fließvorgänge im Einstaubereich</u>	21		
3.1 Simulationsaufbau	22		
3.2 Simulationsergebnisse	24		
		3.2.1 Allgemeine Simulationsergebnisse	24
		3.2.2 Erstellung der QH-Beziehungen	25
		3.3 Diskussion der Ergebnisse	29
		<u>4. Anwendung einer erweiterten QH-Beziehung im Modell KMROUT</u>	30
		4.1 Möglichkeiten für die programmtechnische Umsetzung	30
		4.1.1 Einführung des Preissmann Slot's	31
		4.1.2 Erweiterung des eingeführten Preissmann Slot's	33
		4.2 Berechnungsergebnisse des erweiterten Modells, KMROUT1	35
		4.2.1 Abflußberechnung, Einstau in Haltung 2	36
		4.2.2.1 Abflußberechnung, Überstau in Haltung 2	39
		4.2.2.2 Abflußberechnung, deutlicher Überstau	41
		4.3 Bewertung der Simulationsergebnisse mit der erweiterten QH-Beziehung	43
		<u>5. Abflußberechnung bei Ein- / Überstau unter Berücksichtigung des Wasserstandsgefälles</u>	45
		5.1 Grundlagen zur Berücksichtigung des Wasserstandsgefälles	45
		5.2.1 Randbedingungen bei Einstau in den Haltungen	47
		5.2.2 Erstellung eines Gleichungssystems zur Abflußermittlung	49

5.3	Umsetzung (Einstaualgorithmus) in KMROUT	50
6.	<u>Berechnungsergebnisse unter Anwendung des Wasserstandsgefälles</u>	56
6.1	Erste Simulationen zur Programmüberprüfung	56
6.1.1	Änderung des Iterationsprozesses	60
6.2	Simulationen mit dem erneuerten Programm KMROUT2	60
6.2.1	Simulation mit Netz 2, Haltung 2 staut ein	60
6.2.2	Simulation mit Netz 2, Haltung 2 staut über	62
6.2.3	Simulationen mit Netz 3	64
6.2.4	Simulation mit Netz 3, Fließrichtungswechsel	66
6.2.5	Berechnung des Abflusses in einem 'größeren' Netz	68
6.2.5.1	Beurteilung der benötigten Rechenzeiten	70
6.2.5.2	Überprüfung der Abbruchkriterien	71
7.	<u>Zusammenfassung</u>	72

LiteraturverzeichnisAnlagenVerzeichnis der Variablen:

A	: Durchflossener Querschnitt [m ²]
C ₁	: Kalinin-Miljukov-Konstanten
C ₂	: Kalinin-Miljukov-Konstanten
char. L	: Charakteristische Länge L [m]
d	: Rohrdurchmesser [m]
del	: Zeitschritt der Ganglinienausgabe [s]
DEVM	: Prüfgröße zur Berechnung der Deviation zwischen zwei Ganglinien [%].
DEVS	: Prüfgröße zur Berechnung der Deviation zwischen zwei Ganglinien [%].
d _{hy}	: Hydraulischer Durchmesser [m]
dt	: Berechnungszeitschritt [s]
δt	: Zeitintervall [s]
g	: Erdbeschleunigung [m/s ²]
h	: Wasserstand [m]
HTOL	: Abbruchvariable bei Einstauiteration [m]
ICHECK	: Steuervariable bei Einstauiteration
I _R	: Reibungsgefälle [-]
I _s	: Sohlgefälle [-]
J _{st}	: Wasserspiegelgefälle (stationäre Strömung)
K	: Retentionszeit [s]
KMFLAG	: Steuerungsparameter in KMROUT
K _{st}	: Rauigkeitsbeiwert nach Manning-Strickler [m ^{1/3} /s]
Q _A	: Abfluß [m ³ /s]
Q _{MAX}	: Maximalabfluß [m ³ /s]
Q _{st}	: stationärer Abfluß [m ³ /s]
QTOL	: Abbruchvariable bei Einstauiteration [m ³ /s]
Q _{Trocken}	: Trockenwetterabfluß [m ³ /s]
Q _{VOLL}	: Völlfüllungabfluß [m ³ /s]
Q _z	: Zufluß [m ³ /s]
Re	: Reynoldszahl [-]
r _{hy}	: Hydraulischer Radius [m]
SH	: Wasserstand [m], programminterne Bez. bei KMROUT
SV	: Speichervolumen [m ³], programminterne Bez. bei KMROUT

STAN : Prüfgröße zur Berechnung der Deviation zwischen zwei
Ganglinien [-].

t : zeitliche Koordinate

U : Benetzter Umfang [m]

V : Volumen [m³]

VOL : Prüfgröße zur Berechnung der Deviation zwischen zwei
Ganglinien [%].

VVOLL : VOLLfüllungsvolumen, Gesamtvolumen [m³]

\varnothing : Reibungsbeiwert nach Prandtl-Colebrook (kl. Lambda)

1. Einleitung

Die Kanalnetzberechnung mit Hilfe der sich immer weiter entwickelnden Microcomputer gewinnt in der heutigen Zeit für die Ingenieurwissenschaften (Bereich Urbanhydrologie) immer mehr an Bedeutung. Mit Hilfe der Rechnertechnologie werden große Datenmengen in kurzer Zeit verarbeitet.

Zur Anwendung bei der Abflußberechnung in Kanalnetzen städtischer Siedlungsräume gelangen entweder hydrologische oder hydrodynamische Simulationsmodelle.

In hydrodynamischen Simulationsmodellen wird das sogenannte Saint-Venant'sche Differentialgleichungssystem (Kontinuitätsbedingung und vollständige Bewegungsgleichung) gelöst. Der Anwender derartiger Modelle muß bei der Bereitstellung der Modellparameter jedoch sehr sorgfältig verfahren, da die hydrodynamischen Berechnungsansätze empfindlich auf die *falsche* Wahl der Parameter reagieren. Ohne eine genügende Kenntnis der Lösungsalgorithmen wird der Benutzer nicht in der Lage sein, sinnvolle Ergebnisse zu erzielen.

Neuere Studien zeigten (V. Huhn, 1992), daß die Berechnungsansätze hydrodynamischer Kanalnetzrechnungsmodelle (im Beispiel EXTRAN) für die Beschreibung der Fließvorgänge Einstau bzw. Überstau nicht unter allen Umständen das gewünschte Ergebnis zeigen.

In dieser Arbeit wird versucht, das hydrologische Kanalnetzrechnungsmodell KMROUT auf die Abflußberechnung unter Ein- und Überstaubedingungen zu erweitern. Das Ziel ist, eine Aussage darüber zu treffen, ob ein einfacher hydrologischer Ansatz in der Lage ist, diese Fließvorgänge genau genug zu erfassen.

Für die Bewertung werden die Ergebnisse der Abflußberechnung mit KMROUT denen von EXTRAN gegenübergestellt.

1.1) Beschreibung der verwendeten Programme

Neben dem im weiteren Verlauf des Berichtes noch genau beschriebenen Programm KMROUT, gelangen weitere Simulationsmodelle zum Einsatz. Insbesondere ist dies das zu Vergleichszwecken als Referenzmodell benutzte Programm EXTRAN. Ein Vergleich der Berechnungswerte von KMROUT mit natürlichen (gemessenen) Ganglinien findet nicht statt.

1.1.1) Das Abflußtransportmodell EXTRAN

EXTRAN ist ein hydrodynamisches Modell zur Berechnung des Transportes in der Kanalisation. Das Saint Venant'sche Gleichungssystem wird in EXTRAN durch ein explizites Differenzenverfahren (nach Euler) gelöst.

Der Standardparametersatz des Programmes EXTRAN wird für die Simulationsläufe nicht verändert. Wenn nicht anders angegeben, wird der Berechnungszeitschritt des Modells auf 5 [s] festgelegt.

Als weiteres Modell wird das Oberflächenabflußmodell HYSTEM zur Erstellung der Zuflußwellen in die Kanalisation eingesetzt.

1.1.2) Kurzbeschreibung des Modelles HYSTEM

HYSTEM ist ein hydrologisches Modell zur Simulation der Abflußbildung und Abflußkonzentration (Berechnung des Oberflächenabflusses). Die Berechnung erfolgt für jede Haltung getrennt nach angeschlossenen undurchlässigen und durchlässigen Flächen. Die folgenden Ansätze werden dabei für die Abflußbildung benutzt (L. Fuchs, H.R. Verworn; 1990):

- undurchlässige Flächen: Vorwegabzug der Benetzungs- und Muldenverluste nach der Grenzwertmethode (F. Sieker; 1987)
- durchlässige Flächen: Abzug der Benetzungs- und Muldenverluste, dann Infiltration nach Neumann

Ansatz für die Abflußkonzentration:

- Standardeinheitganglinie (R. Harms, H.R. Verworn; 1980)

Auch bei diesem Modell wird der Standardparametersatz angewendet.

1.2) Berechnungsgrundlagen zum Vergleich zweier Ganglinien

Zur Quantifizierung der Abweichungen zwischen zwei Ganglinien werden die Deviationen DEVS [%], DEVM [%], STAN [-] und VOL [%] berechnet (vgl. D. Grotehusmann, M. Semke; 1990).

1. Die Deviation DEVS [%]:

Die Deviation DEVS bezieht sich auf den maximalen Wert der Bezugskurve und berechnet sich nach Gleichung 1 (Zior, 1987). DEVS berücksichtigt insbesondere Abweichungen in Nähe des Maximalwertes. Zeitliche Verschiebungen wirken sich ebenfalls stark aus, da die Maximalwerte dann auch zu unterschiedlichen Zeitpunkten auftreten. Bei Deckungsgleichheit zweier Ganglinien berechnet sich die Deviation DEVS zu Null (A, Khelil; 1991).

$$\text{Gleichung 1: } DEVS = 200 * \sum_{i=1}^n |y_{1i} - y_{2i}| * \frac{y_{1i}}{n * y_{1max} * y_{1max}}$$

mit

- i : Zeitpunkt
- n : Anzahl der Vergleichswerte
- y₁ : Ordinate der Bezugskurve (hier Abflußganglinie nach EXTRAN)
- y_{1max} : Spitzenwert der oben bezeichneten Kurve
- y₂ : Ordinate der Vergleichskurve (Abflußganglinie nach KMROUT)

2. Die Deviation DEVM [%]:

Ritscher (1971) schlägt vor, die Deviation DEVS auf den Mittelwert zu beziehen (Gleichung 2):

$$\text{Gleichung 2: } DEVM = DEVS * \frac{y_{1max}}{y_{1m}}$$

mit

$$y_{1m} : \text{Mittelwert der Bezugskurve; } y_{1m} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n y_{1i}$$

3. Die Deviation STAN [-]:

Die modifizierte Standardabweichung STAN berechnet sich nach Gleichung 3 (Maniak, 1973):

$$\text{Gleichung 3: } STAN = \frac{R_o^2 - R^2}{R_o^2}$$

mit

$$R_o^2 : \text{Varianz der Bezugskurve. } R_o^2 = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (y_{1i} - y_{1m})^2$$

$$R^2 : \text{Mittelwert der quad. Abweichungen. } R^2 = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (y_{1i} - y_{2i})^2$$

Bei Übereinstimmung beider Kurven wird STAN zu 1.

4. Volumenvergleich VOL [%]:

Durch die Prüfgröße VOL werden die Volumenbilanzen zweier Ganglinien ausgedrückt. Sie berechnet sich nach Gleichung 4.

$$\text{Gleichung 4: } \text{VOL} = 100 * \frac{V_2 - V_1}{V_1}$$

mit

V_1 : Integralfläche unter der Bezugskurve. Bei Abflußganglinien entspricht die Integralfläche unter der Kurve dem Gesamtvolumen.

V_2 : Integralfläche unterhalb der Vergleichskurve.

Zur Bewertung der 4 Prüfgrößen werden folgende Wertebereiche angegeben (Maniak, 1973; Ritscher, 1971; Schultz, 1968; Zior, 1987):

Prüfgröße	Anpassung			
	sehr gut	gut	brauchbar	schlecht
DEVS [%]	0.....3	3.....10	10.....18	>18,00
DEVM [%]	0.....15	15.....30	30.....50	>50,00
STAN [-]	1,0..0,85	0,85..0,65	0,65..0,35	<0,35
VOL [%]	0.....5	5.....10	10.....15	>15,00

Tabelle 1: Wertebereich der Prüfgrößen

Mit Hilfe dieser Werte kann die Übereinstimmung zweier Ganglinien beurteilt werden.

2.) Einführung in die Berechnungsgrundlagen des Programmes KMROUT

Das Programm KMROUT ⁽¹⁾ ist ein detailliertes hydrologisches Kanalnetzrechnungsmodell, welches auf den Überlegungen von Euler (1973) basiert. Grundlage dieser Überlegungen sind die von Kalinin-Miljukov durchgeführten Untersuchungen zur Übertragung des Konzeptes linearer Einzelspeicher auf charakteristische Abschnitte eines Entwässerungssystems (A. Khelil, M. Semke; 1991). Eine ausführliche Abhandlung des Kalinin-Miljukov-Verfahrens wird in der Schriftenreihe der bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde (Heft 6, H.J. Rosemann, J. Vedral (1970)) dargestellt.

2.1 Das KALININ-MILJUKOV-VERFAHREN

Das Kalinin-Miljukov-Verfahren gehört (H.R. Verworn; 1980) zur Gruppe der gegliederten hydrologischen Verfahren. Ähnlich dem auch zu dieser Gruppe gehörendem Muskingum-Verfahren gibt es für die Berechnung des Abflusses zwei Parameter. Der Vorteil des Kalinin-Miljukov-Verfahrens gegenüber dem Muskingum-Verfahren ist, daß diese beiden Parameter, die charakteristische Länge eines Berechnungsabschnittes L und die Speicherkonstante K, aus der Geometrie des Systems direkt bestimmt werden können. Es müssen keine gemessenen Ganglinien vorliegen, wie es bei dem Muskingum-Verfahren ⁽²⁾ erforderlich ist. Der Abfluß kann bei dem Kalinin-Miljukov-Verfahren direkt bestimmt werden.

⁽¹⁾ Das Programm KMROUT wurde 1984 am Institut für Wasserwirtschaft der Universität Hannover von M. Semke geschrieben und 1991 von D. Grotehusmann modifiziert. Letzte Änderungen wurden von S. Deyda (1992) durchgeführt.

⁽²⁾ Die Parameter α und K des MUSKINGUM-VERFAHRENS können bei Vorhandensein einer Belastungsganglinie (Niederschlagsereignis) und Abflußganglinie durch Bestimmung der jeweiligen Schwerpunkte dieser Ganglinien bestimmt werden. Ohne die Vorausbestimmung dieser Parameter kann das Muskingum-Verfahren nicht durchgeführt werden.

Grundlage des Kalinin-Miljukov-Verfahrens ist die Kontinuitätsgleichung in der Form

$$\text{Gleichung 5:} \quad Q_z - Q_A = \frac{dV}{dt}$$

und eine Speichergleichung der Form

$$\text{Gleichung 6:} \quad dV = K \cdot dQ_A$$

Hierbei kann K als Zeit interpretiert werden, die das Volumen V benötigt um den betrachteten Gerinneabschnitt zu durchfließen.

Die Voraussetzung für diese Speichergleichung ist eine eindeutige Abfluß-Volumen-Beziehung (Abfluß-Wasserstands-Beziehung). Sie gilt deshalb nur bei stationären Fließverhältnissen, da es bei instationären Strömungen keine eindeutige Q-h Beziehung gibt. Die Abflußkurve stellt im Laufe eines Ereignisses für einen bestimmten Abschnitt eine Schleife dar.

Kalinin-Miljukov (vgl. Seus-Rösl; 1974) zeigten, daß die Wasserstände bezogen auf die eindeutige stationäre Abflußkurve sowohl beim Anstieg als auch beim Rückgang des Abflusses um ein Zeitintervall Δt später an einem Kontrollpunkt auftreten als diejenigen, die dem instationären Fließvorgang entsprechen (siehe Abbildung 1).

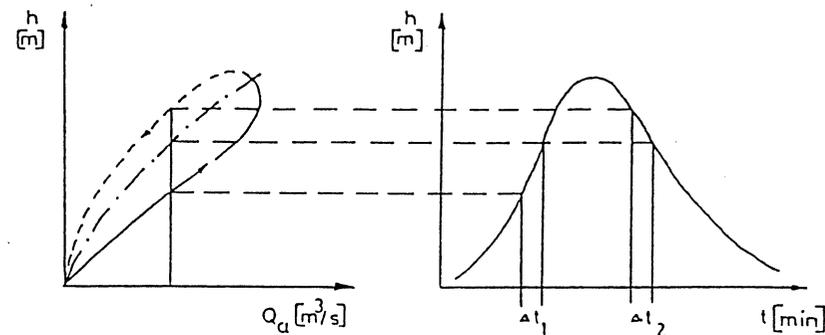


Abbildung 1: Darstellung der Abflußschleife

- : Wellenanstieg
- - - - -: Wellenabfall
- - - - -: stationäre Strömung

Wird nun vereinfachend angenommen, daß diese zeitliche Verschiebung einer eindeutigen räumlichen Zuordnung der Länge l entspricht, kann die Abflußschleife umgangen werden. Es besteht dann ein eindeutiger Zusammenhang des Wasserstandes h an der Stelle m und dem Abfluß Q_A an der Stelle r . Daß heißt, daß in einem Gerinneabschnitt der Länge $L = 2 \cdot l$ eindeutige Beziehungen zwischen dem Volumen V und dem Abfluß Q_A bestehen. Dieser Gerinneabschnitt der Länge $L = 2 \cdot l$ wird als charakteristischer Abschnitt bezeichnet. Abbildung 2 zeigt einen charakteristischen Abschnitt.

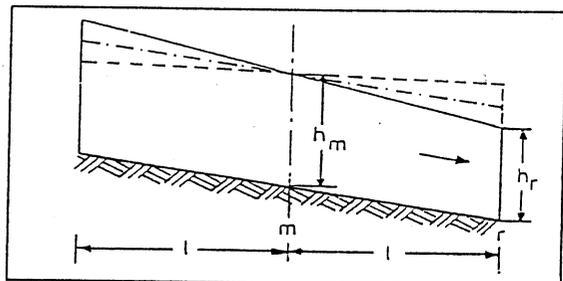


Abbildung 2: Wasserspiegellagen in einem charakteristischen Abschnitt für unterschiedliche Fließzustände (D. Grotehusmann, M. Semke; 1990)

- : Wellenanstieg
 - - -: Wellenabfall
 - - -: stationäre Strömung

Die charakteristische Länge L kann nach folgender Gleichung aus Größen in Abhängigkeit vom stationären Zustand bestimmt werden. Für die Herleitung der Gleichung 7 wird auf die Literatur⁽³⁾ verwiesen.

$$\text{Gleichung 7: } L = \frac{Q_{st} \cdot dh_{st}}{J_{st} \cdot dQ_{st}} \quad st: \text{stationär}$$

Da die Wasserstands-Abflußbeziehung nicht linear verläuft, muß die charakteristische Länge L als Mittelung verschiedener Durchflußzustände errechnet werden.

⁽³⁾ Bei H.J. Rosemann und J. Vedral (1970) wird die Herleitung der Gleichung ausführlich behandelt. Deshalb wird in diesem Bericht auf die Herleitung verzichtet. Dies scheint auch deshalb gerechtfertigt, da im Programm *KMROUT* die Halteungslänge gleich der charakteristischen Länge L gesetzt wird.

Untersuchungen von H.J. Rosemann, J. Vedral (1970) und R. Dickmann (1990) haben gezeigt, daß die Länge des charakteristischen Abschnittes keinen Einfluß auf die Berechnungsgenauigkeit des Kalinin-Miljukov-Verfahrens hat.

Das bedeutet, 'daß die in kleinen Abschnitten eines teilgefüllten Rohres (freier Wasserspiegel) ablaufenden Fließvorgänge in guter Näherung durch den linearen Einzelspeicher beschrieben werden' (A. Khelil, 1991).

Hiernach entspricht das Kalinin-Miljukov-Verfahren einer Aneinanderreihung charakteristischer Abschnitte der Länge L (entsprechend linearer Einzelspeicher). Der Abfluß des ersten Abschnittes $Q_{A,t}$ entspricht dem Zufluß des zweiten Abschnittes $Q_{Z,t}$.

Wird weiter vorausgesetzt, daß die eindeutige Volumen-Abfluß-Kurve in einem betrachteten Abschnitt der Länge L näherungsweise linear verläuft, kann die in Gleichung 6 definierte Retentionszeit K als Steigung dieser Kurve über den gesamten Füllungsbereich als konstant angenommen werden.

$$\text{Gleichung 8: } K = \frac{dV}{dQ_A} = \text{const.}$$

Unter weiterer Berücksichtigung der Kontinuitätsbedingung ergibt sich eine auf der Theorie des linearen Einzelspeichers aufbauende Differentialgleichung (H.J. Rosemann, J. Vedral; 1970), deren Lösung im folgenden dargestellt ist:

$$\text{Gleichung 9: } Q_A(T) = Q_A(0) \cdot e^{-\frac{T}{K}} + \frac{1}{K} \cdot e^{-\frac{T}{K}} \int_0^T e^{\frac{t}{K}} \cdot Q_Z(t) dt$$

Aufgrund der vereinfachenden Annahme, daß sich die Volumen-Abfluß-Kurve linear verhält, kann in der abschließenden Volumenbilanz ein Fehler erwartet werden. Die korrekte Lösung der Differentialgleichung wird bei A.Khelil, M. Semke (1991) gezeigt.

Aus Gleichung 9 ergibt sich unter der Annahme, daß sich in jedem Zeitintervall δt der Zufluß Q_z linear verändert die Arbeitsgleichung des Kalinin-Miljukov-Verfahrens:

$$\text{Gleichung 10: } Q_{A,t+1} = Q_{A,t} + c_1(Q_{z,t} - Q_{A,t}) + c_2(Q_{z,t+1} - Q_{z,t})$$

mit den Kalinin-Miljukov-Konstanten

$$c_1 = 1 - e^{-\frac{\delta t}{K}}$$

$$c_2 = 1 - \frac{K}{\delta t} c_1$$

Die Speicherkonstante K berechnet sich aus der Gerinnegeometrie und dem jeweiligen Füllungsgrad des Abschnittes zu:

$$\text{Gleichung 11: } K(Q_A) = K(Q(h)) = LB(h) \cdot \frac{dh}{dQ(h)}$$

Die vom Wasserstand h abhängige Größe $dh/dQ(h)$ kann für den stationären Abfluß aus tabellierten Kurven (ATV Arbeitsblatt A110, Lautrich Tabellen⁽⁴⁾) entnommen oder nach Fließformeln (Manning-Strickler) errechnet werden.

⁽⁴⁾ Bei den Lautrich Tabellen wird versucht, die in den Haltungsstrecken auftretende Luftreibung insbesondere im oberen Teilfüllungsbereich mit zu berücksichtigen. Sie sind im Gegensatz zu den Teilfüllungskurven in A110 über den ganzen Füllungsbereich definiert.

2.2) Abflußberechnung im Programm KMROUT

2.2.1) Programmstruktur und Datenfluß in KMROUT

Das komplette Simulationsprogramm KMROUT besteht aus den folgenden Einzelmodulen, die in der Programmiersprache FORTRAN 77 programmiert wurden:

Hauptprogramm:	KMROUT.FOR
Unterprogramme:	KMINIT.FOR
	KMRIND.FOR
	ZENTRA.FOR
	KMSUB1.FOR
	KMSUB2.FOR
Common-Blöcke:	KMROUT.CMN
Library:	DATMD4

In den Unterprogrammen (s.o.) werden zum Teil mehrere Subroutines zusammengefaßt. Die Steuerung des Berechnungsablaufes erfolgt im Hauptprogramm KMROUT.FOR. Anlage 1 enthält eine Kurzbeschreibung der einzelnen Unterprogramme.

Für die Simulation mit KMROUT müssen einige Eingabedateien bereitgestellt werden:

Wellendatei (z.B. Ausgabe von HYSTEM)	:	*.WEL
Parameterdatei (wird vom Vorprogramm eingelesen):		KMPAR.DAT
Kanalnetzdatei (wird vom Vorprogramm geprüft und ausgegeben als Datei INDAT) :		*.NET

Ein Beispiel der Parameterdatei KMPAR.DAT wird in Anlage 2 aufgeführt.

Die Ergebnisse der Abflußberechnung in KMROUT werden in den Dateien

Protokolldatei : KM.PRO
 Ausgabedatei mit Abflußganglinien : QGANGL
 Ausgabedatei mit Wasserstandsganglinien : HGANGL

ausgegeben.

Abbildung 3 zeigt den Datenfluß bei der Simulation:

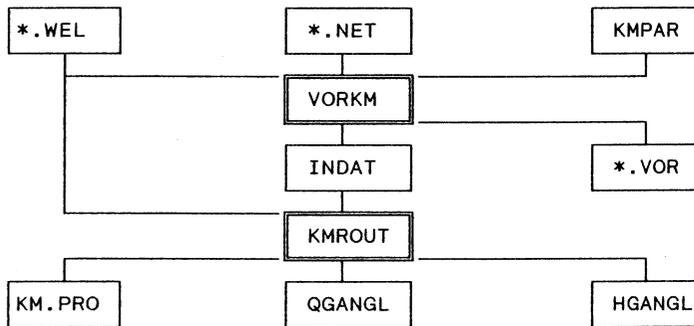


Abbildung 3: Datenfluß in KMROUT

2.2.2) Umsetzung des KALININ-MILJUKOV-Verfahrens

Grundsätzlich wird im Programm KMROUT zwischen zwei verschiedenen Berechnungsarten unterschieden. Diese Methoden werden als (S. Deyda; 1992)

- 1- *einfach-analytische Methode*
- 2- *einfach-graphische Methode*

bezeichnet.

2.2.2.1) Einfach-analytische Methode

Bei der einfach-analytischen Methode wird der Abfluß jeder Haltung in Anlehnung an das Kalinin-Miljukov Verfahren über Gleichung 10 berechnet. Um eine einfachere Handhabung der Gleichung zu gewährleisten, wird sie umgeformt zu:

$$\text{Gleichung 12: } Q_{A,t+1} = (1-c_1) * Q_{A,t} + (c_1-c_2) * Q_{z,t} + c_2 * Q_{z,t+1}$$

mit c_1 und c_2 entsprechend Gleichung 10

Auf die Bestimmung der charakteristischen Länge L wird verzichtet. Die Haltungslänge wird als charakteristischer Abschnitt angenommen. Diese Vereinfachung ist nach den Untersuchungen von H.J. Rosemann, J. Vedral (1970) und R. Dickmann (1991) zulässig.

Für die Bestimmung der Retentionszeit K wird im Programm KMROUT zwischen zwei Berechnungswegen unterschieden:

- > variable Retentionszeiten
- > mittlere Retentionszeit.

Variable Retentionszeiten: Bei Wahl dieses Berechnungsweges wird jeder Haltungsquerschnitt in maximal 50 Füllungsklassen aufgeteilt. Die Retentionszeit wird dann je nach Füllungsklasse (Retentionszeit für jede Füllungsklasse konstant) unter Benutzung der Teilfüllungskurven gemäß ATV Arbeitsblatt A110 berechnet (Gleichung 11). Untersuchungen von R. Dickmann (1991) zeigten, daß bei der Berechnung mit variablen Retentionszeiten die maximal mögliche Unterteilung der Querschnitte (50) zu wählen ist.

Mittlere Retentionszeit: Berechnung des Abflusses mit nur einer mittleren Retentionszeit. Es erfolgt keine Differenzierung in Füllungsklassen.

2.2.2.2) Einfach-graphische Methode

Der Unterschied zur Berechnung mit der einfach-analytischen Methode liegt in der Berücksichtigung der Speicherbeziehung.

In einem charakteristischen Abschnitt herrschen eindeutige Wasserstands-Abfluß Beziehungen (QH-Beziehung).

Gleichung 13: QH-Beziehung $Q_A = f_1(h)$

Werden zusätzlich Wasserstands-Volumen Beziehungen⁽⁵⁾ für jeden Abschnitt angegeben, kann der Abfluß direkt mit der diskretisierten Kontinuitätsgleichung (vgl. Gleichung 5) berechnet werden. Gleichung 14 wird nach den Unbekannten (linke Seite) aufgelöst.

$$\text{Gleichung 14: } \frac{V_{i+1}}{\delta t} + \frac{Q_{A,i+1}}{2} = \frac{Q_{z,i} + Q_{z,i+1}}{2} - \frac{Q_{A,i}}{2} + \frac{V_i}{\delta t}$$

Die linke Seite dieser Gleichung kann mit der QH- und der HV-Beziehung als Funktion in Abhängigkeit vom Wasserstand h ausgedrückt werden. Diese Gleichung wird als **HVQ-Beziehung** bezeichnet.

Die rechte Seite der Gleichung wird für jeden Zeitschritt aus den bekannten Werten bestimmt. Diesem so errechneten HVQ-Wert wird durch lineare Interpolation zwischen den gegebenen Wertepaaren ein eindeutiger Wasserstand zugeordnet, mit dem anhand der HV- und HQ-Beziehung eindeutige Speichervolumen und Abflußwerte errechnet werden.

⁽⁵⁾ Die Wasserstands-Volumen Beziehung (HV-Beziehung) wird direkt aus der vorhandenen Gerinnegeometrie bestimmt.

HV-Beziehung: $V = f_2(h)$

2.2.3) Gestaltung der Abflußberechnung

Die Steuerung der beiden Berechnungswege (vgl. 2.2.2.1 und 2.2.2.2) erfolgt in KMROUT über den Parameter KMFLAG⁽⁶⁾ in der Parameterdatei 'KMPAR.DAT' des Programmes.

Auf die Berechnungsergebnisse nach Wahl der einfach-analytischen Berechnungsart wird im Rahmen dieses Berichtes nicht eingegangen. Für Vergleichszwecke kann auf diverse Arbeiten zurückgegriffen werden (z.B. R. Dickmann; 1990).

Bei allen nachfolgenden Erweiterungen des Simulationsprogrammes auf die Fließbedingungen unter Einstau und Überstau wird die Abflußberechnung nach der einfach-graphischen Methode angewendet.

Ein weitere Möglichkeit, in die Simulation einzugreifen, stellt die Wahl des Berechnungszeitschrittes δt dar. In Anlehnung an das Oberflächenabflußmodell HYSTEM sollte er 60 Sekunden betragen. Es können jedoch kürzere Berechnungszeitschritte gewählt werden.

In der vorliegenden Version von KMROUT, zeigenhaltungen mit einem schwachen Sohlgefälle oder verengtem Querschnitt, in denen Rückstau eintritt, die Grenzen des Modells auf.

Die besonderen Fließbedingungen bei Ein- und Überstau können bei Wahl der Berechnungsvariante nach der einfach-graphischen Methode unter vereinfachten Bedingungen simuliert werden. Für diesen Zweck wird die Wasserstands-Abfluß-Beziehung, unter Beibehaltung der Steigung zwischen den letzten beiden Werten im Gültigkeitsbereich, in den Einstaubereich verlängert.

⁽⁶⁾ KMFLAG = 0; einfach-analytisches Verfahren, variable Retentionszeiten

KMFLAG = 1; einfach-analytisches Verfahren, konstante Retentionszeiten

KMFLAG = 2; einfach-graphisches Verfahren

Zur Zeit werden vom Programm KMROUT off-line-Pumpen und Speicherschächte als Sonderbauwerke erkannt. Bei vermaschten Kanalnetzen erfolgt die Durchflusaufteilung prozentual nach den möglichen Vollfüllungsleistungen der Rohre. Die Lage der Rohrleitungen bleibt bei der Durchflusaufteilung unberücksichtigt.

2.2.4) Simulationsergebnisse (einfach-graphische Methode)

Vorab werden einige Simulationsreihen mit dem beschriebenen Simulationsprogramm KMROUT durchgeführt, um die Ergebnisgenauigkeit bei Normalabfluß aufzuzeigen.

Als Kanalnetz für diese Simulationen wird ein synthetisches Netz, bestehend aus 15 Haltungen, benutzt. Die Haltungslängen betragen für jedes Rohr 100 [m], die angeschlossenen Flächen 0.5 [ha] pro Haltung (50% undurchlässig). Je nach Lage im Kanalnetz schwankt der Rohrdurchmesser zwischen 0.5 [m] und 1.0 [m]. Der Abfluß erfolgt über einen Freiauslaß.

Das Kanalnetz entspricht demjenigen, welches auch schon in vorangegangenen Untersuchungen (Anwendung der einfach-analytischen Berechnungsmethode) über die Ergebnisgenauigkeit von KMROUT eingesetzt wurde (R. Dickmann, 1990; D. Grotehusmann, M. Semke; 1990).

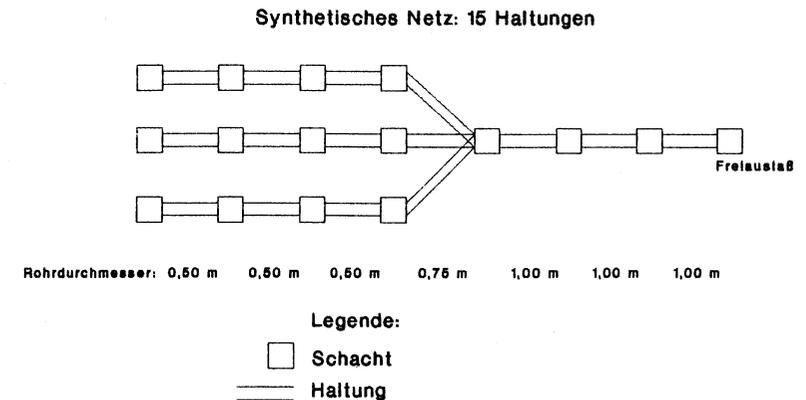


Abbildung 4: Grundriß des synthetischen Netzes

Der Parameter Sohlgefälle (konstant über das gesamte Netz) und der Berechnungszeitschritt werden variiert. Als Belastung dient ein Blockregen mit einer Intensität von 12mm/30min. Als Ergebnis werden die Abflußganglinien in der untersten Haltung erstellt. Die Deviationen zwischen den Ganglinien nach KMROUT und EXTRAN werden in Tabelle 2 aufgeführt.

dt [s]	Sohl- gefälle [%]	DEVS [%]	DEVM [%]	STAN [-]	VOL (EKTEST) [%]	REVOL (Vol-bilanz) [%]
60	20	0.68	3.07	1.00	-0.29	0.00
	10	0.65	2.93	1.00	-0.03	0.00
	5	0.64	2.82	1.00	0.03	0.00
	2	0.66	2.87	1.00	0.04	0.00
	1	0.64	2.74	1.00	0.06	0.01
	0,5	0.61	2.57	1.00	0.10	0.04
	0,3	0.46	1.92	1.00	0.20	0.13
	0,1	1.69	6.41	0.99	0.44	0.54 0.01*
	0,05 *	3.56	21.69	0.95	0.20	0.07
	0,01 *	6.68	31.94	0.80	4.83	0.88
	30	20	0.29	1.33	1.00	-0.28
10		0.29	1.31	1.00	-0.03	0.00
5		0.28	1.24	1.00	0.02	0.00
2		0.30	1.29	1.00	0.04	0.00
1		0.31	1.34	1.00	0.07	0.01
0,5		0.32	1.37	1.00	0.10	0.05
0,3		0.31	1.30	1.00	0.20	0.13
0,1		1.91	7.26	0.99	0.45	0.54 0.01*
0,05 *		3.63	22.10	0.95	0.20	0.07
0,01 *		6.49	31.04	0.81	4.83	0.88
20		20	0.17	0.79	1.00	-0.29
	10	0.19	0.84	1.00	-0.03	0.00
	5	0.17	0.75	1.00	0.02	0.00
	2	0.21	0.91	1.00	0.03	0.00
	1	0.26	1.13	1.00	0.07	0.01
	0,5	0.34	1.45	1.00	0.10	0.04
	0,3	0.35	1.46	1.00	0.19	0.13
	0,1	1.99	7.57	0.99	0.44	0.54 0.01*
	0,05 *	3.65	22.25	0.95	0.20	0.07
	0,01 *	6.43	30.75	0.81	4.83	0.88
	10	20	0.10	0.47	1.00	-0.30
10		0.14	0.62	1.00	-0.02	0.00
5		0.14	0.89	1.00	0.03	0.00
2		0.20	0.89	1.00	0.03	0.00
1		0.30	1.30	1.00	0.07	0.01
0,5		0.39	1.65	1.00	0.11	0.04
0,3		0.44	1.83	1.00	0.19	0.13
0,1		2.07	7.88	0.99	0.44	0.54 0.01*
0,05 *		3.67	22.39	0.95	0.20	0.07
0,01 *		6.37	30.46	0.81	4.83	0.88

*: Simulationszeitraum 4 Stunden

Tabelle 2: Deviationen zwischen EXTRAN und KMROUT
 Berechnungszeitschritt dt: 10, 20, 30 und 60 Sekunden
 Simulationszeitraum: 2 Stunden
 Gefälle: 20; 10; 5; 2; 1; 0,5; 0,3; 0,1; 0,05; 0,01 [%]

Als 'Revol' wird die Differenz zwischen dem gesamten Zuflußvolumen in das Netz und dem Gesamtvolumen der Abflußwelle am Freiauslaß bezeichnet (Volumenbilanz in KMROUT).

Die errechneten Deviationen liegen alle im Bereich 'sehr gut'. Eine Ausnahme bilden die Simulationen mit einem sehr flachen Sohlgefälle (<0.05 %). Das Modell KMROUT gelangt hier an seine Grenzen.

Die Wahl eines kürzeren Berechnungszeitschrittes beeinflusst die Ergebnissenauigkeit jedoch nicht maßgeblich. Die Abflußganglinien werden in Anlage 3 für den Berechnungszeitschritt dt=60 [s] dargestellt.

Der vorgestellte einfach-graphische Berechnungsansatz ist also gut in der Lage, die Fließvorgänge bei Normalabfluß nachzubilden.

3.) Erweiterte QH-Beziehungen für Fließvorgänge im Einstaubereich

In einer vorangegangenen Arbeit (Diplomarbeit A. Böger, 1992) wurde versucht, die QH-Beziehungen für den Sonderfall des Einstaus anhand statistischer Untersuchungen der Ergebnisse des hydrodynamischen Transportmodells EXTRAN zu erweitern.

Die Simulationen für diese Untersuchung wurden mit einer aus drei Haltungsstrecken bestehenden Kanalnetzdatei durchgeführt. Der Zufluß in das Kanalnetz erfolgte über den obersten Schacht.

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse dieser Ausarbeitung den Ergebnissen eigener Simulationen an größeren Kanalnetzen mit variabel gestalteten Zuflüssen in das Netz gegenübergestellt.

Es stellt sich vor allem die Frage, ob eine von der Lage der Haltungen im Kanalnetz und von der Art der Befüllung des Netzes unabhängige Betrachtungsweise der QH-Beziehungen zulässig ist.

Die Kernaussagen der Diplomarbeit von A. Böger⁽⁷⁾ sind:

- 1- Die QH-Beziehung im Einstaubereich wird maßgeblich vom Rohrdurchmesser und dem Haltungsgefälle beeinflusst.
- 2- Die QH-Beziehung im Einstaubereich verhält sich streng linear.
- 3- Die QH-Beziehung im Einstaubereich ist eindeutig.

⁽⁷⁾ Aus diesen Aussagen wurde in der Diplomarbeit folgender Vorschlag abgeleitet:

a) Tabellarische Auswertung der QH-Beziehungen in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser und dem Haltungsgefälle.

b) Anwendung dieser Tabellen auf die Simulation des Abflußtransports im Bereich des Ein.- bzw. Überstaus im Modell KHROUT.

3.1) Simulationsaufbau

Die Simulationen werden mit dem Abflußtransportmodell EXTRAN durchgeführt.

Das verwendete Kanalnetz (Netz 1) besteht aus 9 Haltungen (Anlage 4). Die genauen Angaben über die einzelnen Haltungsstrecken können Tabelle 3 entnommen werden.

Haltung	Schacht		Länge	Sohlgefälle	Rohrdurchm.	QVOLL ⁽⁸⁾
	oben	unten				
[-]			[m]	[%]	[m]	[m ³ /s]
1	1	2	100	1	0,50	0,378
2	2	3	100	1	0,50	0,378
3	3	7	100	1	0,50	0,378
4	4	5	100	1	0,50	0,378
5	5	6	100	1	0,50	0,378
6	6	7	100	1	0,50	0,378
7	7	8	100	1	0,65	0,755
8	8	9	100	1	0,65	0,755
9	9	10	100	1	0,65	0,755

Tab. 3: Haltungsdaten des Kanalnetzes (Netz 1)

Der Simulationszeitraum umfaßt 4 Stunden.

Um eine Abhängigkeit der QH-Beziehungen von der jeweiligen Lage der Haltungen im Kanalnetz und von der entsprechenden Wahl der Zuflußschächte in das Kanalnetz aufzuzeigen, werden vier Simulationsreihen durchgeführt.

⁽⁸⁾ QVOLL: Abflußleistung bei Vollfüllung des Rohres [m³/s].

Die Zuflußwellen (Anlage 5) in das Netz werden so bemessen, daß die untersuchten Haltungen des Kanalnetzes zunächst gleichmäßig befüllt werden und im Anschluß daran deutlich ein- bzw. überstauen.

Die Gesamtbelastung im Kanalnetz setzt sich für jede Simulationsreihe aus verschiedenen für den Abfluß im Netz verantwortlichen Teilkomponenten zusammen, so daß unterschiedliche Randbedingungen im Anschluß an die betrachteten einstauenden Haltungen simuliert werden können.

Es wird für verschiedene Netzteile ein konstanter Abfluß⁽⁹⁾ definiert.

Zusammenstellung der Belastungsfälle für die Simulationen:

Simulationsreihe 1: Zuflußwelle in alle Schächte.

Simulationsreihe 2: Zuflußwelle in Schacht 1,2 und 3.

Konstanter Abfluß in Haltung 4: 0,378 [m³/s]

Simulationsreihe 3: Zuflußwelle in Schacht 1,2 und 3.

Konstanter Abfluß in Haltung 4: 0,189 [m³/s]

Simulationsreihe 4: Zuflußwelle in Schacht 1,2 und 3.

Kein Abfluß in Haltung 4

⁽⁹⁾ Durch die Definition eines konstanten Abflusses in Haltung 4 wird ein gleichmäßiger Durchfluß in den Nachfolgehaltungen erreicht. Dieser gleichmäßige Durchfluß bewirkt, daß in Schacht 7, Zusammenfluß der Haltungen 3 und 6, verschiedenartige Belastungsfälle (Überlastungsfälle) simuliert werden können, deren Einwirkung auf die QH-Beziehungen in den Haltungen 1,2 und 3 überprüft wird.

Als Ergebnis dieser Simulationen werden die Wasserstands-Abfluß-Beziehungen für die Haltungen 1, 2 und 3 erstellt. Die Abflüsse in den Haltungen werden den Wasserständen am oberen Haltungsrand zugeordnet. Demnach gilt eine Haltung als eingestaut, wenn der Wasserstand im oberen Schacht über dem Rohrscheitel liegt.

3.2) Simulationsergebnisse

3.2.1) Allgemeine Simulationsergebnisse

Die Tabelle 4 zeigt Auszüge der EXTRAN-Ausgabedateien, denen die wichtigsten Simulationsergebnisse der untersuchten Haltungen (Haltung 1, 2 und 3) zu entnehmen sind.

HALTUNG	SCHACHT OBEN	SCHACHT UNTEN	PRO FEL HOEHE (M)	Q VOLL (M**3/S)	Q TROCKEN (M**3/S)	Q MAX (M/S)	ZEIT V HH.MM (M/S)	ZEIT MAX HH.MM (M)	WASSERTIEFE						ZEIT		
									UNTER		GELAENDE		MAX		HH.MM	HH.MM	

Simulationsreihe 1																	
1	1	2	.50	.378	.000	.378	.44	1.94	.38	2.00	2.00	.00	.00	114.00	113.00	.42	.42
2	2	3	.50	.378	.000	.387	.42	1.97	.42	2.00	2.00	.00	.00	113.00	112.00	.42	.43
3	3	7	.50	.378	.000	.395	.42	2.01	.42	2.00	2.00	.00	.00	112.00	111.00	.43	.44

Simulationsreihe 2																	
1	1	2	.50	.378	.000	.392	.57	2.00	.57	2.00	2.00	.00	.00	114.00	113.00	.57	.66
2	2	3	.50	.378	.000	.414	.57	2.11	.58	2.00	1.84	.00	.16	113.00	111.84	.66	.67
3	3	7	.50	.378	.000	.439	.67	2.24	.67	1.84	1.49	.16	.51	111.84	110.49	.67	.67

Simulationsreihe 3																	
1	1	2	.50	.378	.000	.400	.67	2.04	.67	1.38	1.26	.62	.74	113.38	112.26	.67	.67
2	2	3	.50	.378	.000	.431	.67	2.19	.67	1.26	.97	.74	1.03	112.26	110.97	.67	.67
3	3	7	.50	.378	.000	.461	.67	2.36	.67	.97	.48	1.03	1.52	110.97	109.48	.67	.67

Simulationsreihe 4																	
1	1	2	.50	.378	.000	.400	.67	2.04	.67	1.38	1.27	.62	.73	114.38	113.27	.67	.67
2	2	3	.50	.378	.000	.431	.67	2.19	.67	1.27	.98	.73	1.02	113.27	111.98	.67	.67
3	3	7	.50	.378	.000	.461	.67	2.38	.67	.98	.45	1.02	1.55	111.98	110.45	.67	.67

Tabelle 4: Aufbereitete EXTRAN-Ausgabedatei

Die Schächte, in denen der Wasserstand das Geländeniveau erreicht (Überstau), sind fett gekennzeichnet; nichteinstauende Schächte sind kursiv markiert.

Ein Vergleich der Werte in Tabelle 4 verdeutlicht, daß die Simulationsreihen 3 und 4 ähnliche Ergebnisse liefern. Der maximal erreichte Durchfluß in den Haltungen (Q MAX) liegt deutlich über dem Vollfüllungsabfluß der Rohre (Q VOLL). Bei beiden Simulationen staut kein Schacht über.

Anders als bei den Simulationsreihen 3 und 4, wird die Vollfüllungsleistung der Rohre bei Simulationsreihe 1 im Einstaubereich nur wenig überschritten. Der Grund hierfür ist der in allen Schächten gleichmäßig steigende Wasserstand, so daß sich kein größeres Wasserstandsgefälle (im Vergleich zum Sohlgefälle der Haltungen) einstellt. Der Wasserstand in allen Schächten erreicht bei Simulationsreihe 1 die Geländeoberfläche.

Bei allen Simulationen kann übereinstimmend festgestellt werden, daß der maximal erreichte Abfluß der Rohre (Q MAX) in den unteren Haltungsstrecken höher ist als der in den oberen.

Genauere Aussagen über den erreichten Maximalabfluß in Abhängigkeit vom Wasserstand geben die folgenden QH-Beziehungen.

3.2.2) Erstellung der QH-Beziehungen

In den Abbildungen 5 - 8 sind die QH-Beziehungen dargestellt, die aus den Simulationsreihen 1-4 für Haltung 2 ermittelt wurden.

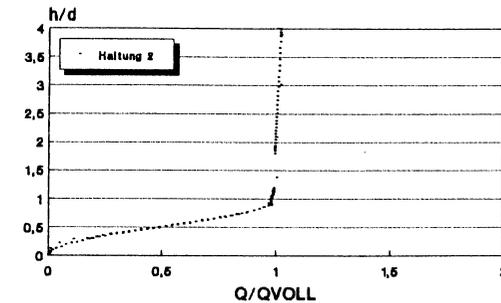


Abbildung 5: QH-Beziehung in Halt. 2 (Simulationsreihe 1)

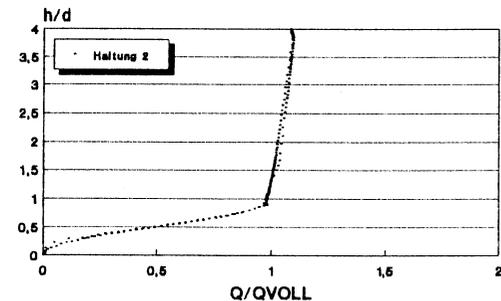


Abbildung 6: QH-Beziehung in Halt. 2 (Simulationsreihe 2)

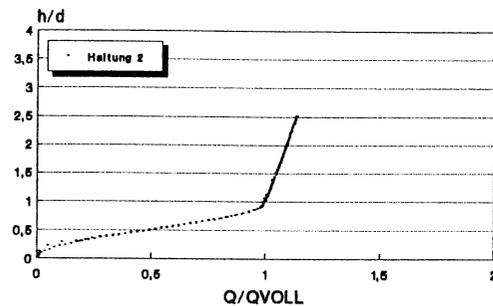


Abbildung 7: QH-Beziehung in Halt. 2 (Simulationsreihe 3)

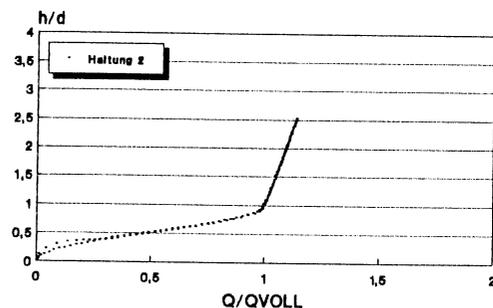


Abbildung 8: QH-Beziehung in Halt. 2 (Simulationsreihe 4)

Im Bereich bis zur Vollfüllung der Rohre ($Q/QVOLL = 1$) wird die Übereinstimmung aller QH-Beziehungen untereinander deutlich. Diese Beobachtung deckt sich mit den Ergebnissen der Diplomarbeit von A. Böger (1992).

Im Bereich über der Vollfüllung der Rohre, dem Einstaubereich, unterscheiden sich die QH-Beziehungen voneinander, obwohl die Gerin-negeometrie in allen Fällen übereinstimmt.

Daraus folgt, daß die Steigung der QH-Beziehung im Einstaubereich nicht nur von den Parametern *Haltungsgefälle* und *Rohrdurchmesser* beeinflusst wird, sondern auch der Parameter *'Überlastung der benachbarten Haltungen'* von Bedeutung ist.

Wie unter 3.2.1 beschrieben, zeigen die berechneten QH-Funktionen der Simulationsreihen 3 und 4 im Einstaubereich gleiche Ergebnisse. Die Funktion verhält sich im Einstaubereich linear und eindeutig.

Einen steileren Verlauf der QH-Funktion im Einstaubereich weist Simulationsreihe 2 auf. Durch den konstanten Abfluß (378 l/s, entsprechend der Vollfüllungsleistung) aus Haltung 4 steigt der Wasserstand auch in dem nicht durch eine Zuflußwelle beaufschlagten Schacht 7 deutlich über den Rohrscheitel an. Es kann sich kein erhöhtes Wasserstandsgefälle einstellen, so daß der Abfluß in Haltung 3 und somit auch in den Vorgängerhaltungen beschränkt bleibt.

Bei Simulationsreihe 2 fällt auf, daß die QH-Funktion im Einstaubereich nicht streng linear verläuft. Die Funktion ist nicht eindeutig, es wird ein Hysterisis-Effekt beobachtet.

Durch die gleichmäßige Befüllung aller Schächte verläuft die QH-Funktion bei Simulationsreihe 1 im Bereich über dem Rohrscheitel noch steiler als bei Simulationsreihe 2.

In Anlage 6 sind die QH-Funktionen der Haltungen 1 und 3 dargestellt. Es wird deutlich, daß bei der oberen Haltung 1 die QH-

Funktion eine größere Steigung als bei der weiter unten im Kanalnetz angeordneten Haltung 3 aufweist. Der Grund hierfür liegt in dem gegenüber der Wasserstandsänderung in Schacht 7 deutlicheren Anstieg des Wasserstandes in Schacht 2.

3.3) Diskussion der Ergebnisse

Die Untersuchung aller QH-Funktionen verdeutlicht, daß eine tabellarische Auswertung der QH-Funktion im Einstaubereich in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers und des Haltungsgefälles nicht möglich ist.

Auch verläuft die QH-Funktion im Einstaubereich nicht unter allen Belastungen streng linear. Besonders auffällig sind die Ergebnisse der Simulationsreihe 2, bei der der Wasserstand nicht eindeutig zu einem Durchfluß zuzuordnen ist.

Das Wasserstandsgefälle in den Haltungen beeinflusst maßgeblich den Verlauf der QH-Funktionen. Dieses Wasserstandsgefälle wird aber durch die Art der Befüllung (Befüllung im Schacht oben bzw. unten) variiert. Zudem kann der untere Schacht⁽¹⁰⁾ einer einstauenden Haltung durch einen anderen Netzteil belastet werden. Die Maximalabflüsse in der einstauenden Haltung werden dann begrenzt.

Für eine mögliche numerische Simulation der Fließvorgänge im Einstaubereich ist deshalb die Betrachtung des Wasserspiegelgefälles wichtig, da eine belastungsabhängige Gestaltung einer QH-Funktion im Einstaubereich unmöglich ist.

Diese Aussage soll im nächsten Kapitel gefestigt werden, in dem mittels einer für den Einstau erweiterten QH-Funktion der Abfluß in den Haltungen ohne Berücksichtigung des Wasserstandsgefälles bestimmt wird.

⁽¹⁰⁾ Siehe Schacht 7.

4.) Anwendung einer erweiterten QH-Beziehung im Modell KMROUT

4.1) Möglichkeiten für die programmtechnische Umsetzung

Grundsätzlich bieten sich für die programmtechnische Umsetzung einer für den Einstaubereich erweiterten QH-Beziehung für das Programm KMROUT zwei Wege an.

Die einfachste Möglichkeit ist, dem Programm für die Abflußberechnung unter den Fließbedingungen Ein- bzw. Überstau die Steigung der jeweils angewendeten QH-Funktion zur Verfügung zu stellen, um damit die entsprechenden Wertepaare der Wasserstands-Abfluß-Beziehung zu ermitteln.

Anschaulicher ist es jedoch, wenn im Programmablauf von KMROUT die QH-Funktion für den Einstaubereich⁽¹¹⁾ mit Hilfe der Fließformel von Manning-Strickler selbst erstellt wird.

$$\text{Gleichung 15:} \quad Q_A = A * k_{st} * (r_{hy})^{2/3} * (I_R)^{1/2}$$

mit:	Q_A	berechneter Abfluß [m ³ /s]
	A	durchflossener Querschnitt [m ²]
	U	benetzter Umfang [m]
	k_{st}	Rauhigkeitsbeiwert nach M-Strickler [m ³ /s]
	r_{hy}	hydraulischer Radius [m]; $r_{hy} = A/U$
	I_R	Reibungsgefälle [-]

Das Reibungsgefälle wird gleich dem Sohlgefälle gesetzt.

Um die Abflußberechnung nach der Fließformel von Manning-Strickler durchzuführen, muß ein Querschnitt definiert werden, der bis zur Geländeoberfläche reicht. Dies ist notwendig, da sonst im Einstaubereich keine Zuordnung eines Wasserstandes zu einem bestimmten Abfluß Q_A möglich ist.

⁽¹¹⁾ Diese Vorgehensweise entspricht dem bisherigen Programmablauf, bei dem für den Teilfüllungsbereich (Trapez- und Rechteckquerschnitt) die QH-Funktion mit Hilfe der Fließformel nach Manning-Strickler bestimmt wird. Bei den anderen Querschnittsformen werden die im ATV Arbeitsblatt A110 angegebenen wasserstandsabhängigen Abflüsse angewendet.

4.1.1 Einführung des Preissmann Slot's

Der sogenannte 'Preissmann Slot' wird eingeführt (A. Khelil, M. Semke; 1991). Mit Hilfe dieses Slot's wird jeder in der Realität geschlossene Querschnitt mit einem Schlitz am Scheitel des Rohres versehen, der bis zur Geländeoberfläche reicht. Um keinen zu großen Volumenfehler zu erhalten, muß der Schlitz jedoch sehr eng sein. Die Breite des 'Preissmann-Slot's' entspricht derjenigen, die in der Subroutine *HYDRAD* des Simulationsprogrammes *EXTRAN* definiert wird.

Abbildung 9 zeigt den Querschnitt am Beispiel eines Kreisprofils. Die Graphik ist liegend angeordnet, so daß die X-Achse der Profilhöhe, die Y-Achse der Profilbreite entspricht!

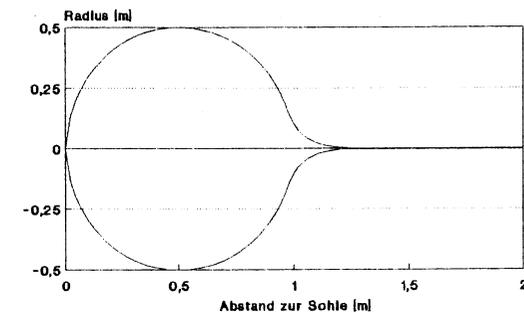


Abbildung 9: Kreisprofil mit 'Preissmann-Slot'

Zur Berechnung des Abflusses wird das Kreisprofil in 50 , der 'Preissmann Slot' in weitere 20 Abschnitte unterteilt. Um im Übergangsbereich vom Kreisprofil in den Schlitz einen Sprung der QH-Funktion zu vermeiden, wird für das gesamte Profil⁽¹²⁾ der Abfluß Q_A unter Anwendung der Fließformel nach Manning-Strickler in den

⁽¹²⁾ In der bisherigen Version von KMROUT wird für Ei-, Maul- und Kreisquerschnitte der Abfluß im Profil den Tabellen im ATV Arbeitsblatt A110 entnommen.

70 Teilschritten bestimmt. Für die Ermittlung der Wasserspiegelbreite im Kreisquerschnitt werden die Tabellenwerte des ATV Arbeitsblattes A110 verwendet, die Wasserspiegelbreite im Schlitz ist gleich der Querschnittsbreite des definierten 'Preissmann Slot's'.

Mit Hilfe der Wasserspiegelbreite in Abhängigkeit vom Wasserstand werden die der Gerinnegeometrie entsprechenden Werte für die jeweils durchströmte Fläche A [m²] und den benetzten Umfang U [m] bestimmt.

Der Rauigkeitsbeiwert k_{st} nach Manning-Strickler wird auf 76,92 [m^{1/3}/s] gesetzt. Dieser Wert entspricht dem in den USA gebräuchlichen Kehrwert des Manning-Strickler Wertes von 0,013 [s/m^{1/3}].

Die so ermittelte QH-Funktion wird in Abbildung 10 dargestellt.

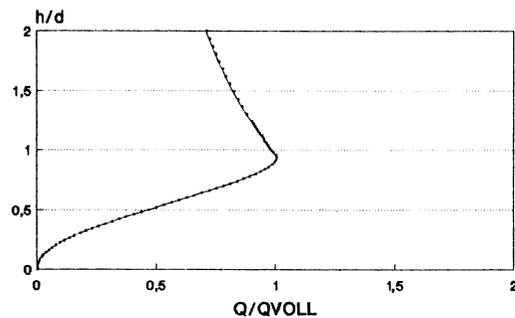


Abbildung 10: QH-Funktion unter Anwendung des 'Preissmann-Slot'

Die berechnete QH-Funktion zeigt im Teilfüllungsbereich den gewünschten Verlauf, im Einstaubereich geht die Abflußleistung jedoch unter den Vollfüllungswert zurück. Es läßt sich zwar jedem Wasserstand eindeutig ein Abfluß zuordnen, umgekehrt kann aber nicht jedem Abfluß eindeutig ein Wasserstand zugeordnet werden.

Der Verlauf der QH-Funktion im Einstaubereich begründet sich auf dem Ansatz von Manning-Strickler. Durch den hydraulischen Radius $r_{hy} = A/u$ wird in dem Ansatz die Wandreibung berücksichtigt. Im Schlitz wird auf diesem Weg, durch Erhöhung des benetzten Umfanges U und gleichzeitiger minimaler Veränderung der durchflossenen Querschnittsfläche A , die Wandreibung überbewertet.

Dadurch ergibt sich, daß mit einem rein hydrologischen Ansatz im Einstaubereich weitere Einschränkungen getroffen werden müssen.

4.1.2 Erweiterung des eingeführten Preissmann Slot's

Um eine Erhöhung des Abflusses gegenüber der Vollfüllungsleistung zu erreichen, muß der Schlitz erweitert werden. Durch die Erweiterung des Schlitzes wird aber ein Volumenfehler in den Haltungen erzeugt, da das Speichervolumen in den Haltungen aus dem Produkt der Querschnittsfläche A und der Haltungslänge L bestimmt wird. In Abbildung 11 wird ein erweitertes Profil gezeigt. Die Schlitzbreite entspricht 40% des Rohrdurchmessers.

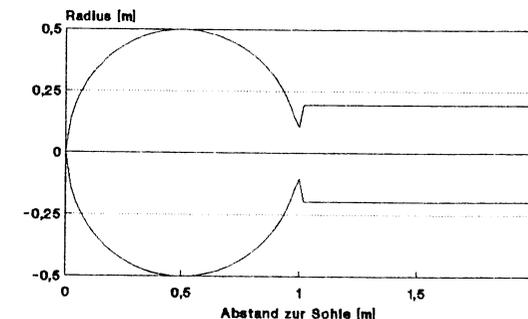


Abbildung 11: Erweitertes Kreisprofil

Die zu diesem Querschnitt gehörende Wasserstands-Abfluß-Beziehung kann der folgenden Abbildung entnommen werden.

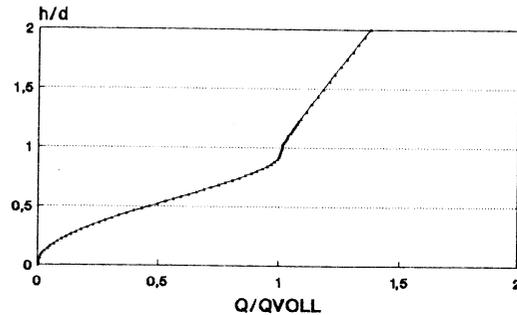


Abbildung 12: Wasserstands-Abfluß-Beziehung, erweitertes Profil

Diese berechnete QH-Funktion zeigt auch im Einstaubereich den gewünschten Verlauf. Mit Hilfe des Parameters 'Schlitzbreite' läßt sich die Steigung der QH-Funktion oberhalb des Wertes $Q/QVOLL = 1$ beliebig variieren. Eine Kalibrierung des Modells auf eine bestimmte Belastung in den Haltungen ist möglich, hat jedoch für andere Belastungsfälle keine uneingeschränkte Gültigkeit.

Aufgrund der stark erweiterten Schlitzbreite wird ein großer Volumenfehler in den Haltungsstrecken erzeugt. Ab einer Geländeüberdeckung von 2 Metern verdoppelt sich bei dem gezeigten Beispiel mit der Schlitzbreite von 40% des Rohrdurchmessers das in den Haltungen zur Verfügung stehende Speichervolumen. Auf mögliche Überstauungen kann aufgrund der Berechnungsergebnisse nicht geschlossen werden.

Obwohl das Berechnungsschema zur Erstellung einer erweiterten QH-Beziehung unter Anwendung des *breiten* Preissmann Slot's die aufgeführten Einschränkungen aufweist, wird er in das Programm KMR0UT implementiert. Der Parameter 'Schlitzbreite' zur Kalibrierung des Modells wird eingeführt.

In der folgenden Untersuchung wird das auf diese Art erweiterte Programm als KMR0UT1⁽¹³⁾ bezeichnet.

4.2 Berechnungsergebnisse des erweiterten Modells, KMR0UT1

Die Abflußberechnungen werden mit Netz 2 (Anlage 4) durchgeführt.

Haltung	Schacht		Länge	Sohl- gefälle	Rohr- durchm.	QVOLL ⁽¹⁴⁾
	oben	unten				
[-]			[m]	[%]	[m]	[m ³ /s]
1	1	2	100	3	0,50	0,657
2	2	3	100	1	0,50	0,378
3	3	4	100	3	0,50	0,657

Tabelle 5: Netzcharakteristika

Durch die Wahl des Netzaufbaues können Simulationen durchgeführt werden, bei denen nur Haltung 2 ein- beziehungsweise überstaut.

Hierdurch ist es leicht, eine Kalibrierung des Parameters 'Schlitzbreite' für die einstauende Haltung anhand der Ergebnisse von EXTRAN vorzunehmen.

Um eine Bewertung des erweiterten Programmes KMR0UT1 gegenüber der ursprünglichen Version von KMR0UT zu ermöglichen, werden die Abflußganglinien nach der Berechnung des Programmes KMR0UT1 mit denen des Urprogrammes verglichen. Zusätzlich findet ein Vergleich mit den Abflußganglinien nach EXTRAN statt.

⁽¹³⁾ Entspricht laut Aufgabenstellung Methodik 1.

⁽¹⁴⁾ QVOLL: Abflußleistung bei Vollfüllung des Rohres [m³/s].

Der Berechnungszeitschritt dt für die Simulationen mit KMROUT1 und KMROUT wird auf 10 [s] festgesetzt. Die Ganglinienausgabe erfolgt alle 60 Sekunden.

Simulationszeitraum: 2 Stunden

4.2.1 Abflußberechnung, Einstau in Haltung 2

Der Zufluß in das gewählte Kanalnetz erfolgt über Schacht 1. Die Zuflußwelle ist so gewählt, daß sich in Haltung 2 Druckabfluß einstellt. Das Wasserstandsniveau erreicht nicht die Geländehöhe.

Um eine möglichst realistische Gestaltung der QH-Funktion im Einstaubereich zu erhalten, wird vor der Berechnung der Abflüsse mit den Programmen KMROUT und KMROUT1 die QH-Beziehung (Abbildung 13) für Haltung 2 anhand der Berechnungsergebnisse von EXTRAN aufgestellt. Die Durchflüsse in Haltung 2 werden auf den Wasserstand im oberen Schacht bezogen.

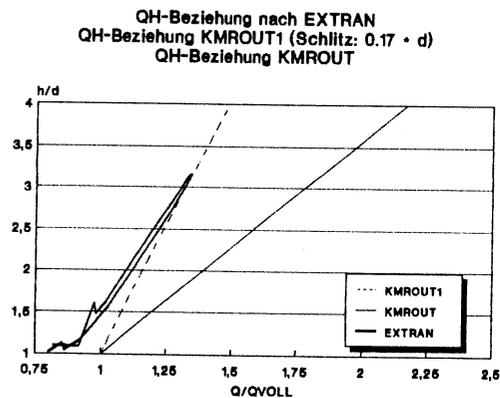


Abbildung 13: QH-Beziehungen, Haltung 2

Es zeigt sich, daß, anders als bei der Erstellung der QH-Funktionen in Kapitel 3.2.2, der Vollfüllungsabfluß ($Q/QVOLL = 1$) nicht bei dem zugehörigen Wasserstand ($h/d = 1$) eintritt. Dieses resultiert aus der ungleichmäßigen Befüllung des Netzes durch den ober-

sten Schacht der Kanalnetzdatei. Die Folge ist, daß der Wasserstand in Schacht 2 den Rohrscheitel schon erreicht (und somit einstaut), obwohl der Wasserstand im unteren Schacht der Haltung 2 noch nicht auf dem selben Niveau liegt. Es steht noch zusätzliches Speichervolumen in Haltung 2 zur Verfügung.

Die gestrichelte Linie in Abbildung 13 stellt die nach der Kalibrierung des Parameters 'Schlitzbreite' auf 17% des Rohrdurchmessers zu erwartende QH-Funktion zur Abflußberechnung in KMROUT1 dar. Die dünne durchgezogene Linie entsteht durch Fortführung der QH-Beziehung nach ATV Arbeitsblatt A110 in den Bereich über Vollfüllung mit der Steigung zwischen den letzten beiden Wertepaaren vor Erreichen des Einstaubereiches (15).

In Anlage 7 werden die Zuflußwelle (Zuflußwelle E) und die Abflußganglinien der Haltungen 1 und 3 aufgeführt. Abbildung 14 zeigt den Vergleich der Abflußganglinien in Haltung 2.

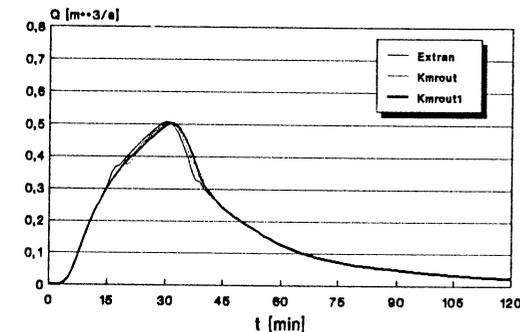


Abbildung 14: Vergleich der Abflußganglinien in Haltung 2

Obwohl die verwandten QH-Beziehungen in KMROUT und KMROUT1 einen unterschiedlichen Verlauf aufweisen, sind die berechneten Abflußganglinien fast deckungsgleich. Alle ermittelten Deviationen liegen im Bereich 'sehr gut' (Tabelle 6).

(15) Dieses Verfahren entspricht den vereinfachten Berechnungsgrundlagen des ursprünglichen Programmes KMROUT (vgl. Kapitel 2.2.3).

	DEVS [%]	DEVM [%]	STAN [-]	VOL [%]
Haltung 1 - KMROUT	0.55	1.71	1.00	-0.06
Haltung 1 - KMROUT1	0.54	1.68	1.00	-0.07
Haltung 2 - KMROUT	1.26	3.93	0.93	2.92
Haltung 2 - KMROUT1	1.52	4.74	0.99	0.03
Haltung 3 - KMROUT	1.17	3.62	0.97	2.47
Haltung 3 - KMROUT1	1.43	4.46	1.00	-0.04

Tabelle 6: Deviationen (EXTRAN-KMROUT / EXTRAN-KMROUT1)

Die maximalen Deviationen werden in der einstauenden Haltung 2 berechnet. Bei der Anwendung von KMROUT (Urversion) tritt in dieser Haltung ein Volumenfehler auf.

Die geringen zeitlichen Verschiebungen zwischen den Abflußganglinien können auf die unterschiedlichen QH-Funktionen zurückgeführt werden.

Bei gleichen Wasserständen in den Haltungen wird der Abfluß im Programm KMROUT1 kleiner berechnet als im Programm KMROUT. Die Änderung des Wasserstandes wird durch die Kontinuitätsbedingung

$$Q_z - Q_A = dV/dt$$

des Kalinin-Miljukov-Verfahrens beeinflußt (vgl. 2.1). Daraus folgt die zeitliche Verschiebung zwischen den Abflußganglinien nach KMROUT/KMROUT1, da der Zufluß Q_z in die Haltung und somit der Volumenzuwachs bei Beginn des Einstaus gleich ist. Durch den Volumenzuwachs in der Haltung steigt auch der Wasserstand an, der bei KMROUT jedoch auf einem niedrigeren Niveau als bei KMROUT1 liegen kann, um einen gleich hohen Abfluß aus der Haltung zu erzielen. Der Maximalabfluß wird deshalb bei KMROUT früher erreicht. In Abbildung 15 wird der Verlauf der Wasserstandsganglinien für Haltung 2 aufgeführt.

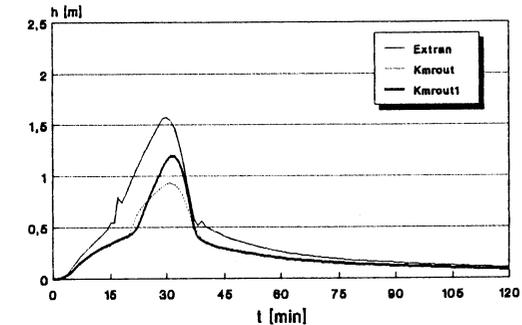


Abbildung 15: Wasserstandsganglinien Haltung 2

Ein erstes Ergebnis könnte nun sein, daß die Steigung der QH-Funktion im Einstaubereich möglichst klein zu wählen ist, um die zeitliche Verschiebung der Ganglinien zu minimieren. Der Schlitz bei der Programmversion KMROUT1 müßte dafür möglichst breit gewählt werden. Der entscheidende Fehler ist dabei jedoch, daß ein viel zu großes Speichervolumen in der Haltung bereitgehalten würde.

4.2.2.1 Abflußberechnung, Überstau in Haltung 2

Unter identischen Randbedingungen wie bei Punkt 4.2.1 wird durch Befüllung des Schachtes 1 mit einer höheren Zuflußwelle Haltung 2 zum überstauen gebracht. Die Schlitzbreite für das Programm KMROUT1 bleibt unverändert ($0.17 * d$). Die Zuflußwelle (Zuflußwelle \ddot{u}) und die Abflußganglinien der Haltungen 1 und 3 werden in Anlage 8 dargestellt.

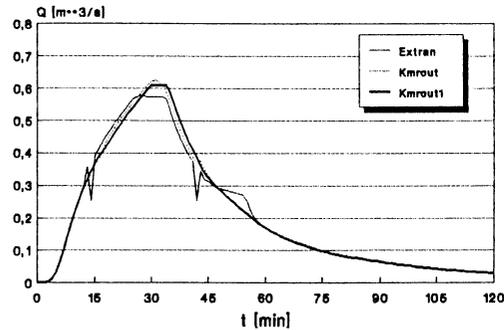


Abbildung 16: Vergleich der Abflußganglinien in Haltung 2

Zwischen den Ergebnissen nach EXTRAN-KMROUT-KMROUT1 kann wieder eine zeitliche Verschiebung beobachtet werden. Die Anpassung der Ergebnisse der beiden Versionen von KMROUT(1) an die Abflußganglinie nach EXTRAN gelingt nicht so gut wie bei der Berechnung unter Punkt 4.2.1. Tabelle 7 zeigt die Deviationen zwischen den Ganglinien dieses Simulationslaufes.

	DEVS [%]	DEVM [%]	STAN [-]	VOL [%]
Haltung 1 - KMROUT	0.47	1.42	1.00	-0.06
Haltung 1 - KMROUT1	0.47	1.40	1.00	-0.07
Haltung 2 - KMROUT	2.24	6.23	0.99	0.50
Haltung 2 - KMROUT1	2.82	7.85	0.99	0.49
Haltung 3 - KMROUT	2.42	6.77	0.99	0.89
Haltung 3 - KMROUT1	3.01	8.04	0.98	0.86

Tabelle 7: Deviationen (EXTRAN-KMROUT / EXTRAN-KMROUT1)

Durch die deutlichere zeitliche Verschiebung liegen die Deviationen DEVS und DEVM zwischen den Abflußganglinien nach KMROUT1 und EXTRAN höher als bei dem anderen Berechnungslauf mit dem unveränderten Programm KMROUT. Der Maximalabfluß bei der Simulationsreihe mit KMROUT1 liegt jedoch näher am Maximalwert, der durch EXTRAN errechnet wird. Die Abflachung der Abflußganglinie im oberen Bereich bei der Berechnung mit KMROUT1 zeigt zudem, daß Hal-

tung 2 überstaut. Bei der Berechnung mit der unveränderten Version von KMROUT tritt kein Überstau in Haltung 2 auf. Trotz der größeren Deviationen werden die Berechnungsergebnisse von KMROUT1 als höherwertig gegenüber denen der unveränderten KMROUT-Version eingestuft, da der Verlauf der Abflußganglinie einen realistischeren Verlauf zeigt.

4.2.2.2 Abflußberechnung, deutlicher Überstau in Haltung 2

Mit der gleichen Zuflußwelle 'Ü' (Anlage 8) wie unter Punkt 4.2.2.1 werden nun die Schächte 1 und 3 befüllt, um ein gleichzeitiges Ansteigen des Wasserstandes am oberen und unteren Rand der Haltung 2 hervorzurufen. Alle anderen Randbedingungen entsprechen wieder denen der vorangegangenen Simulationen.

Als Ergebnis der Untersuchungen über die QH-Funktionen im Einstaubereich wird zusätzlich noch eine Simulation mit dem Programm KMROUT1 durchgeführt, in der durch Verengung des Schlitzes (Schlitzbreite = 0.05 * d) die QH-Funktion im Einstaubereich einen fast senkrechten Verlauf aufweist. Der Maximalabfluß begrenzt sich in dieser Simulation auf einen Wert knapp über dem Vollfüllungsabfluß QVOLL. (Für die vergleichenden Abflußganglinien in Haltung 1 und 3 siehe Anlage 9)

Die folgende Abbildung 17 stellt die vergleichenden Abflußganglinien in Haltung 2 dar.

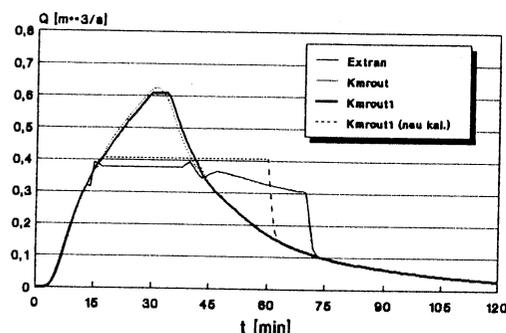


Abbildung 17: Vergleich der Abflußganglinien in Haltung 2

Ein Vergleich mit den Ergebnissen⁽¹⁶⁾ der vorangegangenen Simulation zeigt, daß die Abflußganglinien der Programmversion KMROUT und der nicht neu kalibrierten Version KMROUT1 (Schlitzbreite = $0.17 \cdot d$) bei beiden Berechnungen einen identischen Verlauf aufweisen. Der Maximalabfluß für Haltung 2, der bei dieser Simulation auf einem Wert von 390 l/s liegen sollte, wird um 220 l/s übertroffen.

Die Zuflußwelle in Schacht 3 beeinflusst das Berechnungsergebnis nicht. Es gelingt keine Anpassung der Abflußganglinien an das Berechnungsergebnis von EXTRAN. Die Deviationen zwischen den Ganglinien werden nicht aufgeführt, da sie alle im Bereich schlecht bis unbrauchbar anzuordnen sind.

Auch das Berechnungsergebnis des neu kalibrierten Programmes KMROUT1 zeigt nicht die gewünschte Übereinstimmung mit den Berechnungsergebnissen von EXTRAN. Lediglich der Maximalabflußwert wird durch den steilen Verlauf der QH-Funktion im Einstaubereich gut angenähert. Die berechneten Deviationen liegen im Bereich gut bis brauchbar (siehe Tabelle 8).

⁽¹⁶⁾ Die Ergebnisse werden auf die Abflußganglinien nach KMROUT und KMROUT1 bezogen und nicht auf die Ergebnisse der vorangegangenen EXTRAN-Simulation.

	DEVS [%]	DEVM [%]	STAN [-]	VOL [%]
Haltung 1 - KMROUT1 neu kalibriert	0.47	1.40	1.00	-0.06
Haltung 2 - KMROUT1 neu kalibriert	12.57	23.91	0.86	-0.16
Haltung 3 - KMROUT1 neu kalibriert	10.47	20.37	0.93	0.44

Tabelle 8: Deviationen (EXTRAN-KMROUT1, neu kalibriert)

4.3 Bewertung der Simulationsergebnisse mit der erweiterten QH-Beziehung

Die Simulationsergebnisse machen deutlich, daß es nicht möglich ist, auf dem Weg der Erweiterung der QH-Beziehung für den Einstaufall die Fließvorgänge im Ein- bzw. Überstaubereich zu erfassen.

Der Parameter 'Schlitzbreite', der zur Kalibrierung des Programmes KMROUT herangezogen werden sollte, hat kaum Auswirkungen auf die Berechnungsgenauigkeit im Einstaufall. Maßgeblich beeinflusst durch diesen Parameter wird jedoch der maximal bei Überstau mögliche Abfluß Q_A .

Die Tatsache, daß bei der Simulation unter Punkt 4.2.2.2 der Zufluß in Schacht 3 keinen Einfluß auf die Ergebnisse der Abflußberechnung in Haltung 2 hat, zeigt endgültig, daß die Abflußberechnung bei Ein- und Überstau unabhängig von der Betrachtung des Wasserstandsgefälles in den einstauenden Haltungen nicht möglich ist.

Ohne die Vorausbestimmung der belastungsabhängigen QH-Funktion kann die hydrologische Abflußberechnung im Einstaufall nicht durchgeführt werden. Aber gerade die Vorausbestimmung der QH-Funktion (z.B. mit EXTRAN) macht die hydrologische Abflußberechnung überflüssig.

Dieser Weg wird deshalb nicht weiter berücksichtigt.

Im folgenden Kapitel wird eine Möglichkeit aufgezeigt, wie die Fließvorgänge im Fall des Einstaus in Abhängigkeit des herrschenden Wasserstandsgefälles beschrieben werden können.

5.) Abflußberechnung bei Ein- / Überstau unter Berücksichtigung des Wasserstandsgefälles

Die bisherigen Untersuchungen zeigen, daß der Abfluß Q_A in den Haltungsstrecken bei Ein- bzw. Überstau maßgeblich vom Wasserstandsgefälle beeinflusst wird. Deshalb führt in diesen speziellen Fällen die Berechnung des Abflusses in alleiniger Abhängigkeit vom Sohlgefälle zu falschen Ergebnissen.

Im folgenden werden die Randbedingungen des Abflusses im Bereich über der Völlfüllung der Rohre näher analysiert. Ein Berechnungsschema für diese Sonderfälle der Abflußberechnung, in welchem das aktuelle Wasserstandsgefälle in den Haltungen Berücksichtigung findet, wird entwickelt.

5.1 Grundlagen zur Berücksichtigung des Wasserstandsgefälles

Die Abflußberechnung bei Einstau/Überstau basiert, entsprechend der programminternen Bestimmung der erweiterten QH-Beziehung (Kapitel 4.1), auf der Fließformel nach **Manning-Strickler**⁽¹⁷⁾:

⁽¹⁷⁾ Der Ansatz von Manning-Strickler wird aufgrund seiner einfachen Anwendung ausgesucht. Es ist jedoch auch möglich, den Ansatz nach DARCY-Weisbach

$$I_x = \phi \frac{v_A^2}{d_{hy} \cdot 2g}$$

mit der Bestimmung des Reibungsbeiwertes ϕ nach COLEBROOK-WHITE

$$\frac{1}{\phi} = -2 \log \left(\frac{2.51}{Re \cdot \phi} + \frac{k}{3.71 d_{hy}} \right)$$

auszuwählen. Auf diesen Ansatz wird im weiteren jedoch nicht näher eingegangen.

Gleichung 15: $Q_A = A * k_{st} * (r_{hy})^{2/3} * (I_R)^{1/2}$

mit:

Q _A	berechneter Abfluß [m ³ /s]
A	durchflossener Querschnitt [m ²]
U	benetzter Umfang [m]
k _{st}	Rauhigkeitsbeiwert nach M-Strickler [m ¹ /s]
r _{hy}	hydraulischer Radius [m]; r _{hy} = A/u
I _R	Reibungsgefälle [-]

Um den Einfluß des Wasserstandsgefälles bei der Abflußberechnung (Abflußtransport) näher zu beschreiben, wird die bei den hydrodynamischen Berechnungsansätzen zur Berücksichtigung der Impulserhaltung verwandte **vollständige BEWEGUNGSGLEICHUNG** herangezogen.

Gleichung 16:

$$\frac{1}{g} \frac{\delta v}{\delta t} + \frac{v}{g} \frac{\delta v}{\delta x} + \frac{\delta h}{\delta x} + I_R - I_s = 0$$

Term: 1 2 3 4 5

1	2	3	4	5
konvektive Beschleunigung		Wasserspiegelgefälle	Reibungsgefälle	Sohlgefälle
lokale Beschleunigung				

Ohne die Berechnungsgenauigkeit entscheidend zu beeinflussen, können der 1. und 2. Term der Gleichung vernachlässigt werden. Bei Vernachlässigung der ersten 3 Terme sind jedoch größere Abweichungen gegenüber den Ergebnissen mit der vollständigen Bewegungsgleichung zu erwarten (A. Khelil, M. Semke; 1991).

Die Bewegungsgleichung vereinfacht sich zu:

Gleichung 17:

$$\frac{\delta h}{\delta x} + I_R - I_s = 0$$

Term: 3 4 5

3	4	5
Reibungsgefälle		Sohlgefälle
Wasserspiegelgefälle		

Die vereinfachte Bewegungsgleichung wird nach dem Reibungsgefälle I_R aufgelöst und in die Fließformel nach MANNING-STRICKLER eingesetzt:

Gleichung 18: $Q_A = A * k_{st} * (r_{hy})^{2/3} * (I_s - \frac{\delta h}{\delta x})^{1/2}$

mit:

Q _A	berechneter Abfluß [m ³ /s]
A	durchflossener Querschnitt [m ²]
U	benetzter Umfang [m]
k _{st}	Rauhigkeitsbeiwert nach M-Strickler [m ¹ /s]
r _{hy}	hydraulischer Radius [m]; r _{hy} = A/u
I _s	Sohlgefälle [-]
$\frac{\delta h}{\delta x}$	Wasserstandsgefälle [-]

Die auf diesem Weg veränderte Fließformel nach Manning-Strickler ermöglicht es, den Abfluß Q_A in den Haltungen in Abhängigkeit des Wasserstandsgefälles zu beschreiben.

5.2.1) Randbedingungen bei Einstau in den Haltungen

Eine Haltung gilt als eingestaut, wenn der Wasserstand in ihr über dem Rohrscheitel liegt⁽¹⁸⁾. Im vorherigen Kapitel wurde versucht, durch Anordnung eines 'Preissmann-Slots' die aus den Ergebnissen mit EXTRAN gewonnenen QH-Beziehungen (QH-Beziehung im Einstaubereich) in den Haltungen nachzubilden.

⁽¹⁸⁾ Einstau nach der Definition in KNR0UT.

Hierbei wird ein entscheidender Fehler bei Bestimmung der durchflossenen Querschnittsfläche und somit auch des durchflossenen Volumens in den Haltungen erzeugt.

Die zusätzliche Fläche im Schlitz oberhalb des Rohrscheitels steht in der Realität nicht zur Verfügung. Obwohl das Programm EXTRAN auch das Hilfsmittel des 'Preissmann-Slots' benutzt, ist der Fehler dort nicht so bedeutend, da der Schlitz um ein vielfaches schmaler als in der Version bei KMROUT ist.

Das zusätzliche Speichervolumen durch den schmalen 'Preissmann-Slot' kann in EXTRAN dem Schachtvolumen⁽¹⁹⁾ zugeordnet werden.

Abbildung 18 zeigt anschaulich die Querschnittsflächen am Beispiel eines Kreisprofils.

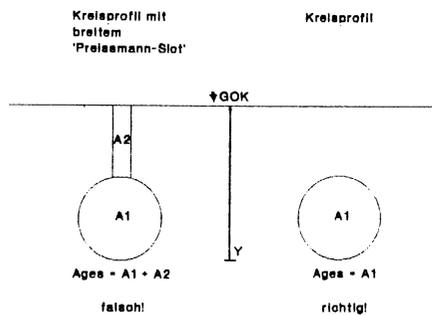


Abbildung 18: Querschnittsfläche im Kreisprofil

Das mögliche Speichervolumen in den Haltungen entspricht dem Produkt aus Querschnittsfläche $A_{ges} = A1$ des Profils und der Haltungs-länge L . Das vorhandene Speichervolumen in den Schächten ist um ein vielfaches kleiner als das mit dem breiten Schlitz (Fläche $A2$) erzeugte Speichervolumen und wird deshalb vernachlässigt.

⁽¹⁹⁾ Im Programm KMROUT werden die Schächte nicht berücksichtigt. Aus der Modellvorstellung des Programmes heraus handelt es sich um miteinander verbundene lineare Einzelspeicher (die Haltungen) ohne die Möglichkeit, die Schachfläche zu berücksichtigen.

Daraus wird deutlich, daß im Fall des Einstaus der Haltung (Wasserstand oberhalb des Rohrscheitels) **kein zusätzliches Speichervolumen** in dieser Haltung zur Verfügung steht.

Um dieses Kriterium zu erfüllen, muß der Zufluß in die Haltung (Qz_i) dem Abfluß aus dieser (QA_i) entsprechen. Das Ergebnis ist die Kontinuitätsbedingung zur Beschreibung der Fließvorgänge bei Einstau.

Gleichung 19: Kontinuitätsbedingung bei Einstau: $\Sigma Qz_i = \Sigma QA_i$

5.2.2) Erstellung eines Gleichungssystems zur Abflußermittlung

Um die Abflußberechnung bei Einstau in den Haltungen durchzuführen, wird auf Gleichung 18 zurückgegriffen.

Diese Gleichung wird nach dem Wasserstandsgefälle aufgelöst:

$$\text{Gleichung 20: } I_s - \frac{\delta h}{\delta x} = \left(\frac{Q_A}{A * k_{st} * (r_{hy})^{\frac{2}{3}}} \right)^2$$

Der Abfluß Q_A läßt sich aufgrund der Randbedingung bei Einstau durch den Zufluß (ΣQz) Qz in die Haltung ersetzen, so daß sich aus den bekannten Daten das aktuelle Wasserstandsgefälle in den Haltungen ermitteln läßt. Mit Hilfe des aktuellen Wasserstandsgefälles wird dann der Wasserstand in den einstauenden Haltungen errechnet.

Unter Anwendung der Kontinuitätsgleichung wird der Abfluß Q_A in der einstauenden Haltung bestimmt.

Die Lösung für die Abflußberechnung bei Einstau beruht also auf einem Gleichungssystem, bestehend aus einer Kontinuitätsbedingung ($\Sigma Q_z = \Sigma Q_A$) und der Fließformel nach Manning-Strickler.

Es handelt sich um ein vereinfachtes **St. Venant'sches Gleichungssystem**. Die rein hydrologische Abflußberechnung bei Freispiegelabfluß wird im Fall des Einstaus durch eine hydraulische Abflußberechnung ersetzt.

5.3) Umsetzung (Einstaualgorithmus) in KMROUT

Eine iterative⁽²⁰⁾ Berechnung der Abflüsse im Fall Einstau/Überstau wird durchgeführt.

Dabei wird nach folgendem Schema vorgegangen:

-1- Berechnung der Wasserstände für alle Haltungen i zum Zeitschritt n (HVQ-Beziehung siehe Kapitel 2.2.2).

-2- Überprüfung, ob die mit Hilfe der HVQ-Beziehung ermittelten Wasserstände über dem Rohrscheitel liegen.

-3a- Kein Einstau:

Ermittlung der Abflüsse Q_{A_i} aus der Wasserstands-Abfluß-Beziehung und der Speichervolumen S_{V_i} aus der HV-Beziehung.

-3b- Einstau:

Im Fall des Einstaus werden die Haltungsabflüsse Q_{A_i} mit der Kontinuitätsbedingung (Gleichung 19) berechnet. Die Bestimmung des Wasserstandes geschieht unter Anwendung von Gleichung 20 (Wasserstandsgefälle in Abhängigkeit von Zufluß ΣQ_z bzw. ΣQ_A).

⁽²⁰⁾ Die iterative Berechnung der Abflüsse kann in EXTRAN optional zur Abflußberechnung als eine Möglichkeit ausgewählt werden. Die iterative Berechnung in KMROUT wird der iterativen Berechnung in EXTRAN angepaßt.

Mit dem Wasserstandsgefälle wird der Wasserstand SH_i aus dem nächst unterhalb gelegenen staufreien Rohr in die einstauende Haltung 'hochgezogen'. Da sich der Wasserstand in der unterhalb gelegenen Haltung durch die neue Bestimmung des Abflusses Q_{A_i} aus der einstauenden Haltung ändert, wird eine iterative Fortführung der Berechnung nötig. Die Iteration wird durch setzen der Variablen *ICHECK* auf 'R' gestartet. Das Speichervolumen S_{V_i} in der eingestauten Haltung entspricht dem Vollfüllungsvolumen $VVOLL_i$.

-3c- Überstau:

Festsetzen des Wasserstandes SH_i auf Geländeniveau. Berechnung des Abflusses Q_{A_i} mit Gleichung 18 (durchströmte Fläche A = gesamte Querschnittsfläche, benetzter Umfang U = Umfang des vollgefüllten Querschnittes). Das Wasserstandsgefälle für die Abflußberechnung wird aus dem für den unterhalb der überstauenden Haltung berechneten Wasserstand und dem Wasserstand in der überstauenden Haltung selbst (Geländeniveau) ermittelt. Da durch die Neuberechnung des Abflusses Q_{A_i} auch der Wasserstand unterhalb der überstauenden Haltung beeinflusst wird, muß auch hier eine Iteration durchgeführt werden. Die Variable *ICHECK* wird auch für überstauende Haltungen auf 'R' gesetzt. Das neue Speichervolumen S_{V_i} in der überstauenden Haltung wird mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung des Kalinin-Miljukov-Verfahrens (Gleichung 5) berechnet. Die Differenz zwischen dem so erhaltenen Speichervolumen S_{V_i} und dem Vollfüllungsvolumen $VVOLL_i$ der Haltung entspricht dem Überstauvolumen aus der Haltung.

-4- Alle Haltungen i auf die Steuerungsvariable der Einstauiteration *ICHECK* = 'R' überprüfen. Wenn keine Haltung einstaut, Weiterrechnung zum Zeitschritt $(n+1)$.

-5- Ein- bzw. Überstau, Rückwärtsrechnung:

Aktualisierung der Wasserstände SH_i in allen Nachfolgerohren einer ein- oder überstauenden Haltung (HVQ-Beziehung).

Neubestimmung der Wasserstände in den ein- bzw. überstauenden Haltungen: Beginnend mit dem unterhalb der ein- bzw. überstauenden Haltung gelegenen Rohr wird der Wasserstand in den betreffenden Haltungen, mit Hilfe der Gleichung 20 und den aktuellen Wasserständen in den staufreien Rohren, neu bestimmt. Dieser Prozeß wird als **Rückwärtsrechnung** bezeichnet. Bei mehreren, nicht zusammenhängenden einstauenden Haltungen wird mit der untersten im Netz begonnen. Bei mehreren zusammenhängenden Haltungen wird wie bei einer einfachen Haltung verfahren mit der Besonderheit, daß der Wasserstand SH_i über alle stauenden Rohre von unten herauf aus der nächst gelegenen staufreien Haltung 'hochgezogen' wird.

-6- Vorwärtsrechnung:

Bei der Vorwärtsrechnung wird mit dem **oberhalb** der ein- bzw. überstauenden Haltung gelegenen Rohr begonnen. Für diese als Vorgängerhaltung bezeichnete Strecke wird der Abfluß in Abhängigkeit des Wasserspiegelgefälles (Gleichung 18, Fließformel nach M.Strickler) ermittelt, welches aus dem Wasserstand in der Vorgängerhaltung selbst und dem Wasserstand in der unterhalb gelegenen ein- bzw. überstauenden Haltung bestimmt wird. Das Wasserstandsgefälle kann negativ werden, so daß es zu einem Fließrichtungswechsel kommen kann. Die für die Abflußberechnung benötigten Werte A (durchströmte Fläche) und U (benetzter Umfang) werden vereinfachend auf den jeweils vollgefüllten Querschnitt bezogen.

Berechnung des Abflusses Q_{A_i} und Speichervolumen SV_i in den ein- und überstauenden Haltungen wie unter Punkt 3b und 3c.

Abbildung 19 zeigt zur Veranschaulichung einen Längsschnitt durch 3 Haltungen, in der sowohl die Rückwärtsrechnung (Punkt 5) zur Bestimmung der aktualisierten Wasserstände SH_i , als auch die Vorwärtsrechnung (Punkt 6) zur Neuberechnung der Abflüsse Q_{A_i} , graphisch für den Fall des Einstaus (erster Iterationsschritt) dargestellt werden.

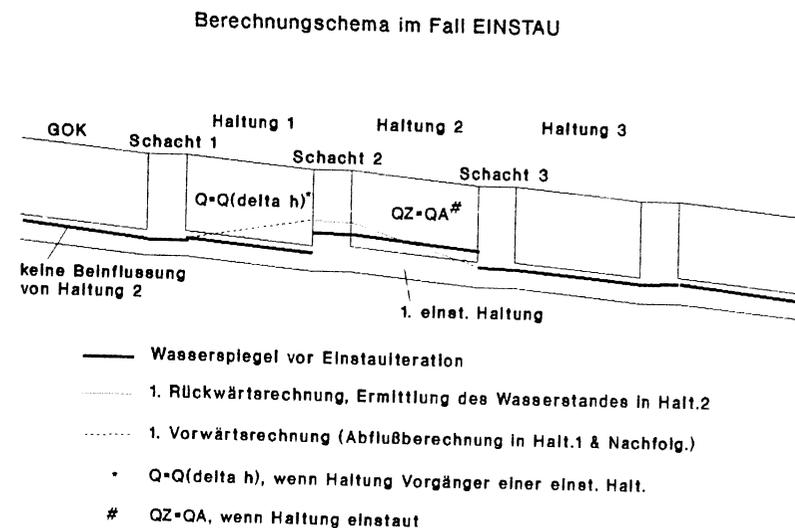


Abbildung 19: Längsschnitt durch eine eingestaute Haltung

-7- Abbruchkriterien überprüfen:

Die Änderung des Wasserstandes SH_i in allen Neuberechneten Haltungen liegt unter einem anzugebenden Grenzwert => stabiler Abbruch.

Die Änderung des Abflusses Q_{A_i} in allen Neuberechneten Haltungen liegt unter einem anzugebenden Grenzwert => stabiler Abbruch.

Der Ansatz konvergiert nicht => instabiler Abbruch, Bildung eines Mittelwertes aus den letzten beiden Iterationswerten für den Wasserstand SH_i und den Abfluß QA_i .

Die maximale Anzahl an Iterationsschritten ist durchgeführt (maximale Anzahl an Iterationsschritten ist frei wählbar) => instabiler Abbruch, Bildung eines Mittelwertes aus den letzten beiden Iterationswerten für den Wasserstand SH_i und den Abfluß QA_i .

-8- Wenn die Abbruchkriterien erfüllt werden, wird zum Zeitschritt (n+1) weitergerechnet.

Falls kein Abbruch erfolgt, wird die Iteration mit Punkt -5- (Rückwärtsrechnung) bis zur Erfüllung eines Abbruchkriteriums fortgeführt.

Das gesamte Schema der Abflußberechnung bei Freispiegelabfluß als auch bei der Abflußberechnung unter den Fließbedingungen Ein- und Überstau wird auf der nächsten Seite in Abbildung 20 aufgeführt.

Das so erweiterte Programm wird in den folgenden Beschreibungen der Berechnungsergebnisse als KMR0UT2⁽²¹⁾ bezeichnet.

⁽²¹⁾ Entspricht in der Aufgabenstellung Methodik 2

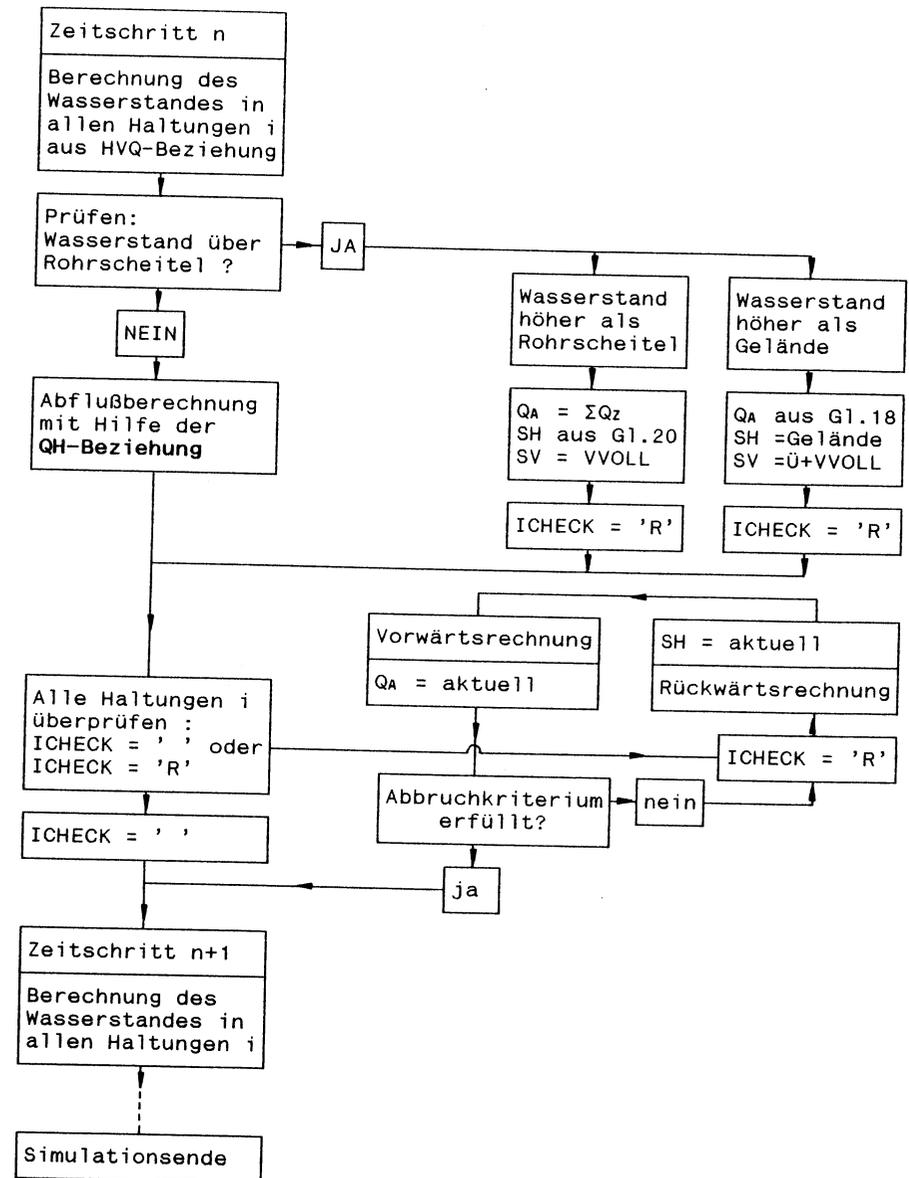


Abbildung 20: Berechnungsablauf in KMR0UT2

6.) Berechnungsergebnisse unter Anwendung des Wasserstandsgefälles

6.1) Erste Simulationen zur Programmüberprüfung

Zur Überprüfung des Simulationsprogrammes KMROUT2 wird eine Simulation durchgeführt, deren Randbedingungen denen im Kapitel 4.2.1 entsprechen. Es wird wiederum das Kanalnetz 2 (Anlage 4) ausgewählt.

Zur Veranschaulichung werden in der folgenden Tabelle noch einmal die Netzparameter aufgeführt.

Haltung	Schacht		Länge	Sohl- gefälle	Rohr- durchm.	QVOLL
	oben	unten				
[-]			[m]	[%]	[m]	[m³/s]
1	1	2	100	3	0,50	0,657
2	2	3	100	1	0,50	0,378
3	3	4	100	3	0,50	0,657

Tabelle 9: Netzcharakteristika

Die Füllung des Kanalnetzes erfolgt über Schacht 1. Als Belastung wird die in Anlage 7 aufgeführte Zuflußwelle E ausgewählt. Der Simulationszeitraum beträgt 2 Stunden.

Die folgenden Parameter (Tabelle 10) werden für alle Simulationen mit KMROUT2 angenommen, sofern nicht ausdrücklich andere Werte angegeben werden.

Berechnungszeitschritt dt	10 [s]
Manning-Strickler-Beiwert k_{st}	76,92 [m ^{1/3} /s]
Maximale Anzahl der Iterationen	10 [-]
QTOL, Abflußtoleranzwert	0,001 [m³/s]
HTOL, dto. Wasserstand	0,1 [m]

Tabelle 10: Standardparameter KMROUT2

Da nach dem Berechnungsansatz in KMROUT2 auch die der einstauenden Haltung vorangestellte Haltung im Iterationsprozeß neu berechnet wird, führen die folgenden Darstellungen sowohl die Abflußganglinien in Haltung 1 als auch in der einstauenden Haltung 2 auf.

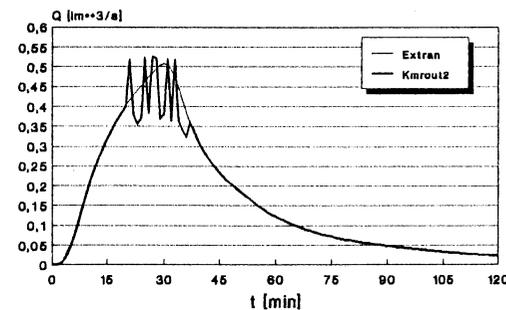


Abbildung 21: Abflußganglinie in Haltung 1

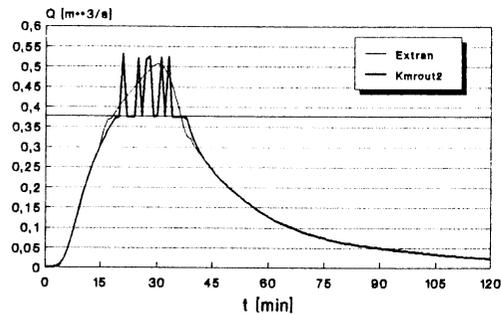


Abbildung 22: Abflußganglinie in Haltung 2

Es zeigt sich, daß nach Erreichen der Vollfüllungsleistung (378 l/s) in Haltung 2 bei Einsetzen des Iterationsprozesses deutliche Schwingungen in den Abflußganglinien auftreten.

Da bei der Untersuchung der Quellcodes des Programmes keine Programmierfehler nachgewiesen werden konnten, werden alle einzelnen Berechnungswerte während der Iteration in einer Handrechnung nachvollzogen. In Abbildung 23 erfolgt eine Gegenüberstellung der Iterationswerte zwischen dem 144'ten und dem 148'ten Zyklus des Rechenganges (Ganglinien Ausgabe nach 24 [min] Simulationszeit) mit den entsprechenden Werten der Ganglinienausgabe für Haltung 1⁽²²⁾. Zu Vergleichszwecken werden zusätzlich zu der Ganglinienausgabe mit einem Zeitschritt von 60 [s] noch die Ausgabewerte bei der Ganglinienausgabe nach jedem Berechnungszeitschritt (also 10 [s]) aufgelistet.

⁽²²⁾ Es wird noch einmal darauf hingewiesen, daß Haltung 1 in diesem Berechnungslauf **nicht** einstaut. Die Haltung wird jedoch, da sie Vorgängerhaltung einer einstauenden Haltungsstrecke ist, mit in den Iterationsprozeß einbezogen. Der Grundgedanke für die Einbeziehung der Haltung 1 in den Iterationsprozeß ist, daß das durch den Einstau in Haltung 2 nicht mehr abfließende Wasser zunächst in Haltung 1 zwischengespeichert wird.

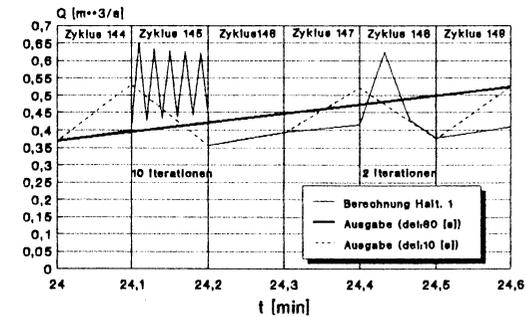


Abbildung 23: Iterationsverlauf in Haltung 1 (Durchflüsse)

Die Analyse der Iterationswerte in Zyklus 145 macht deutlich, daß der Abfluß aus Haltung 1 zu Beginn der Iteration (erste Abflußberechnung nach Manning-Strickler) sprunghaft ansteigt. Der nach Manning-Strickler errechnete Wert liegt 100% über dem Abflußwert der Berechnung nach der HVQ-Beziehung. Dieses ungünstige Zusammenspiel zwischen der Abflußberechnung nach Manning-Strickler und der Abflußberechnung mit Hilfe der HVQ-Beziehung ist Auslöser für die beobachtete Schwingung in der Ganglinienausgabe.

Der Grund für den ungünstigen Übergang zwischen den Berechnungen liegt in der fehlenden Berücksichtigung des aktuellen Wasserstandes in der 'Vorgängerhaltung' bei Bestimmung der Querschnittswerte (vgl. 5.3; -6- Vorwärtsrechnung). Ein Vergleich mit den Wasserständen in Haltung 1 zeigt, daß zu Beginn der Iteration der Wasserstand 0,25 [m] beträgt. Das Rohr ist also nur zu 50% gefüllt.

Im Iterationsprozeß wird jedoch davon ausgegangen, daß der Wasserstand in den Vorgängerhaltungen eines einstauenden Rohres fast den Rohrscheitel erreicht. Es wird vereinfachend mit den Vollfüllungswerten des Querschnittes gerechnet (100% Füllung). Daraus erklärt sich, daß bei Übergang zur Abflußberechnung nach Manning-Strickler der Abfluß aus Haltung 1 verdoppelt wird, da auch die Querschnittswerte von 50% des maximalen Füllungsgrades auf die Vollfüllungswerte gesetzt werden.

6.1.1) Änderung des Iterationsprozesses

Der Iterationsprozeß wird insofern geändert, als die Berechnung bei Neubestimmung des Abflusses Q_A aus einer 'Vorgängerhaltung' auf die Querschnittsflächen (durchflossener Querschnitt A und besetzter Umfang U) bezogen wird, die sich aus dem aktuellen Wasserstand in der Haltung ergeben.

Dafür wird im Quellcode des Programmes ein Feld definiert, in dem die wasserstandsabhängigen Werte für die Größen A und U haltungsweise abgespeichert werden, so daß der Zugriff auf diese im Berechnungsablauf ständig ohne größeren Zeitverlust erfolgen kann.

6.2) Simulationen mit dem erneuertem Programm KMROUT2

6.2.1) Simulation mit Netz 2, Haltung 2 staut ein

Die unter Kapitel 6.1 beschriebene Simulation wird mit der korrigierten Version KMROUT2 erneut durchgeführt. Die Abbildungen 24 und 25 zeigen die Abflußganglinien in den Haltungen 1 und 2.

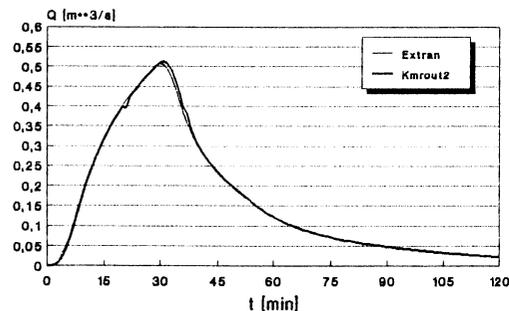


Abbildung 24: Abflußganglinie aus Haltung 1, 'Vorgängerhaltung'

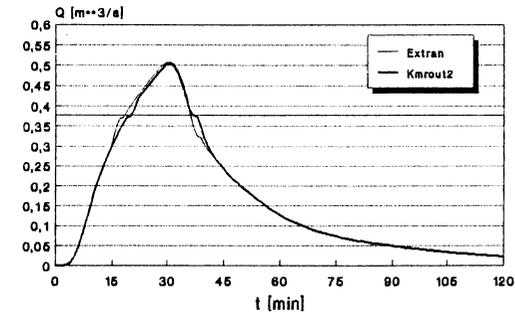


Abbildung 25: Abflußganglinie aus Haltung 2; 'einstauende Halt.'

Es zeigt sich, daß durch Änderung der Abflußberechnung in der 'Vorgängerhaltung', die Schwingungen nach dem Erreichen der Vollfüllungsleistung (378 l/s) in Haltung 2 nicht mehr auftreten. Die Abflußganglinien in den Haltungen bei der Berechnung mit EXTRAN und KMROUT2 sind fast deckungsgleich. Der Ansatz in KMROUT2 erweist sich aber als träger, welches eine geringe zeitliche Verschiebung der Ganglinien zu Beginn der 'Einstauberechnung' zur Folge hat.

Haltung / Modus ⁽²³⁾	DEVS [%]	DEVM [%]	STAN [-]	VOL [%]
Haltung 1 'Vorgäng.'	0.55	1.82	1.00	-0.12
Haltung 2 'Einstau'	0.79	2.63	1.00	0.16
Haltung 3 'Nachflg.'	0.90	3.00	1.00	0.08

Tabelle 11: Deviationen (EXTRAN-KMROUT2)

⁽²³⁾ Modus: Hier wird angegeben, unter welchen Randbedingungen die Abflußberechnung in KMROUT2 durchgeführt wurde.

'Vorgäng.': Die Haltung wird als Vorgängerhaltung der einstauenden Haltung berechnet.

'Einstau': Die Haltung staut ein.

'Überstau': Die Haltung staut über.

'Nachflg.': Die Haltung ist Nachfolgehaltung einer ein- oder überstauenden Haltung.

Sämtliche Deviationen liegen im Bereich 'sehr gut'.

6.2.2) Simulation mit Netz 2, Haltung 2 staut über

Die Belastung des Kanalnetzes (Netzcharakteristika wie Tabelle 9) erfolgt über Schacht 1 mit der in Abschnitt 4.2.2.1 definierten Zuflußwelle Ü (vgl. Anlage 8). Als Folge der Belastung, erreicht der Wasserstand in Schacht 2 das Geländeniveau (Überstau).

Eine erste Simulation zeigt auf, daß wiederum in der 'Vorgängerhaltung 1' Schwingungen bei der Ganglinienausgabe auftreten (Abflußganglinien in Anlage 10).

Aus diesem Grund wird eine weitere Änderung des Programmablaufes vorgenommen:

Es wird der Mittelwert zwischen den berechneten Abflüssen Q_{A_i} zum Zeitpunkt (t) und (t-1) gebildet. Diese einfache Form der Mittelung (Gleichung 21) ist jedoch nur für kurze Berechnungsschritte gültig (dt=10 [s]), da sonst eine zeitliche Verschiebung der Ganglinie auftritt.

Gleichung 21:
$$Q_{A_i}(t) = (Q_{A_i}(t) + Q_{A_i}(t-1)) / 2$$

Die Mittelung der Abflußwerte wird nur während der Berechnung bei Ein- oder Überstau angewendet.

In den Abbildungen 26 und 27 werden die nach dieser Änderung erzielten Berechnungsergebnisse dargestellt.

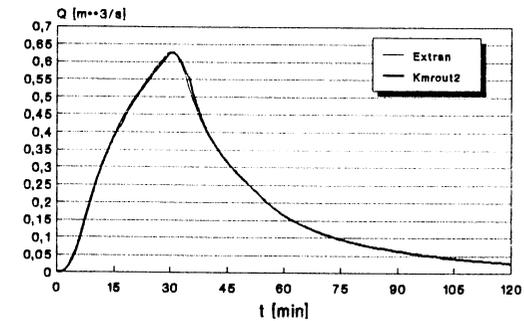


Abbildung 26: Abflußganglinie Haltung 1, 'Vorgängerhaltung'

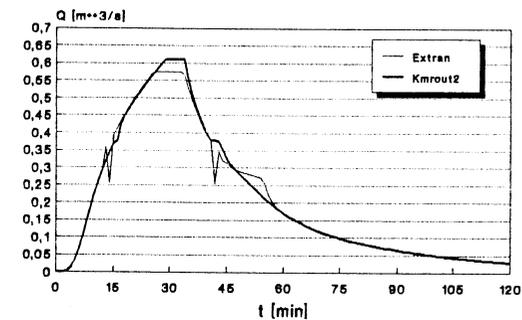


Abbildung 27: Abflußganglinie Haltung 2, 'überstauende Halt.'

Haltung / Modus	DEVS [%]	DEVM [%]	STAN [-]	VOL [%]
Haltung 1 'Vorgäng.'	0.70	2.10	1.00	-0.08
Haltung 2 'Überstau'	2.17	6.06	0.99	0.88
Haltung 3 'Nachflg.'	1.98	5.51	0.99	0.50

Tabelle 12: Deviationen, Überstau in Haltung 2 (EXTRAN - KMROUT2)

Aufgrund der durchgeführten Änderung wird die Schwingung in der Abflußganglinie aus Haltung 1 gedämpft bzw. ganz vermieden.

Die Abflachung der Ganglinie nach KMROUT2 im oberen Bereich bestätigt, daß der Iterationsprozeß bis zur Abflußberechnung unter Überstaubedingungen gelangt. Der Maximalabfluß in Haltung 2 wird von KMROUT2 jedoch um 50 l/s übertroffen.

Im Übergangsbereich zur Abflußberechnung unter Einstaubedingungen ist der Berechnungsablauf von KMROUT2 stabiler (d.h. ohne Schwingungen) als die Abflußberechnung von EXTRAN, bei der deutliche Schwingungen im Übergangsbereich zum Druckabfluß auftreten.

Die Deviationen zwischen den Ganglinien nach KMROUT2 und EXTRAN belegen, daß das neu vorgestellte Programm die Fließbedingungen unter Überstau nachbilden kann.

6.2.3) Simulationen mit Netz 3

Analog zu den Simulationen unter Punkt 6.2.1 und 6.2.2 werden Rechenläufe durchgeführt, bei denen alle 3 Mittelhaltungen des Kanalnetzes 3 (Anlage 4) ein- oder sogar überstauen.

Die entsprechenden Abmessungen der einzelnen Haltungstrecken sind Tabelle 13 zu entnehmen.

Haltung	Schacht		Länge	Sohlgefälle	Rohrdurchm.	QVOLL
	oben	unten				
[-]			[m]	[%]	[m]	[m³/s]
1	1	2a	100	3	0,50	0,657
2a	2a	2b	100	1	0,50	0,378
2b	2b	2c	100	1	0,50	0,378
2c	2c	3	100	1	0,50	0,378
3	3	4	100	3	0,50	0,657

Tabelle 13: Netzabmessungen in Kanalnetz 3

Um die gewünschten Fließverhältnisse in den Haltungsstrecken zu bilden, müssen zwei neue Zuflußwellen definiert werden (Anlage 11). Sie werden als Zuflußwelle '3E' und '3Ü' bezeichnet. Der Zufluß erfolgt über Schacht 1.

Das Ergebnis ist, daß bei dem Berechnungslauf mit Zuflußwelle '3E' die Haltungen 2a, 2b und 2c einstauen. Die Befüllung des Kanalnetzes mit der Zuflußwelle '3Ü' ruft ein Überstauereignis in Haltung 2a hervor, die Haltungen 2b und 2c stauen ein.

Die Abflußganglinien zeigen, daß der Berechnungsalgorithmus in KMROUT2 auch bei mehreren hintereinander liegenden 'stauenden' Haltungen die Abflußverhältnisse nachrechnen kann. In Anlage 12 werden alle ermittelten Abflußganglinien der beiden Berechnungsläufe aufgeführt.

Haltung / Modus	DEVS [%]	DEVM [%]	STAN [-]	VOL [%]
Belastung: Zuflußwelle 3E, Schacht 1				
Haltung 1 'Vorgäng.'	0.49	1.49	1.00	-0.05
Haltung 2a 'Einstau'	0.69	2.30	1.00	0.11
Haltung 2b 'Einstau'	0.94	3.14	1.00	0.11
Haltung 2c 'Einstau'	1.31	4.32	0.99	0.51
Haltung 3 'Nachflg.'	1.63	5.51	0.99	1.09
Belastung: Zuflußwelle 3Ü, Schacht 1				
Haltung 1 'Vorgäng.'	0.62	1.92	1.00	-0.02
Haltung 2a 'Überstau'	2.63	7.24	0.99	-0.24
Haltung 2b 'Einstau'	3.08	8.50	0.98	-0.21
Haltung 2c 'Einstau'	2.97	8.24	0.99	0.39
Haltung 3 'Nachflg.'	3.02	8.42	0.99	0.59

Tabelle 14: Deviationen, Berechnungen mit Netz 3 (EXTRAN-KMROUT2)

Gegenüber den vorangegangenen Simulationen nimmt die Berechnungsgenauigkeit bei mehreren hintereinander liegenden 'stauenden' Hal-tungen ab. Der Berechnungsalgorithmus in KMROUT2 ist aber in der Lage, diese Fließverhältnisse immer noch gut nachzuvollziehen.

In der letzten Untersuchung wird nun überprüft, ob es möglich ist, einen Fließrichtungswechsel in einer Haltung mit KMROUT2 zu be-rechnen.

6.2.4) Simulation mit Netz 3, Fließrichtungswechsel

Ein Fließrichtungswechsel in einem Kanalnetz findet statt, wenn in einem am unteren Haltungsrand gelegenen Schacht der Wasserstand ansteigt, ohne daß der Durchfluß in der zuführenden Haltung ge-steigert wird.

In diesem Beispiel erfolgt der Zufluß in das Netz über die Schächte 1 und 2b. Die Zuflußwellen (Anlage 13) sind so gestaltet, daß sich in Haltung 2a zu Beginn der Simulation ein positiver Ab-fluß einstellt. Da die Zuflußwelle in Schacht 2b um ein vielfaches höher als jene in Schacht 1 ist, kehrt sich die Fließrichtung in Haltung 2a um; der Wasserstand in Schacht 2b erreicht die Gelän-deoberfläche. Das Ergebnis der Berechnung stellt die folgende Ab-bildung der Abflußganglinien für die Haltungen 2a und 2b dar.

Im Berechnungslauf von KMROUT2 wird die Haltung 2a als Vorgänger-haltung behandelt, Haltung 2b staut über.

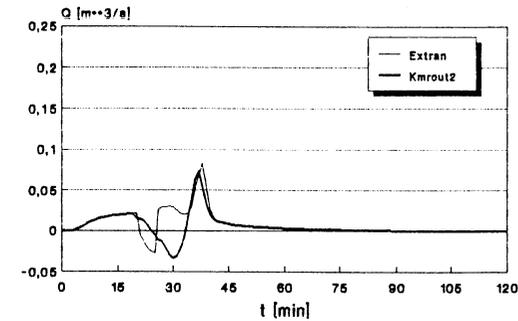


Abbildung 28: Abflußganglinie in Haltung 2a, Fließrichtungswechsel

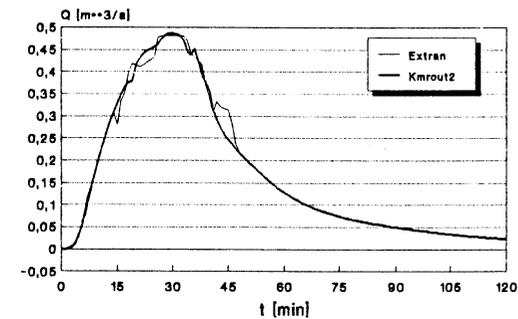


Abbildung 29: Abflußganglinie in Haltung 2b

Die in Tabelle 15 angegebenen Deviationen liegen für Haltung 2a sehr hoch. Die Deviation DEVM liegt nur im Bereich 'brauchbar'. Der berechnete Volumenfehler zwischen den Ganglinien beruht dar-auf, daß der Fließrichtungswechsel bei der Berechnung mit KMROUT2 stärker ausfällt als bei der Berechnung mit EXTRAN. In der pro-gramminternen Volumenbilanz bei KMROUT2 tritt ein Fehler in dieser Größenordnung nicht auf. Der negativ berechnete Abfluß wird dem Speichervolumen in der Haltung 2a selbst zugeschlagen. Eine Fort-pflanzung des negativen Abflusses in eine noch weiter oben gele-gene Haltung ist nicht möglich, da Haltung 2a in dieser Simulation im Modus einer Vorgängerhaltung berechnet wird. Der obere Schacht einer Vorgängerhaltung stellt gleichzeitig den höchstgelegenden Punkt dar, der bei der Einstauiteration in KMROUT beeinflusst wird. Oder anders formuliert, da es in der Modellvorstellung von KMROUT

keine Schächte gibt, bildet der obere Rand einer Vorgängerhaltung die Grenze für die Neuberechnung bei der Einstauiteration.

Haltung / Modus	DEVS [%]	DEVM [%]	STAN [-]	VOL [%]
Haltung 2a 'Vorgäng.'	3.21	36.49	0.09	-36.15
Haltung 2b 'Einstau'	1.84	5.20	0.99	-0.83

Tabelle 15: Deviationen, Fließumkehr in Haltung 2a(EXTRAN-KMROUT2)

Anders als die berechneten Deviationen zeigen die Abflußganglinien für Haltung 2a, daß der Fließrichtungswechsel bei der Berechnung mit KMROUT2 gut nachvollzogen wird. Der negative Abflußhöhepunkt tritt zeitverzögert ein, die positiven Abflußspitzen bei der Berechnung mit KMROUT2 und EXTRAN treten gleichzeitig auf.

Alle getesteten Abflußverhältnisse werden von dem Programm KMROUT2 erfolgreich nachgerechnet. Für die endgültige Bewertung des Iterationsprozesses bei Ein- und Überstau wird nun noch ein größeres Kanalnetz mit dem Programm KMROUT2 berechnet, um mögliche Zeitvorteile für den Anwender bei der Simulation aufzuzeigen.

6.2.5) Berechnung des Abflusses in einem 'größeren' Netz

Als größeres Netz für diese Untersuchung dient das in Kapitel 2.2.4 vorgestellte Kanalnetz, bestehend aus 15 Haltungen. Als Belastung für diese Simulation dient die in Anlage 14 dargestellte Zuflußwelle. Der Zufluß erfolgt über **alle** Schächte.

Das Sohlgefälle beträgt in allen Haltung 1%. Der Simulationszeitraum umfaßt 2 Stunden.

Um die Berechnungsgenauigkeit bei größeren Berechnungszeitschritten in KMROUT2 zu überprüfen, werden je eine Simulation mit einem Zeitschritt von 10 [s] und von 60 [s] durchgeführt.

In Abbildung 30 wird der Grundriß des Kanalnetzes gezeigt, in dem die einstauenden Schächte (EXTRAN) und die einstauenden Haltungen (KMROUT2) markiert sind. Die Abflußganglinien in den einstauenden Haltungen und am Freiauslaß werden in Anlage 14 aufgezeigt.

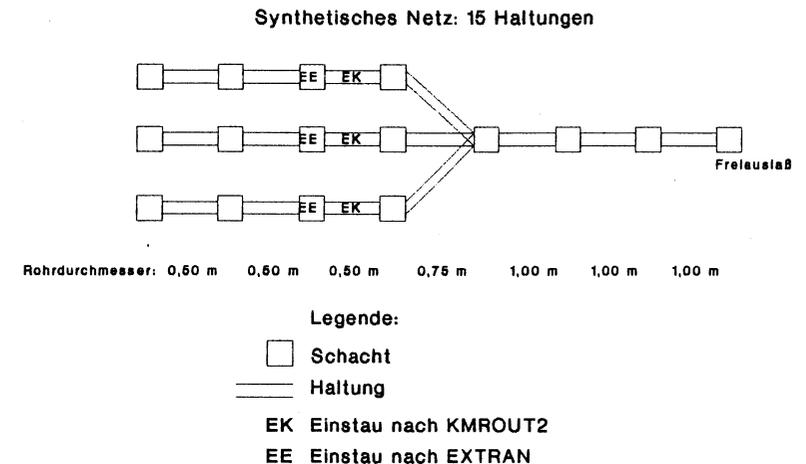


Abbildung 30: Grundriß des Kanalnetzes

Der folgenden Tabelle 16 können die berechneten Deviationen entnommen werden. Bezugsganglinie ist wieder die Ausgabe des Programmes EXTRAN.

Haltung	DEVS [%]	DEVM [%]	STAN [-]	VOL [%]
Berechnungszeit in KMROUT2 : dt=10 [s]				
einstauende Halt.	0.78	3.34	1.00	0.14
Freiauslaß	0.70	3.11	1.00	-0.68
Berechnungszeit in KMROUT2 : dt=60 [s]				
einstauende Halt.	1.45	6.23	0.99	-0.03
Freiauslaß	0.69	4.26	1.00	-0.85

Tabelle 16: Deviationen bei verschiedenen Zeitschritten
(EXTRAN-KMROUT2)

Bei Vergrößerung des Berechnungsschrittes auf hydrologisch sinnvolle 60 [s], erhöhen sich die errechneten Deviationen. Sie liegen aber weiterhin im Bereich 'sehr gut'. Es wird jedoch eine zeitliche Verschiebung der Ganglinien beobachtet, die sich aus der Mittelung zwischen den benachbarten Ganglinienwerten bei der Einstauberechnung ergeben hat. Ob sich die Erhöhung des Berechnungsschrittes bei stärkeren Ein-/Überstauereignissen auswirkt, muß aber im Einzelfall geklärt werden.

6.2.5.1 Beurteilung der benötigten Rechenzeiten

Als weiteres Beurteilungskriterium für diese Simulation werden die benötigten Rechenzeiten in Abbildung 31 dargestellt. Sie ergeben sich bei der Berechnung mit dem beschriebenen Programmen auf einem Personal Computer AT 286, der mit einem Co-Prozessor ausgestattet ist. Die Taktgeschwindigkeit des Rechners liegt jedoch nur bei 6 MHz.

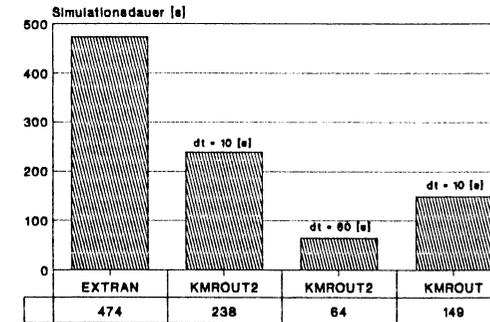


Abbildung 31: Rechenzeiten

Die Rechenzeit des Programmes KMROUT2 liegt bei Wahl des Zeitschrittes von 10 [s] um 50% niedriger als die des Referenzmodelles EXTRAN. Gegenüber der Urversion des Programmes (KMROUT), liegen die Rechenzeiten von KMROUT2 bei vergleichbaren Berechnungsschritten jedoch höher. Bei Wahl des größeren Berechnungsschrittes ($dt = 60[s]$), kann der Zeitaufwand noch einmal stark reduziert werden. Hierbei ist aber zu überprüfen, ob die nötige Berechnungsgenauigkeit erzielt wird.

Der Zeitvorteil, den die hydrologische Simulation gegenüber der hydrodynamischen bietet, wird etwas verringert. Trotzdem braucht das Referenzmodell (bei vergleichbaren Ergebnissen) zur Abflußberechnung den doppelten Zeitaufwand, da bei EXTRAN mit kürzeren Berechnungsschritten gearbeitet werden muß. Bei Wahl des Berechnungsschrittes 10 [s] in EXTRAN treten in dieser Simulation heftige Schwingungen bei der Einstauberechnung auf.

6.2.5.2 Überprüfung der Abbruchkriterien

Die maximal zulässige Iterationszahl wurde für alle Simulationen auf 10 begrenzt. In dieser Simulation wird die maximale Anzahl an Iterationen jedoch nicht benötigt, so daß die gewählte Zahl hier als ausreichend bewertet werden kann.

Bei den tolerierbaren Fehlergrenzen in der Einstauberechnung (QTOL und HTOL) ist darauf zu achten, daß der Grenzwert bei der Durchflußberechnung QTOL das 'schärfere' Kriterium darstellt. Die Bestimmung des jeweiligen Durchflusses wird genauer durchgeführt als die Abschätzung der Wasserstände in den Haltungen.

In weiteren Berechnungen sollte überprüft werden, ob auf den Abbruch des Iterationsprozesses aufgrund der Unterschreitung des Grenzwertes HTOL ganz verzichtet werden kann.

7.) Zusammenfassung

Das hydrologische Abflußtransportmodell KMROUT kann durch die beschriebenen Erweiterungen auf die Berechnung der Fließzustände unter Einstau und Überstau erweitert werden.

Die Erweiterung der QH-Funktion für die Abflußberechnung bei Einstau bildet jedoch entwicklungsstechnisch eine Sackgasse. Die Abflußberechnung erfolgt nur für wenige Ausnahmefälle mit der genügenden Ergebnisgenauigkeit.

Die bessere und auch entwicklungsfähigere Erweiterung des Simulationsmodells KMROUT für die Berechnung unter Ein- und Überstaubedingungen stellt die Einführung der Abflußberechnung in Abhängigkeit zum herrschenden Wasserstandsgefälle dar (KMROUT2). Die Bezeichnung von KMROUT2 als hydrologisch/hydraulisches Modell ist gerechtfertigt. Für einige genau definierte Fließbedingungen in den Haltungen konnte der Abfluß gut nachgerechnet werden.

Erwähnenswert ist, daß es gelingt, den Fließrichtungswechsel in einer Haltung zu erfassen. Bei mehreren hintereinander liegenden einstauenden Haltungen erhöht sich aber die Abweichung zwischen den nach EXTRAN und KMROUT2 ermittelten Abflußganglinien.

Voraussetzung für die Abflußberechnung mit KMROUT2 ist, daß in dem gewählten Kanalnetz sowohl die Vorwärts- als auch die Rückwärtsrechnung eindeutig durchzuführen ist. Vermaschte Kanalnetze können deshalb zu Schwierigkeiten bei der Abflußberechnung führen.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte nicht untersucht werden, ob die Änderung der Rohrdurchmesser bei hintereinander liegenden Haltungen zu Problemen bei der Abflußberechnung unter Einstaubedingungen führt. Ein ähnliches Problem für die Berechnung könnten auch Speicherschächte im Kanalnetz darstellen.

Für die Zukunft muß eine statistische Untersuchung der von KMROUT2 berechneten Ergebnisse zeigen, unter welchen Umständen das erweiterte Modell eingesetzt werden kann. Die Simulation unter Kapitel 6.2.5 zeigt aber schon, daß bei punktuellen Überlastungen eines Kanalnetzes das Simulationsmodell KMROUT2 eine sinnvolle Anwendung findet.

Literaturverzeichnis:

- ATV (1988):** 'Arbeitsblatt A110, Richtlinien für die hydraulische Dimensionierung und den Leistungsnachweis von Abwasserkanälen'.
- Böger, A. (1992):** 'Statistische Untersuchung der Berechnungsergebnisse eines detaillierten hydrodynamischen Simulationsmodells (EXTRAN) zur Prüfung eines hydrologischen Modells (KMROUT)', Diplomarbeit am Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover, unveröffentlicht.
- Deyda, S. (1992):** 'Beschreibung des Programmes KMROUT', Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover.
- Diekmann, R. (1990):** 'Anwendungsbereiche und Grenzen eines detaillierten hydrologischen Kanalnetzrechnungsmodells', Diplomarbeit am Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover, unveröffentlicht.
- Euler, G. (1973):** 'Anwendung des Kalinin-Miljukov-Verfahrens', 5. Fortbildungslehrgang für Hydrologie des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft e.V., Barsinghausen.
- Fuchs L.; Verworn, H.R. (1990):** 'Mikrocomputer in der Stadtentwässerung, Kanalnetzrechnung, -Modellbeschreibung, HYSTEM-EXTRAN Vers.IV.3', ITWH, Hannover 1990.
- Grotehusmann, D.; Semke, M. (1990):** 'KMROUT, ein hydrologisches detailliertes Kanalnetzrechnungsmodell', Zeitschrift für Stadtentwässerung und Gewässerschutz, Hrsg. F. Sieker, Hannover.
- Hager, W.H. (1991):** 'Teilfüllung in geschlossenen Kanälen', gwf Wasser Abwasser 10/1991.

- Harms, R.W.; Verworn, H.R. (1984):** 'HYSTEM - ein hydrologisches Stadtentwässerungsmodell', Teil I: Modellbeschreibung, Korrespondenz Abwasser, Heft 2/84.
- Harms, R.W.; Verworn, H.R. (1980):** 'Die Standardeinheitganglinie - eine gebietsübergreifende Systemfunktion', Wasserwirtschaft 70, Heft (7+8), 1980.
- Huhn, V. (1992):** 'Untersuchung der Instabilitäten bei der Lösung des Saint-Venant'schen Gleichungssystems in EXTRAN', Diplomarbeit am Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover, unveröffentlicht.
- Khelil, A.; Semke, M. (1991):** 'Quantifizierung der Unsicherheiten bei der Abflubberechnung in städtischen Entwässerungssystemen', Forschungsbericht DFG SI 242/7-2, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Universität Hannover.
- Maniak, U. (1973):** 'Vergleich von Niederschlag-Abfluß-Modellen', 5. Fortbildungslehrgang für Hydrologie des DVWW Barsinghausen, 1973.
- Ritscher, U. (1971):** 'Ein mathematisch physikalisches Abflußmodell zur Berechnung von Hochwasserabflüssen und Untersuchung des Betriebes von Rückhaltebecken', Dissertation an der Fakultät für Bauwesen der TU Braunschweig, 1971.
- Rosemann, H.-J.; Vedral, J. (1970):** 'Das Kalinin-Miljukov-Verfahren zur Berechnung des Ablaufs von Hochwasserwellen', Schriftenreihe der Bayrischen Landesstelle für Gewässerkunde, Heft 6.
- Schultz, G.A. (1968):** 'Bestimmung theoretischer Abflußganglinien durch elektronische Berechnung von Niederschlagskonzentration und Retention', Versuchsanstalt für Wasserbau der TH München, Bericht Nr. 11, 1968.

- Seus, G.J.; Rös1, G. (1974):** 'Hydrologische Verfahren zur Berechnung des Hochwasserwellen-Ablaufes in Flüssen'. In Zielke, W.: Elektronische Berechnung von Rohr- und Gerinneströmungen, Erich-Schmidt-Verlag.
- Sieker, F. (1987):** 'Abflußbildung', Zeitschrift für Stadtentwässerung und Gewässerschutz, Heft 1 - Teil 4.3 -, November 1987.
- Verworn, W. (1980):** 'Hydrodynamische Kanalnetzberechnung und die Auswirkungen von Vereinfachungen der Bewegungsgleichungen', Mitteilung des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Universität Hannover, Heft 47.
- Zielke, W. (1988):** 'Strömungsmechanik für Bauingenieure', Vorlesungsscript Teil 1, Institut für Strömungsmechanik, Universität Hannover.
- Zielke, W. (1988):** 'Strömungsmechanik für Bauingenieure', Vorlesungsscript Teil 2, Institut für Strömungsmechanik, Universität Hannover.
- Zior, F. (1987):** 'Regenwasserabfluß auf Fahrbahnoberflächen - experimentelle und theoretische Untersuchungen', Technische Berichte über Ingenieurhydrologie und Hydraulik, Institut für Wasserbau der TH Darmstadt, Heft 38, 1987.

**Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie
und landwirtschaftlichen Wasserbau
der Universität Hannover**

Prof. Dr.-Ing. F. Sieker

**Erweiterung des
Kanalnetzrechnungsmodells KMROUT auf
die Simulation von Fließvorgängen im
EINSTAU- bzw. ÜBERSTAU-BEREICH**

**Diplomarbeit
Anlagen**

Marko Siekmann

Dezember 1992

Kurzbeschreibung der Unterprogramme in KMROUT (S. Deyda; 1992):

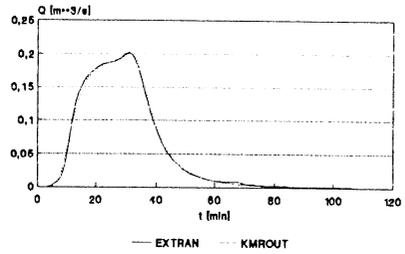
KMROUT	steuert den Programmablauf;
KMRIND	liest die Kanalnetzdaten und KMROUT-Parameter aus IN-DAT; erstellt eine Verknüpfungstabelle für die Netzstruktur;
HVHQ	berechnet Wasserstands-Volumen-Abflußbeziehungen für die einzelnen Haltungen, falls mit Speicherhaltungen gerechnet wird oder Wasserstandsganglinien ausgegeben werden sollen;
STOLES	liest Zusatzdaten für Speicherschächte aus einer externen Datei ein;
HQBEZ	erstellt Wasserstands-Abfluß-Beziehungen für Speicherschächte, falls diese nicht von einer externen Datei eingelesen werden (STOLES);
SADD	berechnet die 'HVQ-Beziehung' für Speicherschächte;
POLYG1, POLYG2	interpoliert linear zwischen zwei Punkten einer Ganglinie;
ZENTRA	zentrale Routine von KMROUT: Enthält die Zeitschleife sowie die Schleife über alle Haltungen;
HYSOP	liest die ersten Daten aus der Wellendatei (HYSYSTEM) ein und ordnet den Oberflächenabfluß den Haltungen zu;
KMCONS	berechnet die Retentionszeit für eine Haltung bei Berechnung mit variabler oder mittlerer Retentionszeit;

ZUFLUS	liest den aktuellen Datensatz aus der Wellendatei ein und interpoliert ggf. linear zwischen zwei Datensätzen;
ABFLUS	berechnet den Abfluß aus einer Haltung;
SONBAU	Steuerungsroutine für Sonderbauwerke;
PUMPE	berechnet Pumpenleistungen, Volumen im Pumpensumpf und Zufluß in abgehende Haltungen von off-line-Pumpen;
STORE	berechnet Zu-, Abfluß, Speichervolumen und Wasserstand in Speicherschächten;
NEUKON	prüft, ob neue Retentionszeiten berechnet werden müssen (Aufruf des Unterprogrammes KMCONS), falls mit variablen Retentionszeiten gerechnet wird;
VOLBIL	prüft, ob an den freien Auslässen der Trockenwetterfall eingetreten ist (stabiler Zustand); bei Trockenwetterberechnung Neustart einer Simulation mit Zuflußwelle, bei ablaufendem Ast Beendigung der Simulation;
AUSEND	Ausgabe der Volumenbilanz.

Im Laufe der Diplomarbeit werden die Subroutines HVHQ, ABFLUS und ZENTRA geändert.

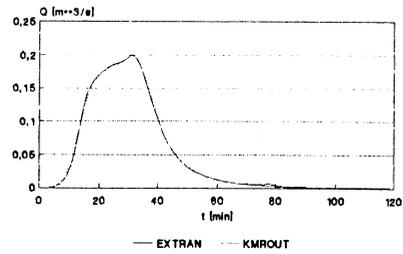
Vergleich EXTRAN - KMROUT

Gefälle 1% ; KMFLAG = 2
Berechnungsschrittweite dt = 60[s]



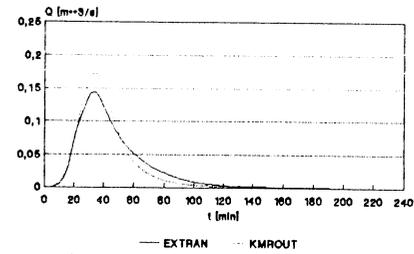
Vergleich EXTRAN - KMROUT

Gefälle 0,5% ; KMFLAG = 2
Berechnungsschrittweite dt = 60[s]



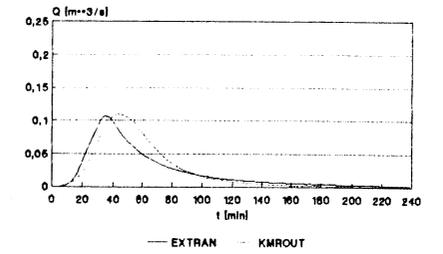
Vergleich EXTRAN - KMROUT

Gefälle 0,05% ; KMFLAG = 2
Berechnungsschrittweite dt = 60[s]



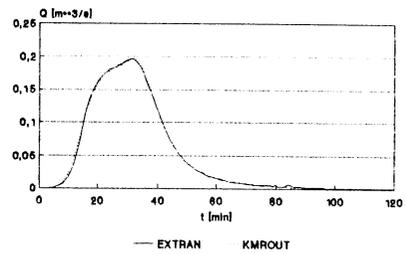
Vergleich EXTRAN - KMROUT

Gefälle 0,01% ; KMFLAG = 2
Berechnungsschrittweite dt = 60[s]



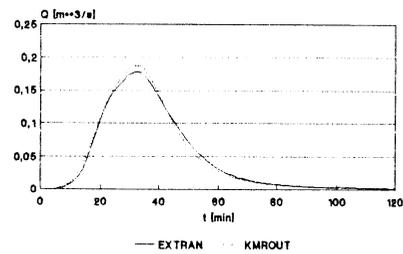
Vergleich EXTRAN - KMROUT

Gefälle 0,3% ; KMFLAG = 2
Berechnungsschrittweite dt = 60[s]



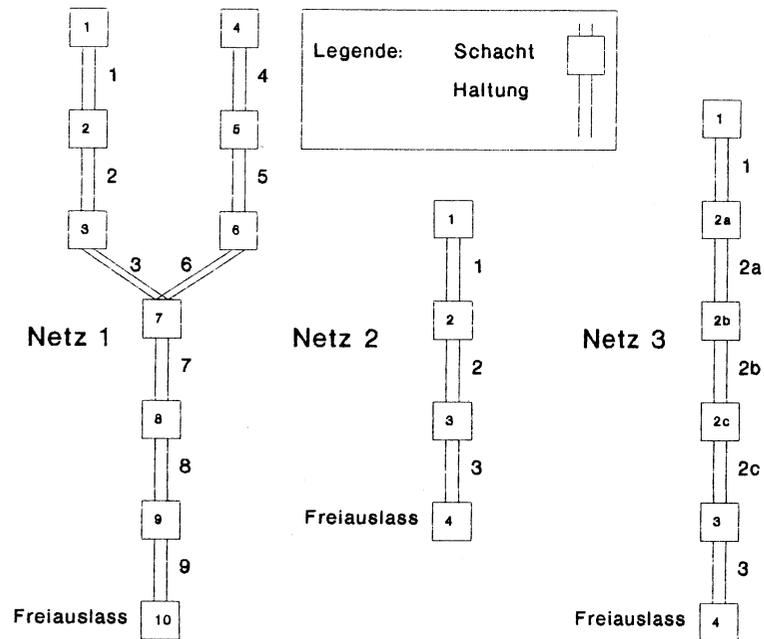
Vergleich EXTRAN - KMROUT

Gefälle 0,1% ; KMFLAG = 2
Berechnungsschrittweite dt = 60[s]



Darstellung der Kanalnetze (Grundriß):

NETZ1, NETZ2 und NETZ3



Darstellung der Zuflußwellen:

Zuflußwelle TYP A:

Kombination einer Grundwelle, die das gesamte Kanalnetz bis zu 99% der Vollfüllungsleistung füllt, und einer Zusatzwelle, die zum Einstau in den Haltungen führt.

Zuflußwelle TYP B:

Diese Zuflußwelle wird mit dem Programm HYSTEM erstellt.

Regenbelastung : 18 mm/30min (Blockregen)

Gesamtfläche : 0,5 ha

Undurchlässige Fläche: 0,25 ha

Der Standardparametersatz wird nicht verändert.

Die Zuflußwelle vom TYP B entspricht der zuvor bezeichneten Zusatzwelle (Typ A).

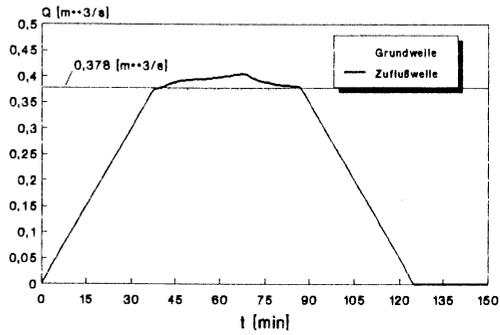
Die Kombination dieser Zuflußwellen ermöglicht, daß zu Beginn der Überlastung (Einstaubeginn) das gesamte Netz bereits zu 99% vollgefüllt ist und kein zusätzlicher Speicherraum in den untersuchten Haltungen zur Verfügung steht.

In der folgenden Tabelle werden die Zuflußwellen unter Angabe der entsprechenden Zuflußschächte den einzelnen Simulationsreihen zugeordnet.

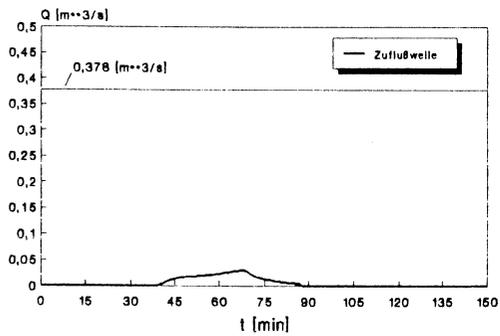
	Zuflußwelle TYP A	Zuflußwelle TYP B
Simulationsreihe 1	1,4	2,3,5,6,7,8
Simulationsreihe 2	1	2,3
Simulationsreihe 3	1	2,3
Simulationsreihe 4	1	2,3

Tabelle: Zuordnung der Zuflußschächte

Darstellung der Zuflußwelle TYP A



Darstellung der Zuflußwelle TYP B

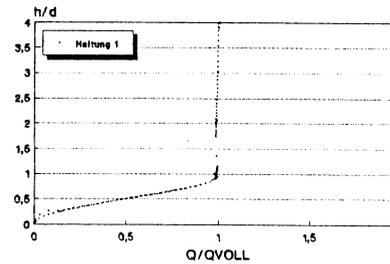


Darstellung der QH-Funktionen:

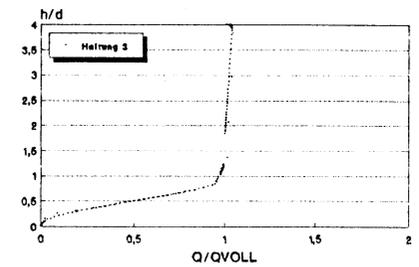
Haltung 1

Haltung 3

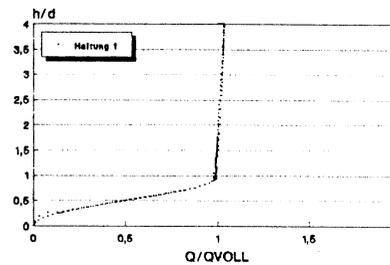
Speichercurve QH-Beziehung
Simulationsreihe 1



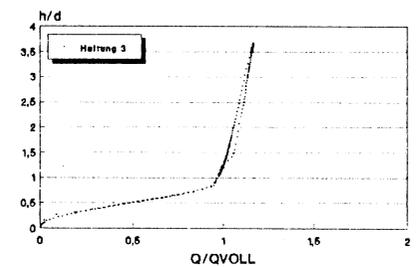
Speichercurve QH-Beziehung
Simulationsreihe 1



Speichercurve QH-Beziehung
Simulationsreihe 2

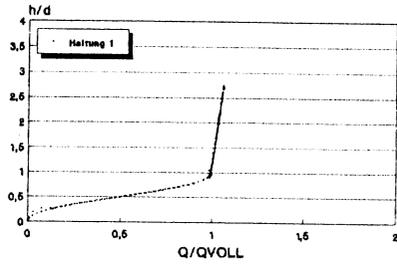


Speichercurve QH-Beziehung
Simulationsreihe 2



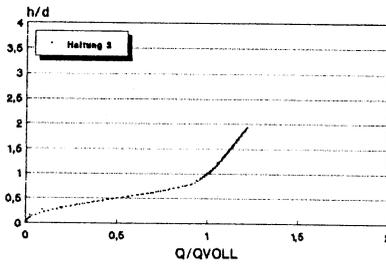
Haltung 1

Speichercurve QH-Beziehung
Simulationsreihe 3

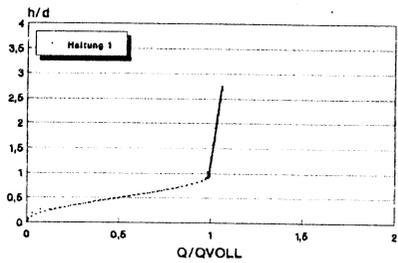


Haltung 3

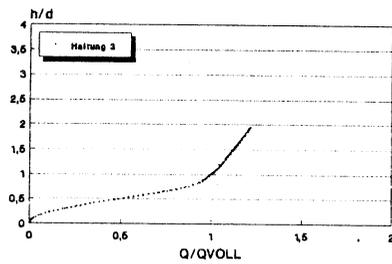
Speichercurve QH-Beziehung
Simulationsreihe 3



Speichercurve QH-Beziehung
Simulationsreihe 4



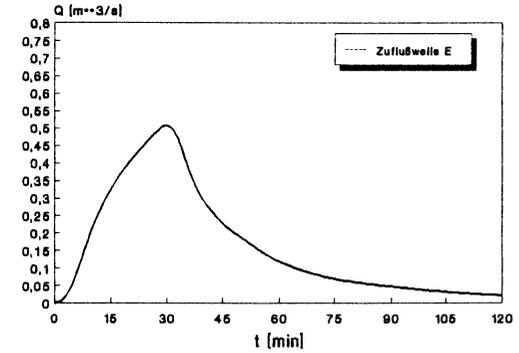
Speichercurve QH-Beziehung
Simulationsreihe 4



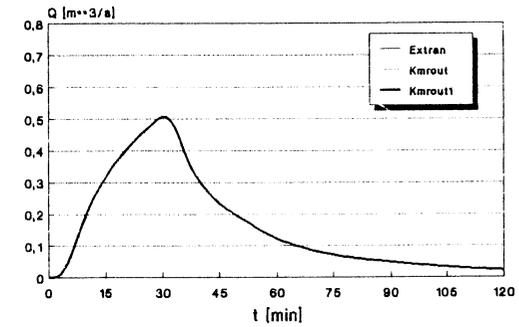
Darstellung der Zuflußwelle 'E';

Abflußganglinien in den Haltungen 1 und 3 (KMROUT1 - KMROUT).

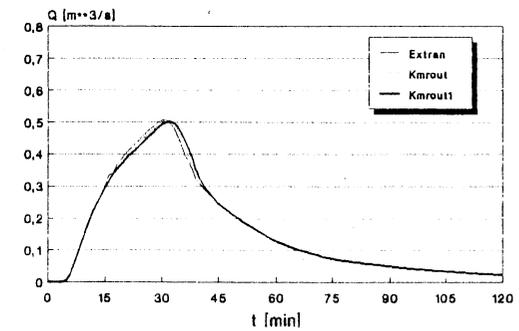
Darstellung der Zuflußwelle E



Vergleich Extran - Kmrou1 - Kmrou2
Haltung 1

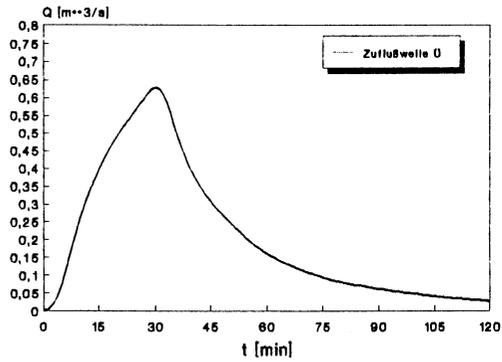


Vergleich Extran - Kmrou1 - Kmrou2
Haltung 3

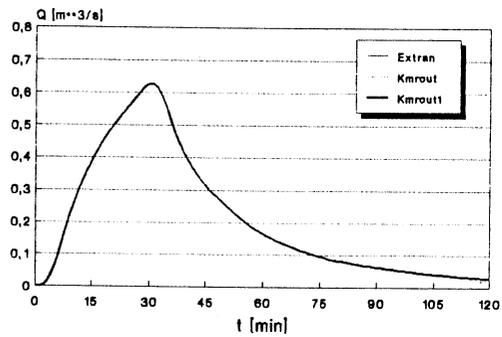


Darstellung der Zuflußwelle 'Ü';
 Abflußganglinien in den Haltungen 1 und 3 (KMROUT1 - KMROUT).

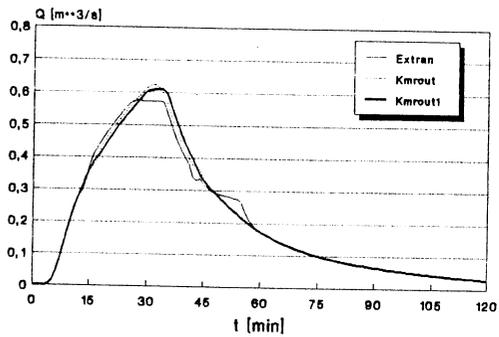
Darstellung der Zuflußwelle Ü



Vergleich Extran - Kmrou1 - KMROUT
 Haltung 1

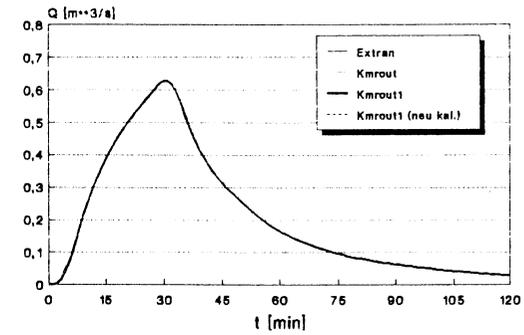


Vergleich Extran - Kmrou1 - KMROUT
 Haltung 3

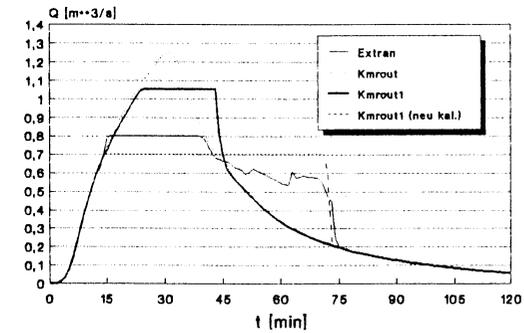


Abflußganglinien in den Haltungen 1 und 3 (KMROUT1 - KMROUT).

Vergleich Extran - Kmrou1 - KMROUT
 Haltung 1



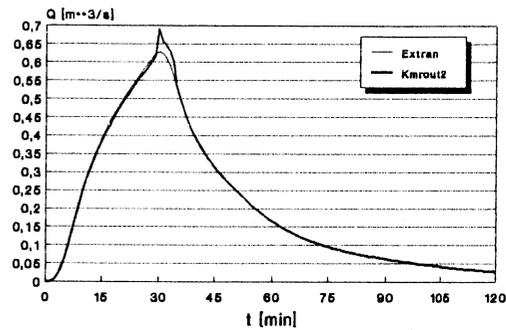
Vergleich Extran - Kmrou1 - KMROUT
 Haltung 3



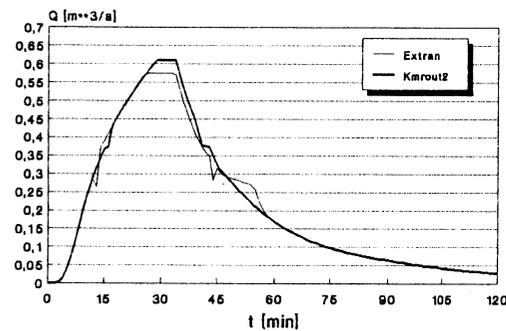
Abflußganglinien in den Haltungen 1,2 und 3 (KMROUT2).

Überstau in Haltung 2; der Abfluß aus Haltung 1 (Vorgängerhaltung) zeigt zeitgleich eine Unregelmäßigkeit, aufgrund der die erneute Änderung des Programmes KMROUT2 durchgeführt wird.

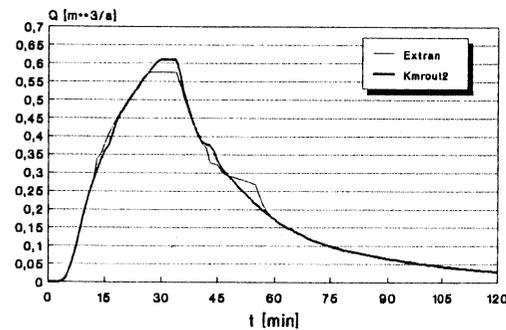
Vergleich Extran - Kmrou2
Haltung 1 'Vorgängerhaltung'



Vergleich Extran - Kmrou2
Haltung 2 'überstauende Haltung'

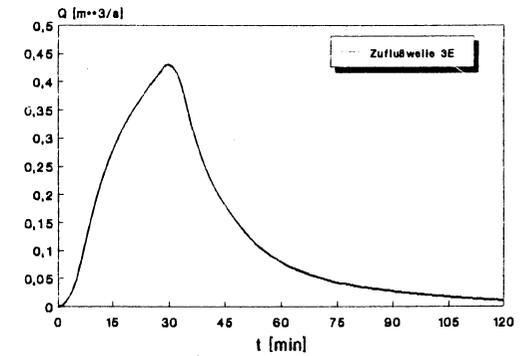


Vergleich Extran - Kmrou2
Haltung 3 'Nachfolgehaltung'

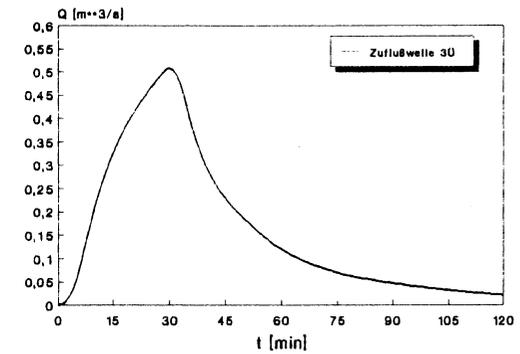


Darstellung der Zuflußwelle '3E' und der Zuflußwelle '3Ü' für die Simulationen mit der Kanalnetzdatei 3 (KMROUT2)

Darstellung der Zuflußwelle 3E



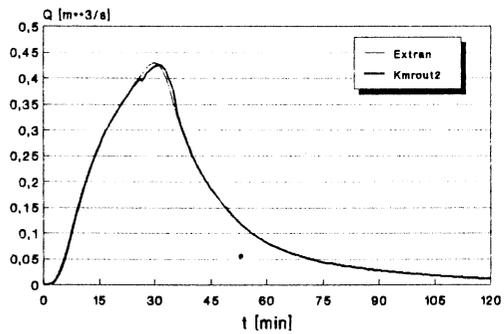
Darstellung der Zuflußwelle 3Ü



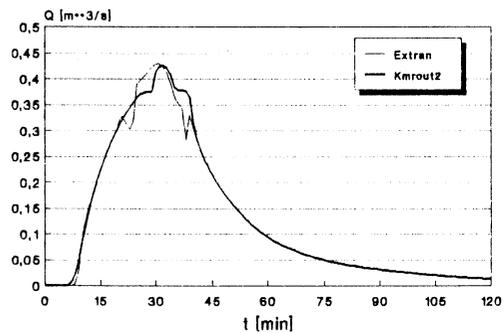
Berechnung des Abflusses in Netz 3, Zuflußwelle 3E (KMROUT2)

Die Abflußganglinien der Haltungen 1, 3 und der Haltungen 2a, 2b und 2c werden dargestellt.

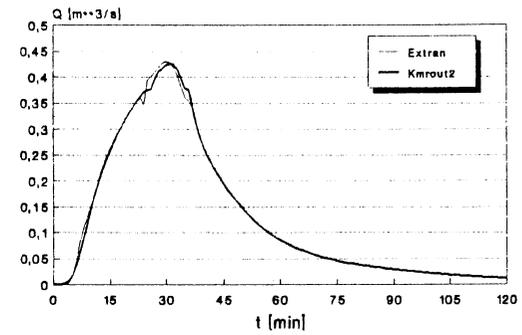
Vergleich Extran - Kmrou2
Haltung 1



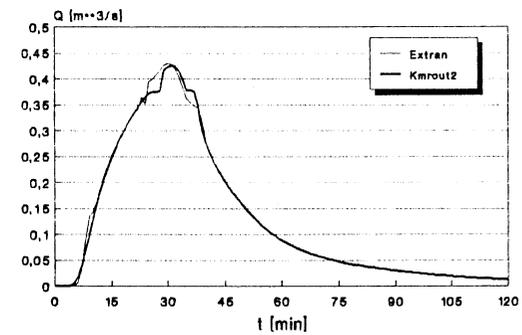
Vergleich Extran - Kmrou2
Haltung 3



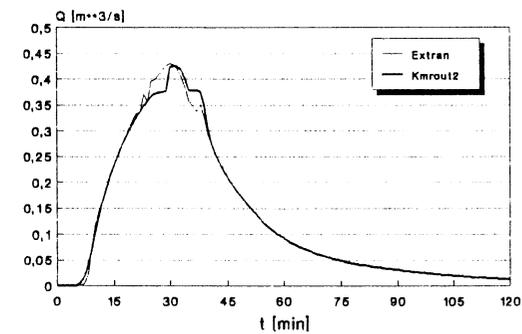
Vergleich Extran - Kmrou2
Haltung 2a



Vergleich Extran - Kmrou2
Haltung 2b



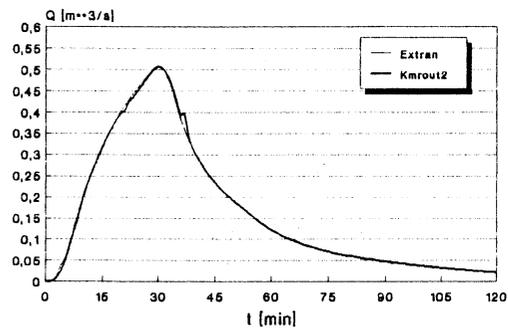
Vergleich Extran - Kmrou2
Haltung 2c



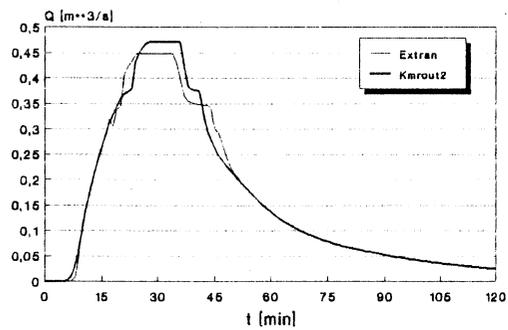
Berechnung des Abflusses in Netz 3, Zuflußwelle 3Ü (KMROUT2)

Die Abflußganglinien der Haltungen 1, 3 und der Haltungen 2a, 2b und 2c werden dargestellt.

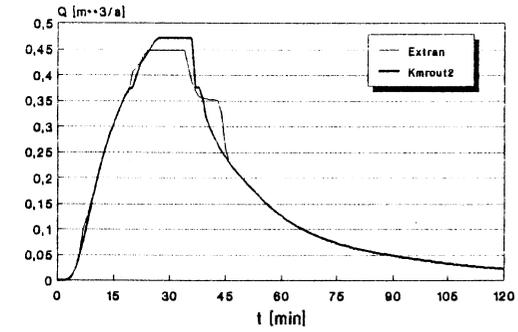
Vergleich Extran - Kmrou2
Haltung 1



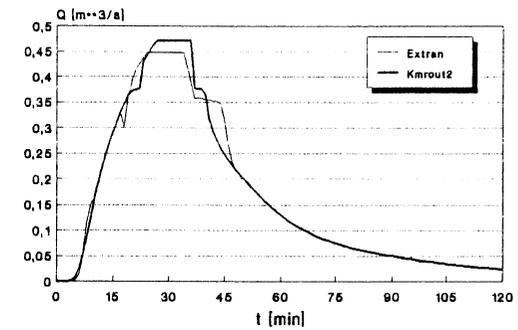
Vergleich Extran - Kmrou2
Haltung 3



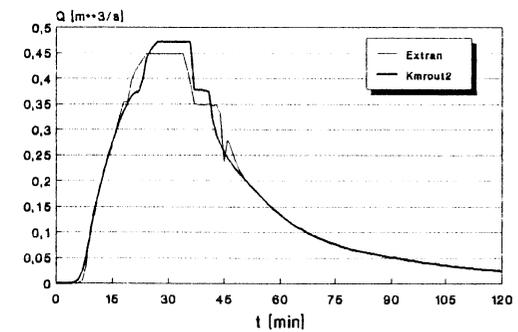
Vergleich Extran - Kmrou2
Haltung 2a



Vergleich Extran - Kmrou2
Haltung 2b



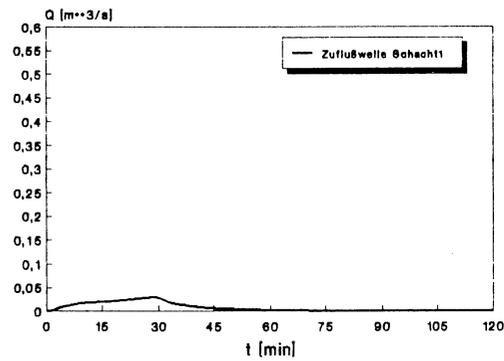
Vergleich Extran - Kmrou2
Haltung 2c



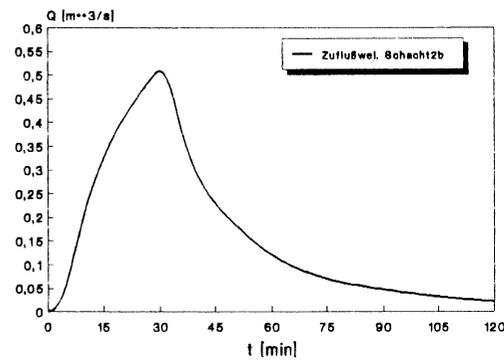
Berechnung des Abflusses in Netz 3, (KMROUT2):

Darstellung der Zuflußwellen, aufgrund derer sich die Fließrichtung in Haltung 2a umkehrt.

Darstellung der Zuflußwelle in Schacht 1



Darstellung der Zuflußwel. in Schacht 2b



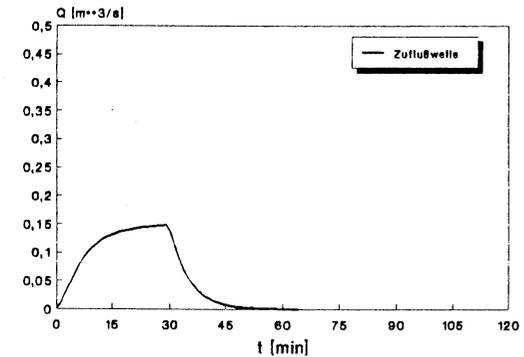
Abflußberechnung in einem synthetischen Netz (15 Haltungen) mit KMROUT2:

Darstellung der Zuflußwelle; gleichmäßige Befüllung aller Schächte.

Die Abflußganglinien in den einstauenden Haltungen und am Freiauslaß werden in Abhängigkeit des Berechnungszeitschrittes aufgeführt. Die Abflußganglinien in den einstauenden Haltungen stimmen in allen Fällen überein (vgl. gleiche Lage im Netz).

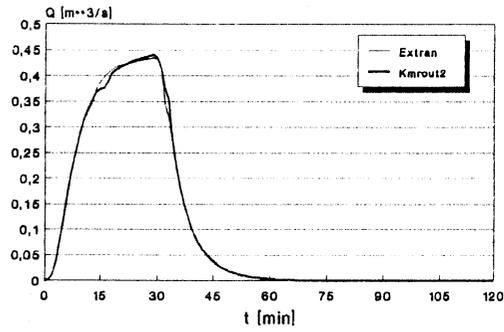
Zuflußwelle:

Darstellung der Zuflußwelle

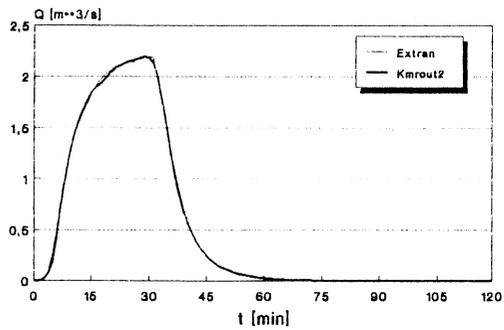


Abflußganglinien in den einstauenden Haltungen und am Freiauslaß;
 Berechnungszeitschritt : dt = 10 [s]

Vergleich Extran - KMROUT2
 Einstauende Haltung

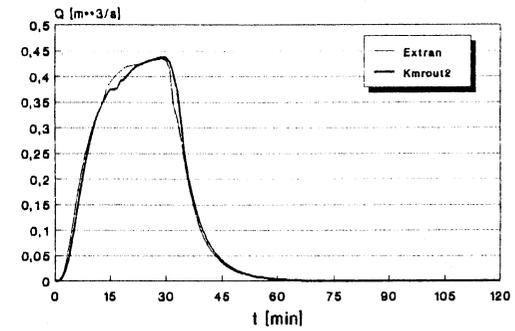


Vergleich Extran - KMROUT2
 Freiauslaß



Abflußganglinien in den einstauenden Haltungen und am Freiauslaß;
 Berechnungszeitschritt : dt = 60 [s]

Vergleich Extran - KMROUT2
 Einstauende Haltung



Vergleich Extran - KMROUT2
 Freiauslaß

