

# **VERGLEICH VON ANSÄTZEN ZUR SIMULATION VON ABFLUßKONZENTRATION UND TRANSPORT IN ENTWÄSSERUNGSKANÄLEN**

von

Dr.-Ing. A. Khelil

Ingenieurgesellschaft für Stadthydrologie mbH

Vahrenwalderstr. 7, 3000 Hannover 1

## **SCHLÜSSELWORTE**

Modellunsicherheit, Modellvergleich, Modellkalibrierung, Hydrologische / Hydrodynamische Simulation von Entwässerungskanälen, Abflußkonzentration, Abflußtransport

## **1. EINFÜHRUNG**

Die Anforderung an die numerische Modellierung in der Stadthydrologie hängt von den verfügbaren Eingabedaten, dem gewünschten Umfang der Ausgabe und den rechnerischen Mitteln ab.

Zu den Eingabedaten einer Simulation gehören folgende Daten:

- Daten zur Beschreibung des Einzugsgebietes
- Daten zur Beschreibung des Kanals
- Daten zur Beschreibung des räumlich und zeitlich verteilten Niederschlags
- Daten zur Kalibrierung der Modellbausteine

Der Umfang der Ausgabe ist weitgehend durch das Ziel der Modellanwendung bestimmt. Man unterscheidet unter anderem zwischen folgenden Aufgaben:

- Dimensionierung eines Kanalnetzes
- Untersuchung der Leistungsfähigkeit eines Entwässerungssystems
- Entwicklung eines Bausteines zur On-Line Zuflußvorhersage
- Bestimmung einer optimierten Kanalsteuerung
- Beschreibung des Schmutztransportprozesses durch das Entwässerungssystem

Komplexe Modelle unterscheiden mehr Teilprozesse als vereinfachte Modelle bzw. sie beschreiben dieselben Teilprozesse mit komplexeren mathematischen Formeln. Sie enthalten mehr Modellparametern, die jeden einzelnen Teilprozeß charakterisieren und/oder eine detailliertere Beschreibung des entsprechenden Entwässerungssystems (z.B. kleine Teileinzugsgebiete, feine Darstellung des Rohrsystems). Dem-

entsprechend wächst der Rechenaufwand (Rechenoperationen und/oder nötige Speicherkapazität) . Hierbei stellt sich die Frage, ob und wann welche Modellierung zweckmäßig ist.

Der folgende Beitrag soll Hinweise zur Klärung dieser Frage hinsichtlich der Teilprozesse Transport-an-der-Gebietsoberfläche und Transport-im-Kanal geben. Sechs unterschiedliche Ansätze werden zur Simulation von 19 Entwässerungssystemen (im folgenden UDC-Netze genannt) verwendet und die Berechnungsergebnisse miteinander verglichen. Die Beschreibung der UDC-Entwässerungssysteme entstammt Maksimovic (1986). Diese Entwässerungssysteme wurden herangezogen, weil sie international bekannt sind, und in jedem Einzelfall Daten zur Systembeschreibung und Daten zur Modellkalibrierung vorhanden sind.

## 2. BESCHREIBUNG DER ENTWÄSSERUNGSSYSTEME (Maksimovic, 1986)

### 2.1 Kenndaten der Entwässerungssysteme

|    |             |   |
|----|-------------|---|
| 1  | UDMAU01.NET | VINE STREET, MELBOURNE, AUSTRALIA           |
| 2  | UDMCA01.NET | MALVERN, BURLINGTON, CANADA                 |
| 3  | UDMCA02.NET | EAST YORK, TORONTO, CANADA                  |
| 4  | UDMCH01.NET | FRIEDACKER, ZÜRICH, SWITZERLAND             |
| 5  | UDMDK01.NET | MUNKERISPARKEN, LINGBY, DENMARK             |
| 6  | UDMFR01.NET | LIVRY GARGAN, SEINE-SAINT-DENIS, FRANCE     |
| 7  | UDMGB01.NET | CLIFTON GROVE, NOTTINGHAM, GREAT-BRITAIN    |
| 8  | UDMGB02.NET | ST. MARKS ROAD, DERBY, GREAT-BRITAIN        |
| 9  | UDMHU01.NET | MISCOLC, MISCOLC CITY, HUNGARY              |
| 10 | UDMIT01.NET | LUZZI, PROVINCE OF COSENCA, ITALY           |
| 11 | UDMNO01.NET | VIKA, OSLO, NORWAY                          |
| 12 | UDMSE01.NET | PORSOEBERG, LULEA, SWEDEN                   |
| 13 | UDMSE02.NET | KLOSTERGARDEN, LUND, SWEDEN                 |
| 14 | UDMUS01.NET | POMPAND BEACH, BROWARD COUNTY, FLORIDA, USA |
| 15 | UDMUS02.NET | SAMPLE ROAD, BROWARD COUNTY, FLORIDA, USA   |
| 16 | UDMUS03.NET | FORT LAUDERDALE, BROWARD COUNTY, FLORIDA    |
| 17 | UDMUS04.NET | KINGS CREEK, DADE COUNTY, FLORIDA, USA      |
| 18 | UDMUS05.NET | GRAY HEAVEN, BALTIMORE, MARYLAND, USA       |
| 19 | UDMYU01.NET | MILJAKOVAC, BELGRADE, YUGOSLAVIA            |

Tab. 1: Auflistung der Entwässerungssysteme (Eine graphische Darstellung der einzelnen Kanalnetze befindet sich in Anlage 1)

Das größte Kanalnetz UDMFRO1.NET enthält 181 Haltungen, die insgesamt eine undurchlässige Gebietsfläche von 82,4 ha entwässern. Das kleinste Kanalnetz UDMUSO1.NET besteht aus 12 Haltungen, die 1,0 ha undurchlässige Fläche entwässern. Der mittlere Wert der angeschlossenen undurchlässigen Flächen über alle Entwässerungssysteme (außer den 3 größten UDMAU01, UDMCAO2, UDMFR01) beträgt 5 ha ( $\sigma=2,3 \text{ ha}^1$ ). Die mittlere Anzahl der Kanalhaltungen (außer den 3 größten Netzen) beträgt 35 ( $\sigma=27$ ).

In Tab. 4 wird überschläglich die Geometrie der einzelnen Kanalsysteme sowie ihr Transportverhalten charakterisiert. Zur Ermittlung der Transportdauer im Kanal wird folgender Fließzustand angenommen : Normalabfluß bei Rohrvollfüllung, (Berechnung nach dem Rauigkeitsansatz von Manning-Strickler). Die errechneten Fließdauern liegen zwischen 1 Minute (UDMITO1, UDMUSO5) und 16 Minuten (UDMFRO1). Da die mittlere Fließgeschwindigkeit in teilgefüllten Rohren niedriger ist als bei Vollfüllung, stellen die aufgeführten Werte eine untere Grenze dar.

### 3. DIE VERWENDETEN NIEDERSCHLAGSBELASTUNGEN

| Modellregen        | mittlere Intensität | Wiederkehrzeit <sup>2</sup> |
|--------------------|---------------------|-----------------------------|
| Blockregen 1 (BR1) | 9 mm / 30 min       | 5,6 Monate                  |
| Blockregen 2 (BR2) | 12mm / 30 min       | 10,5 Monate                 |
| Blockregen 3 (BR3) | 15mm / 30 min       | 1,6 Jahr                    |
| nach Euler, Typ 2  | 12,9mm / 30 min     | 1 Jahr                      |

Tab. 5 : Beschreibung der verwendeten Modellregen

Zudem wurden Naturereignisse herangezogen, um gegebenenfalls den Einfluß eines unregelmäßigen Niederschlagsverlaufs zu ermitteln. In allen durchgeführten Simulationen wurde angenommen, daß die räumliche Verteilung der Niederschläge gleichmäßig ist. Diese Annahme ist durch die relativ kleinen Gebietsflächen der untersuchten Entwässerungssysteme gerechtfertigt.

<sup>1</sup> s : Standardabweichung

<sup>2</sup> Statistische Untersuchung von Niederschlagsdaten der Station Westerholt in Nordrhein-Westfalen (KBZ 2006)

Tab. 2: Kenndaten der UDC-Netze (Absolute Werte).

| Netz | Anzahl<br>Haltungen<br>[-] | Gesamt-<br>Länge<br>[m] | mittl.<br>Länge<br>[m] | Gesamt-<br>Volumen<br>[m <sup>3</sup> ] | Ages<br>[ha] | Aund<br>[ha] | Aund/Ages<br>[%] | mittl.<br>D<br>[m] | mittl.<br>I<br>[%] |
|------|----------------------------|-------------------------|------------------------|---|--------------|--------------|------------------|--------------------|--------------------|
| AU01 | 54                         | 4800                    | 88,9                   | 2121                                    | 70,0         | 22,0         | 31,4             | 0,64               | 0,45               |
| CA01 | 21                         | 1860                    | 88,6                   | 452                                     | 23,3         | 7,9          | 34,0             | 0,54               | 0,87               |
| CA02 | 48                         | 6845                    | 142,6                  | 4268                                    | 155,8        | 68,1         | 43,7             | 0,81               | 0,68               |
| CH01 | 48                         | 2265                    | 47,2                   | 323                                     | 12,5         | 6,6          | 52,8             | 0,39               | 2,45               |
| DK01 | 35                         | 1150                    | 32,9                   | 114                                     | 6,4          | 2,0          | 31,9             | 0,32               | 1,09               |
| FR01 | 181                        | 25759                   | 142,3                  | 8616                                    | 253,5        | 82,4         | 35,0             | 0,53               | 1,43               |
| GB01 | 42                         | 1997                    | 47,5                   | 116                                     | 10,6         | 4,3          | 40,3             | 0,26               | 3,32               |
| GB02 | 87                         | 3270                    | 37,6                   | 218                                     | 10,3         | 5,1          | 49,2             | 0,26               | 1,09               |
| HU01 | 22                         | 2188                    | 99,5                   | 796                                     | 25,2         | 4,0          | 15,8             | 0,56               | 2,21               |
| IT01 | 12                         | 405                     | 33,8                   | 26                                      | 1,5          | 1,3          | 91,7             | 0,28               | 15,83              |
| NO01 | 25                         | 1756                    | 70,2                   | 375                                     | 9,8          | 9,5          | 96,5             | 0,43               | 2,36               |
| SE01 | 38                         | 2016                    | 53,1                   | 154                                     | 13,3         | 5,2          | 38,7             | 0,30               | 1,48               |
| SE02 | 42                         | 2071                    | 49,3                   | 160                                     | 14,1         | 7,0          | 49,8             | 0,30               | 0,88               |
| US01 | 12                         | 410                     | 34,2                   | 191                                     | 16,5         | 1,0          | 5,9              | 0,76               | 0,20               |
| US02 | 19                         | 1248                    | 65,7                   | 670                                     | 23,0         | 4,3          | 18,5             | 0,79               | 0,22               |
| US03 | 26                         | 1228                    | 47,2                   | 211                                     | 8,3          | 8,1          | 97,6             | 0,45               | 0,23               |
| US04 | 15                         | 702                     | 46,8                   | 340                                     | 6,0          | 4,2          | 70,0             | 0,76               | 0,37               |
| US05 | 10                         | 379                     | 37,9                   | 285                                     | 9,4          | 4,2          | 44,7             | 0,95               | 0,91               |
| YU01 | 112                        | 4121                    | 36,8                   | 404                                     | 25,5         | 4,9          | 19,1             | 0,34               | 5,22               |

Tab. 3: weitere Kenndaten der UDC-Netze (Mittelwerte über alle Haltungen)

| Netze<br>[-] | Ages<br>[ha] | Aund<br>[ha] | Ages/Aund<br>[-] | D<br>[m] | I<br>[%] | Länge<br>[m] | Vol<br>[m <sup>3</sup> ] | L/Aund<br>[m/ha] | V/Aund<br>[m <sup>3</sup> /ha] |
|--------------|--------------|--------------|------------------|----------|----------|--------------|--------------------------|------------------|--------------------------------|
| AU01         | 1,30         | 0,41         | 3,40             | 0,67     | 0,5      | 89,1         | 39,3                     | 342              | 134,0                          |
| CA01         | 1,11         | 0,38         | 2,00             | 0,54     | 1,0      | 88,6         | 21,5                     | 136              | 31,6                           |
| CA02         | 3,25         | 1,41         | 1,41             | 0,84     | 0,7      | 142,6        | 88,9                     | 53               | 31,2                           |
| CH01         | 0,26         | 0,14         | 1,92             | 0,38     | 2,5      | 47,2         | 6,7                      | 602              | 78,1                           |
| DK01         | 0,18         | 0,58         | 3,25             | 0,31     | 1,2      | 32,7         | 3,3                      | 531              | 38,9                           |
| FR01         | 1,40         | 0,45         | 3,12             | 0,53     | 1,4      | 142,4        | 47,6                     | 502              | 119,9                          |
| GB01         | 0,25         | 0,10         | 2,21             | 0,26     | 3,2      | 47,5         | 2,8                      | 419              | 23,6                           |
| GB02         | 0,19         | 0,07         | 1,67             | 0,23     | 1,8      | 37,6         | 2,5                      | 765              | 37,4                           |
| HU01         | 1,10         | 0,17         | 4,36             | 0,58     | 2,9      | 99,5         | 34,6                     | 482              | 104,0                          |
| IT01         | 0,12         | 0,11         | 1,16             | 0,28     | 17,6     | 33,8         | 2,2                      | 608              | 42,4                           |
| NO01         | 0,38         | 0,36         | 0,67             | 0,44     | 2,6      | 71,4         | 14,4                     | 141              | 26,2                           |
| SE02         | 0,34         | 0,17         | 3,16             | 0,31     | 0,8      | 49,3         | 3,8                      | 418              | 31,4                           |
| US01         | 1,37         | 0,08         | 14,60            | 0,76     | 0,2      | 34,2         | 15,9                     | 1808             | 586,6                          |
| US02         | 1,21         | 0,22         | 4,42             | 0,85     | 0,2      | 65,7         | 35,3                     | 391              | 227,2                          |
| US03         | 0,32         | 0,31         | 0,98             | 0,43     | 0,2      | 47,2         | 8,1                      | 282              | 37,5                           |
| US04         | 0,40         | 0,28         | 1,21             | 0,72     | 0,8      | 46,8         | 22,7                     | 126              | 64,3                           |
| US05         | 0,94         | 0,42         | 2,52             | 0,92     | 0,8      | 37,9         | 28,6                     | 121              | 74,0                           |
| YU01         | 0,23         | 0,04         | 7,56             | 0,34     | 5,6      | 36,8         | 3,6                      | 2181             | 198,4                          |

| Netz | $t_p$<br>(min) | $L_{tm}$<br>(m) | $V_g$<br>(%) | $L_{t10}$<br>(m) | B<br>(m) | $F_p$<br>(-) |
|------|----------------|-----------------|--------------|------------------|----------|--------------|
| AU01 | 8              | 797             | 0            | 1293             | 170      | 7,58         |
| CA01 | 5              | 478             | 0            | 684              | 117      | 5,84         |
| CA02 | 7              | 1017            | 0            | 1863             | 365      | 5,10         |
| CH01 | 2              | 400             | 0            | 671              | 98       | 6,82         |
| DK01 | 5              | 346             | 0            | 454              | 45       | 10,12        |
| FR01 | 16             | 1798            | 0            | 2748             | 300      | 9,16         |
| GB01 | 4              | 482             | 0            | 691              | 62       | 11,19        |
| GB02 | 12             | 674             | 0            | 1163             | 44       | 26,62        |
| HU01 | 5              | 553             | 0            | 1085             | 37       | 29,59        |
| IT01 | 1              | 212             | 0            | 292              | 45       | 6,44         |
| NO01 | 3              | 332             | 0            | 605              | 156      | 3,87         |
| SE01 | 4              | 327             | 0            | 517              | 100      | 5,17         |
| SE02 | 5              | 363             | 0            | 613              | 115      | 5,34         |
| US01 | 2              | 109             | 0            | 259              | 37       | 6,91         |
| US02 | 8              | 527             | 0            | 882              | 48       | 18,27        |
| US03 | 10             | 287             | 0            | 456              | 178      | 2,56         |
| US04 | 7              | 235             | 0            | 355              | 118      | 3,01         |
| US05 | 1              | 203             | 0            | 343              | 123      | 2,79         |
| YU01 | 2              | 456             | 0            | 720              | 68       | 10,66        |

Tab. 4: weitere Kenndaten der UDC-Netze

B: charakteristische Gebietsbreite bezogen auf die undurchl. Fläche ( $A_{und}/L_{ü}$ ) (m)

$F_p$ : Formparameter ( $L_{t10}/B$ ) (-)

$L_{tm}$ : gewichtete (bezogen auf  $A_{und}$ ) mittlere Fließstrecke (m)

$L_{tx}$ : Fließstrecke bis zum Auslaß, die von x% der Haltungen überschritten wird (m)

$t_p$ : gewichtete (bezogen auf  $A_{und}$ ) mittlere Fließzeit (min)

$V_g$ : Vermaschungsgrad (%)

#### 4. AUFBAU DER UNTERSUCHUNG (Kheil, Semke, 1991)

Die zwei hintereinander geschalteten Teilprozesse "Abflußkonzentration" und "Transport im Entwässerungskanal" werden nach sechs verschiedenen Ansätzen (Tab. 6) simuliert und die Abflußganglinien am Systemauslaß verglichen. Zunächst wird mit HYSTEM-EXTRAN gerechnet.

- HYSTEM (Harms, Verworn, 1984) ist ein hydrologisches Modell zur Simulation der Abflußkonzentration an der Gebietsoberfläche. Für jedes angeschlossene Teilgebiet wird der abflußwirksame Niederschlag nach dem Prinzip der Standardeinheitsganglinie (Standard-EGL) in Zuflußwellen zu den Kanalschächten umgeformt. Die Umwandlung erfolgt getrennt für die durchlässigen und undurchlässigen Flächen.
- EXTRAN (Fuchs, Verworn) ist ein hydrodynamisches Modell zur Berechnung des Abflußtransportes im Kanal. Das vollständige Saint-Venant'sche Gleichungssystem (Saint-Venant GS) wird dabei gelöst.

|   | Simulations-<br>Programme | Abfluß-<br>konzentration           | Abfluß-<br>Transport                  | Charakteristika<br>der Modellierung |
|---|---------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | HYSTEM-EXTRAN             | Standard-EGL<br>(ohne Kalibration) | Saint-Venant GS<br>(ohne Kalibration) | hydrodynamisch<br>detailliert       |
| 2 | HYSTEM-KMROUT             | Standard-EGL<br>(ohne Kalibration) | Normalabfluß<br>(ohne Kalibration)    | vereinfacht<br>detailliert          |
| 3 | HYSTEM                    | Standard-EG<br>kalibriert          | keine                                 | hydrologisch<br>holistisch          |
| 4 | KOSIM                     | Nash-Kaskade<br>kalibriert         | keine                                 | hydrologisch<br>holistisch          |
| 5 | Ansatz nach TZVI          | keine                              | TZV-EGL<br>(ohne Kalibration)         | hydrologisch<br>holistisch          |
| 6 | HYSTEM-TZV                | Standard EGL<br>(ohne Kalibration) | TZV-EGL<br>(ohne Kalibration)         | hydrologisch<br>holistisch          |

Tab. 6: Liste der Ansätze zur Modellierung der Konzentration und des Transports

Bei der Simulation mit HYSTEM-EXTRAN werden Haltungen und angeschlossene Gebietsoberflächen detailliert beschrieben. Vergleiche mit Meßdaten am Systemauslaß zeigen, daß dieses Modell nach einer Kalibrierung in der Lage ist, den Ganglinienverlauf gut bis sehr gut anzunähern (Zinn, 1990; Khelil, Semke, 1991). Da es in dieser Untersuchung nur auf den relativen Modellvergleich ankommt, werden zur Simulation mit HYSTEM-EXTRAN Standardparameterwerte eingesetzt. Die damit gewonnenen Ergebnisse gelten für alle fünf vereinfachten Ansätze als Referenz.

KMROUT (Grotehusmann, Semke, 1990) ist *ein detailliertes Transportmodell*, in dem jede einzelne Kanalhaltung als Speicher betrachtet wird, dessen Verhalten durch Q-h-Beziehung charakterisiert wird. Für alle gängigen geschlossenen Profile sind diese Q-h-Beziehungen aus dem ATV-Arbeitsblatt A110 entnommen worden.

*In den folgenden Ansätzen wird das Entwässerungssystem als ein einziges undifferenziertes Übertragungssystem betrachtet.* Der abflußwirksame Niederschlag wird direkt in die Abflußganglinie am Systemauslaß umgewandelt.

- In HYSTEM erfolgt die Übertragung mit Hilfe der *Standard-Einheitganglinie*, deren Parameter (die Schwerpunktlaufzeit  $t_L$ ) kalibriert wird.
- In KOSIM erfolgt die Übertragung mit Hilfe der *Nash-Kaskade*, deren Parameter  $n$  und  $k$  kalibriert werden.
- Im Gegensatz zu HYSTEM und KOSIM bedarf Ansatz 5 keiner Kalibrierung. Die verwendete Übertragungsfunktion entspricht einer errechneten *Transportdauer-*

*Verteilung (TZV) im Kanal.* Zur ihrer Ermittlung gelten folgende zwei Annahmen: Normalabfluß und Rohrvollfüllung (Kap. 2.1). Dadurch wird die Zeitverzögerung und der "Puffereffekt" der Abflußkonzentration vernachlässigt.

- Im Ansatz 6 wird der Baustein "Abflußkonzentration" dem Transportbaustein vorgeschaltet. Die Abflußkonzentration wird mit HYSTEM nachgebildet, in dem die Schwerpunktzeit  $t_L$  für das durchschnittlich an eine Haltung angeschlossene Oberflächengebiet ermittelt wird.

## 5. KRITERIEN ZUR BEURTEILUNG DER MODELLABWEICHUNGEN

Zur Quantifizierung der Abweichungen zweier Ganglinien werden die Größen **DEVS** (%), **DY** (%) und **DS** (%) berechnet. **DEVS** berechnet sich nach Gl. 1 (Zior, 1987),. Abweichungen in der Nähe des maximalen Wertes werden hier besonders stark berücksichtigt.

$$(Gl. 1) \quad DEVS = 200 \sum_{i=1}^n |y_{1i} - y_{2i}| \frac{y_{1i}}{n y_{1max}}$$

mit

$i$  : der Zeitpunkt  $i \cdot \Delta t$  (Ordinaten-Werte der zu vergleichenden Kurven zu gleichen Zeitpunkten)

$n$  : Anzahl der Meß- bzw. Berechnungspunkte

$y_1$  : Ordinaten-Werte der Bezugskurve bzw. gemessene Abflußwerte in  $m^3/s$

$y_2$  : Ordinaten-Werte der zu vergleichenden Kurve bzw. berechnete Abflußwerte in  $m^3/s$

$y_{max}$  : maximaler Ordinaten-Wert der entsprechenden Kurve bzw. Spitzenabflußwert in  $m^3/s$

| Prüfgröße | Modellanpassung |      |           |          |
|-----------|-----------------|------|-----------|----------|
|           | sehr gut        | gut  | brauchbar | schlecht |
| DEVS      | 0-3             | 3-10 | 10-18     | >18      |

Tab. 7: Beurteilung der Abweichungen zwischen Ganglinien

DY (%) stellt die relative Differenz zwischen den Spitzenwerten der zu vergleichenden Abflußganglinien dar:

$$(Gl. 2) \quad DY = \frac{y_{2max} - y_{1max}}{y_{1max}}$$

DS (%) repräsentiert die relative Differenz zwischen den zeitlichen Schwerpunkten der zu vergleichenden Ganglinien:

$$(GL. 3) \quad DS = \frac{S_2 - S_1}{S_1}$$

mit

$S_1$  : zeitlicher Schwerpunkt der Bezugsganglinie (min)

$S_2$  : zeitlicher Schwerpunkt der zu vergleichenden Ganglinie (min).

#### Anmerkung

Die Berechnung von Deviationsgrößen kann nicht den graphischen Vergleich der Kurven ersetzen, wenn es gilt, größere Abweichungen zu beurteilen. Eine einfache Zeitverschiebung von Ganglinien gleicher Form führt z. B zu hohen Deviationswerten, obgleich der Anwender aus dem graphischen Vergleich auf eine gute Modellanpassung schließen würde.

## 7. DIE HYDROLOGISCHE DETAILLIERTE BERECHNUNG (HYSTEM-KMROUT)

| Netz<br>Name | DEVS (%)            |                     |                     |                       | mittleres<br>Sohlgefälle (%) |
|--------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|------------------------------|
|              | Blockregen<br>Nr. 1 | Blockregen<br>Nr. 2 | Blockregen<br>Nr. 3 | Naturregen<br>min-max |                              |
| CA01         | nicht vorh.         | 0,60                | nicht vorh.         | 0,78-2,34             | 1,0                          |
| CA02         | nicht vorh.         | nicht vorh.         | nicht vorh.         | 3,62                  | 0,7                          |
| DK01         | nicht vorh.         | 0,47                | nicht vorh.         | 0,77-0,87             | 1,2                          |
| GB01         | nicht vorh.         | nicht vorh.         | nicht vorh.         | 1,87                  | 3,2                          |
| HU01         | 2,60                | 0,65                | 0,29                | nicht vorh.           | 2,9                          |
| IT01         | nicht vorh.         | 0,47                | nicht vorh.         | 1,00-1,98             | 17,6                         |
| NO01         | nicht vorh.         | 0,35                | nicht vorh.         | nicht vorh.           | 2,6                          |
| SE01         | nicht vorh.         | 0,33                | nicht vorh.         | 0,30-1,28             | 0,8                          |
| US01         | nicht vorh.         | 0,81                | nicht vorh.         | nicht vorh.           | 0,2                          |
| US02         | nicht vorh.         | nicht vorh.         | 0,47                | nicht vorh.           | 0,2                          |
| <b>US03</b>  | <b>7,52</b>         | <b>5,79</b>         | <b>5,84</b>         | nicht vorh.           | <b>0,2</b>                   |

Tab. 8: Vergleich zwischen HYSTEM-EXTRAN und HYSTEM-KMROUT

Die vom Modell HYSTEM-KMROUT berechneten Abflußganglinien zeigen für alle Netze (außer US03) eine sehr gute Übereinstimmung mit denen von HYSTEM-EXTRAN (Tab. 8). Eine tendentiell wachsende Abweichung von KMROUT (bzw. eine größere Streuung der Deviationswerte) ist zu verzeichnen, wenn Naturereignisse simuliert werden.

Aus theoretischer Sicht besteht der Hauptunterschied zwischen den detaillierten Transportmodellen EXTRAN und KMROUT in der Formulierung der Bewegungsgleichung bezogen auf eine Haltung. Im vollständigen hydrodynamischen Ansatz wird die Energiebilanz in einem infinitesimalen Kanalabschnitt  $\Delta x$  nach Saint-Venant formuliert (Gl. 4). Mehrere gleichwertige Formulierungen der Saint-Venant'schen Bewegungsgleichung werden in den unterschiedlichen Programmpacketen (z.B. EXTRAN, MOUSE, CARREDAS) verwendet.

$$(Gl. 4) \quad \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} + I_r - I_s = 0$$

[1]      [2]      [3]      [4]      [5]

mit

$g$  : Erdbeschleunigung (=9,81 m/s<sup>2</sup>)

$v$  : Fließgeschwindigkeit im betrachteten infinitesimalen Kanalabschnitt  $\Delta x$  (m/s)

$y$  : Wasserstand in m über Sohlhöhe im betrachteten Kanalabschnitt  $\Delta x$

[1] Lokale Beschleunigung

[2] Konvektive Beschleunigung

[3] Relatives Wasserspiegelgefälle bezogen auf die Kanalsohle

[4] Reibungsgefälle

[5] Sohlgefälle

Untersuchungen (u.a. W. Verworn, 1980, EPA 1971) zeigen, daß die Beschleunigungsterme [1] und [2] wenig Einfluß auf die berechneten Abflußganglinien haben, es sei denn, daß das Sohlgefälle im Kanal extrem niedrig ist. Die Vernachlässigung des dritten Termes ist demgegenüber von entscheidender Bedeutung, weil dadurch das Druckgefälle im Kanal dem Sohlgefälle gleichgesetzt wird. Diese Annahme trifft zu, wenn stationäre Verhältnisse im Freispiegelabfluß (= Normalabfluß) herrschen. KMROUT beruht auf solche Q-h-Beziehungen, die für den Normalabfluß im Freispiegelabfluß ermittelt wurden (ATV-A110, 1988). Insofern gilt in KMROUT die vereinfachte Bewegungsgleichung nach Gl. 5.

$$(Gl. 5) \quad I_r - I_s = 0$$

Die größeren Abweichungen bei Naturereignissen lassen sich unmittelbar durch diese Vereinfachung erklären. Der unregelmäßige Verlauf der Zuflußganglinien zu den Schächten steht im Widerspruch zu der Annahme, daß jederzeit ein stationärer Fließzustand in der Haltung herrscht. Abweichungen sind zwischen den

Berechnungen nach Gl. 4 und Gl. 5 zu erwarten, wenn sich die Wasserspiegellinie von der Kanalsohllinie deutlich unterscheidet, z.B. in folgenden Fällen:

1. Das Sohlgefälle ist niedrig (<0,1%)
2. Unmittelbar aneinander angeschlossene Haltungen weisen unterschiedliche Sohlgefälle auf.
3. Die Zuflußwellen zu den Kanalschächten sind räumlich und/oder zeitlich ungleichmäßig verteilt.
4. Einstau/Überstau bzw. Druckabflüsse treten auf.

Nach Prüfung der Kanalnetzdaten von US03 wurde festgestellt, daß eine Haltung (Haltung 13) kein Gefälle aufweist, während die unmittelbar angeschlossenen Haltungen ein Gefälle von mehreren Promille aufweisen (0,37%; 0,2%; 0,2%). Für Haltung 13 ist die Annahme des Normalabflusses (Energiegefälle = Sohlgefälle) untauglich. Die dadurch erzeugte Verzerrung der Abflußganglinie wirkt sich bis zum Kanalauslaß aus. Eine Korrektur des Sohlgefälles in Haltung 13 auf 0,2% (Erhöhung der Sohlhöhe um 1 cm im oberen Schacht) bewirkt eine deutliche Verbesserung der Ergebnisse von KMROUT (siehe Tab. 9)

| Simulationsfall     | DEVS (%)            |                     |                     |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                     | Blockregen<br>Nr. 1 | Blockregen<br>Nr. 2 | Blockregen<br>Nr. 3 |
| US03 vor Korrektur  | 7,52                | 5,79                | 5,84                |
| US03 nach Korrektur | 0,37                | 0,24                | 0,56                |

Tab. 9: Deviationen zwischen HYSTEM-EXTRAN und HYSTEM-KMROUT in US03

Erstaunlich sind die Ergebnisse von KMROUT nach der Korrektur insbesondere für Blockregen Nr. 3, wenn der Kanal deutlich überlastet ist (Tab. 10). Folgende Gründe können hierfür genannt werden:

- Die "hydraulischen Störungen" (z. B. lokaler Druckabfluß oder sogar lokaler Rückstau) in den oberhalb liegenden Haltungen verbreiten sich nur in gedämpfter Form bis zum Kanalauslaß. Diese Dämpfung erfolgt durch die Pufferwirkung der hintereinander geschalteten Haltungen und weil der Kanalauslaß eine besondere hydraulische Schnittstelle (Normalabfluß bzw. kritischer Abfluß) darstellt.
- Die maximalen Durchflußraten in den Rohren unter Druckabfluß unterscheiden sich im untersuchten Fall (US03, BR3) kaum von ihrer Vollfüllungsleistung im Normalabfluß, weil die Zuflußwellen zu den Schächten weitgehend den gleichen Verlauf haben und die Transportkapazität im Kanal keine deutliche Engpässe aufweist.

| Netz Name | Ein/Überstau in % der Schächte |                 |                 | Netz Name | Ein/Überstau in % der Schächte |                 |                 |
|-----------|--------------------------------|-----------------|-----------------|-----------|--------------------------------|-----------------|-----------------|
|           | Blockreg. Nr. 1                | Blockreg. Nr. 2 | Blockreg. Nr. 3 |           | Blockreg. Nr. 1                | Blockreg. Nr. 2 | Blockreg. Nr. 3 |
| AU01      | 2                              | 4               | 17              | NO01      | 0                              | 0               | 0               |
| CA01      | 0                              | 0               | 0               | SE01      | 0                              | 3               | 24              |
| CA02      | 0                              | 2               | 4               | SE02      | 2                              | 45              | 76              |
| CH01      | 0                              | 0               | 0               | US01      | 0                              | 0               | 0               |
| DK01      | 0                              | 0               | 49              | US02      | 0                              | 0               | 0               |
| GB01      | 0                              | 5               | 67              | US03      | 0                              | 27              | 54              |
| GB02      | 15                             | 39              | 80              | US04      | 0                              | 0               | 0               |
| FR01      | 13                             | 22              | 44              | US05      | 0                              | 0               | 0               |
| HU01      | 0                              | 0               | 0               | YU01      | 0                              | 0               | 5               |
| IT01      | 0                              | 0               | 0               |           |                                |                 |                 |

Tab. 10: Leistungsfähigkeit der Kanalnetze (Simulation mit HYSTEM-EXTRAN, Standardparameter für Abflußbildung und -konzentration)

Weitere Untersuchungen (Deyda, Khelil, Siekmann; 1993) zeigen, daß größere Abweichungen zwischen EXTRAN und KMROUT in den inneren Haltungen zu erwarten sind, wenn die Zuflußbelastung ungleichmäßig verteilt ist. In diesem Fall scheint eine explizite Berücksichtigung des dritten Termes (Gl. 2) unumgänglich.

## 8. GENAUIGKEIT DER HOLISTISCHEN ANSÄTZE

### 8.1 Weitere Randbedingungen der Untersuchung

In hydrologischen holistischen Ansätzen wird das Entwässerungssystem als Gesamtheit betrachtet (griechisch Holon = Gesamtheit). Praktisch wird das Entwässerungssystem durch eine einzige Haltung beschrieben, deren Charakteristiken einem repräsentativen Systemverhalten entsprechen.

- Die Berechnung der Zuflußmenge ( $m^3$ ) erfolgt hier durch Angabe einer Gesamtfläche für das Einzugsgebiet.
- Konzentration sowie Transport im Kanal werden in einem Schritt erfaßt.

Durchlässige und undurchlässige Flächen verhalten sich hinsichtlich der Abflußbildung und -konzentration so unterschiedlich, daß eine undifferenzierte Modellierung schwer möglich ist. Tab. 11 veranschaulicht die Problematik.

Für Blockregen Nr. 1 erzeugen die durchlässigen Flächen keinen Abfluß. Für Blockregen Nr. 2 wird ihr Einfluß spürbar. Für manche Netze (z.B. HU01, US01) ändern sich die Abflußverhältnisse drastisch. Für Blockregen Nr. 3 liefern durchlässige Flächen in den meisten Entwässerungsgebieten nennenswerte Abflüsse. Dadurch daß

nicht zwischen durchlässigen und undurchlässigen Flächen unterschieden wird, ist es unmöglich, für die drei Modellregen gleichwertige Ergebnisse zu erzielen, ohne die Modellparameter der Abflußbildung (Verluste bzw. angeschlossene Flächen) jeweils neu zu kalibrieren. *Um Abweichungen auszuschließen, die durch ungeeignete Ermittlung der Regenverluste entstehen, werden in den folgenden Simulationsvergleichen nur die undurchlässigen Flächen des Einzugsgebiets berücksichtigt.*

| Netz Name | Abflußverhältnis in %<br>$V_{und}/V_{ges}$ |                 |                 | Netz Name | Abflußverhältnis in %<br>$V_{und}/V_{ges}$ |                 |                 |
|-----------|--|-----------------|-----------------|-----------|--|-----------------|-----------------|
|           | Blockreg. Nr. 1                            | Blockreg. Nr. 2 | Blockreg. Nr. 3 |           | Blockreg. Nr. 1                            | Blockreg. Nr. 2 | Blockreg. Nr. 3 |
| AU01      | 100  | 75              | 54              | NO01      | 100  | 99              | 99              |
| CA01      | 100  | 77              | 57              | SE01      | 100  | 80              | 61              |
| CA02      | 100  | 83              | 66              | SE02      | 100  | 86              | 71              |
| CH01      | 100  | 88              | 74              | US01      | 100  | 28              | 14              |
| DK01      | 100  | 75              | 54              | US02      | 100  | 60              | 36              |
| GB01      | 100  | 81              | 63              | US03      | 100  | 100             | 99              |
| GB02      | 100  | 86              | 71              | US04      | 100  | 93              | 85              |
| FR01      | 100  | 75              | 55              | US05      | 100  | 84              | 67              |
| HU01      | 100  | 55              | 32              | YU01      | 100  | 60              | 38              |
| IT01      | 100  | 99              | 97              |           |  |                 |                 |

Tab. 11: Beitrag der undurchlässigen Flächen ( $V_{und}$ ) zum gesamten Abflußvolumen ( $V_{ges}$ ) (Simulation mit HYSTEM-EXTRAN, Standardparameter)

### 8.1 Vereinfachte Simulation mit HYSTEM

Das Einzugsgebiet wird in eine Rechteckfläche gleicher Größe umgewandelt, deren Länge  $L$  der abgeschätzten Hauptfließlänge entspricht und deren Breite  $B$  sich aus der Flächenbeziehung  $B = A / L$  ergibt (Tab. 4). Das Gefälle dieses vereinfachten Einzugsgebietes resultiert aus der Höhendifferenz des äußersten Punktes des Netzes bis zum Gebietsauslaß. Die Schwerpunktlaufzeit  $t_L$  (min) wird durch Regressionsformel in Abhängigkeit der Gebietsmerkmale (Gl. 6) ermittelt.

$$(GL. 6) \quad t_L = \alpha_u + 0,87 \ln(A_e) - 3 \frac{L}{l_f}$$

$\alpha_u$  : Konstante in min (Standard : 11 min)

$A_e$  : Einzugsgebietsfläche in ha

$L$  : idealisierte Länge des Einzugsgebiets in m

$l_f$  : durchschnittliche Länge des Fließweges auf der Oberfläche (m)

$t_L$  : Schwerpunktlaufzeit in min

Die Kalibrierung von HYSTEM an HYSTEM-EXTRAN erfolgt für Blockregen Nr. 1, wobei die Fließzeitkonstante  $\alpha_u$  aus Gl. 6 solange variiert wird, bis die minimale Deviation DEVS bestimmt ist.

| Netz        | Abfluß-<br>volumen | DEVS        | YMAX <sub>1</sub>   | DY           | S <sub>1</sub> | DS            |
|-------------|--------------------|-------------|---------------------|--------------|----------------|---------------|
|             | [m <sup>3</sup> ]  | [%]         | [m <sup>3</sup> /s] | [%]          | (min)          | (%)           |
| AU01        | 933                | 4.73        | 1.31                | -4.43        | 30.18          | -10.42        |
| <b>CA01</b> | <b>734</b>         | <b>6.34</b> | <b>0.72</b>         | <b>18.74</b> | <b>22.97</b>   | <b>-29.65</b> |
| CA02        | 178                | 5.14        | 4.15                | -6.60        | 29.87          | -9.49         |
| CH01        | 607                | 1.89        | 0.72                | -10.07       | 19.09          | -10.04        |
| DK01        | 187                | 4.09        | 0.22                | 0.66         | 20.87          | -23.34        |
| IT01        | 133                | 1.47        | 0.22                | -19.50       | 13.60          | 0.99          |
| FR01        | 354                | 4.58        | 3.37                | 1.38         | 42.30          | -15.31        |
| GB01        | 392                | 3.96        | 0.41                | 6.21         | 18.93          | -11.02        |
| GB02        | 455                | 3.73        | 0.29                | 3.92         | 28.25          | -9.19         |
| HU01        | 364                | 2.84        | 0.25                | 14.20        | 25.56          | -11.23        |
| NO01        | 865                | 2.07        | 0.96                | -4.90        | 19.44          | -10.31        |
| SE01        | 466                | 2.99        | 0.49                | -0.27        | 19.33          | -7.77         |
| SE02        | 640                | 4.09        | 0.50                | 14.14        | 22.63          | -11.60        |
| US01        | 88                 | 3.94        | 0.07                | 10.91        | 24.18          | -11.56        |
| US02        | 382                | 5.47        | 0.26                | -1.44        | 30.28          | -15.75        |
| US03        | 734                | 5.46        | 0.69                | 25.82        | 22.18          | -26.68        |
| US04        | 378                | 2.66        | 0.31                | 0.69         | 23.96          | -9.65         |
| <b>US05</b> | <b>348</b>         | <b>1.43</b> | <b>0.34</b>         | <b>2.55</b>  | <b>20.67</b>   | <b>-4.81</b>  |
| YU01        | 452                | 3.55        | 0.52                | 4.91         | 19.60          | -19.26        |
| $\mu$       |                    | 3.71        |                     | 3.00         |                | -12.95        |
| $\sigma$    |                    | 1.38        |                     | 10.33        |                | 7.20          |

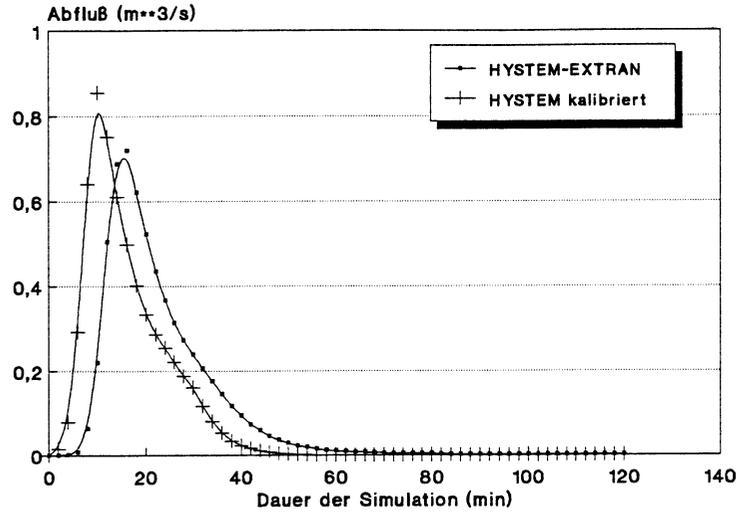
Tab. 12: Abweichungen zwischen HYSTEM-EXTRAN und HYSTEM (kalibriert); für Modellregen Nr. 1 ohne Regenverluste

Zur Veranschaulichung der Ergebnisse sind die Abflußganglinien für 4 Netze CA01 (geringste Übereinstimmung), FR01, YU01, IT01 dargestellt (Abb. 1 bis Abb. 4).

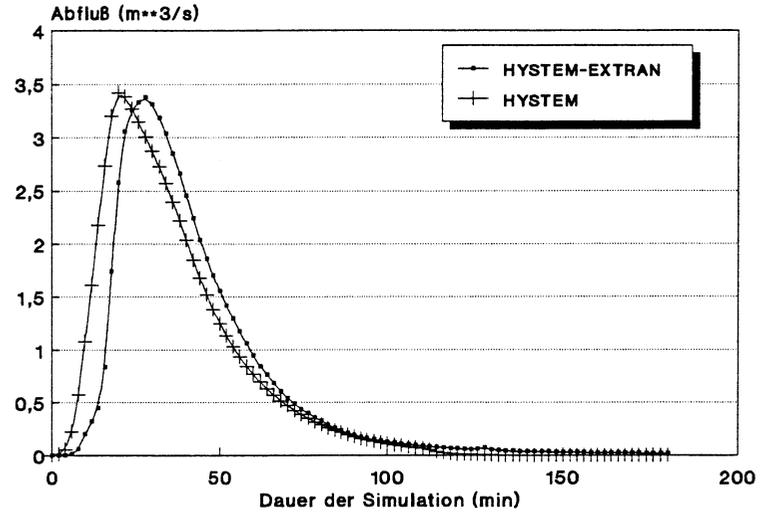
## 8.2 Vereinfachte Simulation mit der linearen Speicherkaskade (KOSIM)

Die Untersuchung mit KOSIM erfolgt nach dem gleichen Muster wie in 8.1. In diesem Fall müssen jedoch zwei Parameter kalibriert werden :  $n$  (-) (Anzahl der linearen Speicher) und  $k$  (min) (Speicherkonstante). Die Kalibrierung erfolgt nach der Newton'schen Gradienten-Methode (Paulsen, 1987), wobei das Optimierungskriterium die Summe der kleinsten Fehlerquadrate zwischen den Abflußganglinien ist. Für Blockregen Nr. 1 sind die Ergebnisse in Tab. 13 zusammengefaßt.

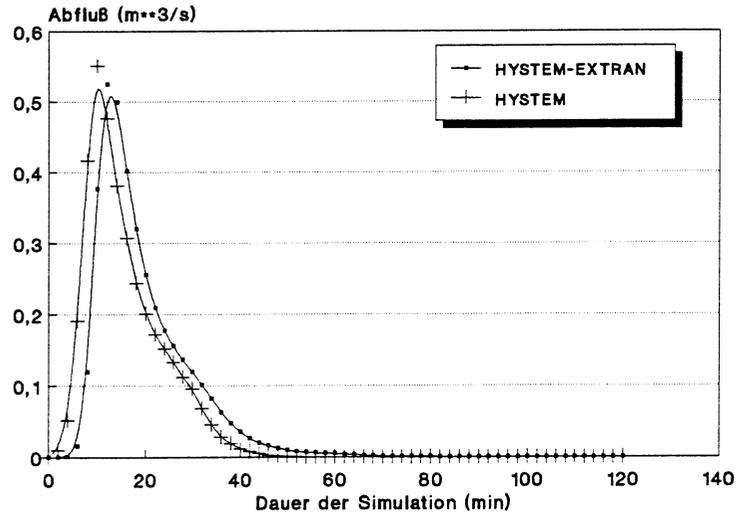
Im Gegensatz zu den von Paulsen (1987) aufgeführten Ergebnissen liegt die optimierte Speicheranzahl [ $n$ ] zwischen 5 und 9 ( $\mu = 6,2$  und  $\sigma = 1,22$ ). Eine feinere Betrachtung der Tabellendaten läßt folgende Bemerkungen zu :



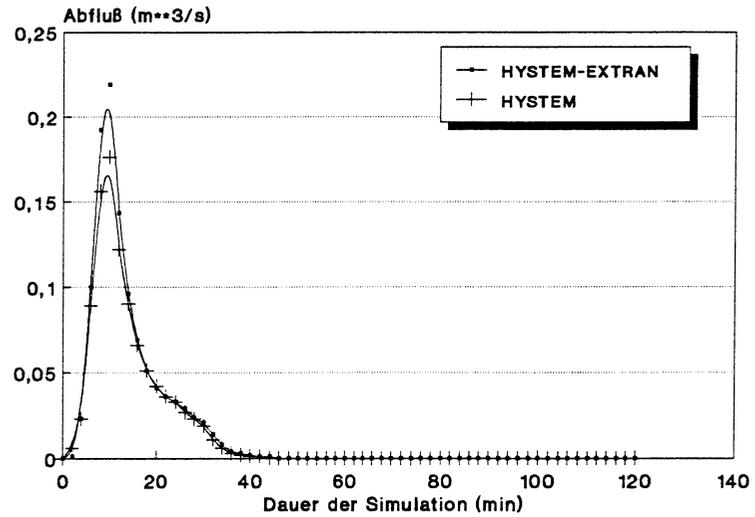
CA01, Blockreg.1, Aund ohne Verluste



FR01, Blockreg.1, Aund ohne Verluste



YU01, Blockreg.1, Aund ohne Verluste



IT01, Blockreg. 1, Aund ohne Verluste

| DC-Netz  | Abflußvolumen | $t_{L1}$<br>[min] | $n_{1opt}$<br>[-] | $k_{1opt}$<br>[min] | DEVS<br>[-] | DY<br>[%] | VGL<br>[%] |
|----------|---------------|-------------------|-------------------|---------------------|-------------|-----------|------------|
| AU01     | 1266          | 21,45             | 6                 | 3,42                | 1,9         | -4,2      | 81         |
| CA02     | 4022          | 21,85             | 6                 | 3,55                | 1,5         | -1,3      | 97         |
| CH01     | 395           | 11,49             | 6                 | 3,55                | 1,5         | -1,3      | 97         |
| DK01     | 122           | 13,35             | 8                 | 1,71                | 1,1         | -1,9      | 108        |
| FR01     | 4707          | 31,17             | 5                 | 5,63                | 2,8         | -2,3      | 53         |
| GB01     | 258           | 11,08             | 8                 | 1,52                | 0,4         | 0,0       | 173        |
| GB02     | 294           | 19,81             | 5                 | 3,90                | 1,8         | -3,4      | 64         |
| HU01     | 238           | 16,93             | 5                 | 3,38                | 1,5         | -1,7      | 46         |
| IT01     | 89            | 6,44              | 9                 | 0,93                | 0,7         | 0,7       | 115        |
| NO01     | 565           | 11,37             | 6                 | 2,12                | 0,5         | 0,5       | 146        |
| SE01     | 300           | 11,43             | 7                 | 1,79                | 0,6         | -0,4      | 149        |
| SE01     | 414           | 14,04             | 6                 | 2,48                | 0,8         | -0,40     | 109        |
| US01     | 57            | 15,85             | 5                 | 3,34                | 1,1         | -0,5      | 82         |
| US02     | 249           | 21,82             | 6                 | 3,41                | 2,1         | -4,5      | 72         |
| US04     | 246           | 16,07             | 5                 | 3,28                | 1,3         | -2,1      | 82         |
| $\mu$    |               |                   |                   |                     | 1,25        | -1,43     | 99,46      |
| $\sigma$ |               |                   |                   |                     | 0,68        | 1,65      | 36,51      |

Tab. 13 : Abweichungen zwischen HYSTEM-EXTRAN und KOSIM (kalibriert), Simulation mit Blockregen Nr. 1, Standardwerte für die Regenverluste

$t_L$  : Laufzeit<sup>3</sup> zwischen dem Schwerpunkt des abflußwirksamen Niederschlags und dem Schwerpunkt der Abflußganglinie aus HYSTEM-EXTRAN

VGL : Erhöhung dieser Fehlergröße (%) gegenüber der minimalen, wenn die Speicheranzahl auf  $n=3$  festgehalten wird (d.h. nur der Parameter K wird kalibriert)

- Die benötigte Speicheranzahl ist größer, je schneller der Kanal reagiert ( $t_L$  klein).
- Der maximale Abfluß ( $m^3/s$ ) wird von KOSIM systematisch zu gering berechnet.
- Wenn  $n$  auf  $n=3$  festgehalten wird, steigt die zu minimierende Fehlergröße im Durchschnitt um 100% ( $\sigma = 36\%$ ). Je größer  $n_{opt}$  und je kleiner  $t_L$  ist, desto stärker tritt die Diskrepanz in Erscheinung. *Die Abweichungen bei  $n = 3$  bleiben jedoch im Bereich gut bis sehr gut. Damit ist die KOSIM-Anpassung immer noch besser als diejenige von HYSTEM.*

<sup>3</sup> Bei der hydrologischen Simulation mit KOSIM ist die entsprechende Schwerpunktlaufzeit  $t_L = n \cdot k$ .

Dies erklärt sich durch folgende wichtige Eigenschaft der Übertragungsfunktion nach der Speicherkaskade.

*Bei konstanter Schwerpunktlaufzeit ( = mittlere Transportzeit im Kanalnetz unverändert) bewirkt eine höhere Speicheranzahl eine Verminderung des Flächenträgheitsmoments der durch die Einheitsganglinie angeschlossenen Fläche. Hydrologisch ausgedrückt, eine höhere Speicheranzahl bewirkt eine Verminderung des Retentionseffekts in der Kanalisation (vgl. Kap. 8.3).*

Dieses Phänomen ist besonders ausgeprägt im *kleinen* Kanalnetz IT01. Da dieses Netz sehr steil ist, fällt der Speichereffekt gegenüber der reinen zeitlichen Translation der Abflüsse im Kanal kaum ins Gewicht. Eine ausdrückliche Berücksichtigung der zeitlichen Fließ-Translation durch eine vorgeschaltete *Totzeit* (einfache zeitliche Verschiebung der Abflußganglinie) würde die benötigte Speicherzahl des Speicherkaskadebausteins reduzieren ( $n < 3$ ).

Die schlechteren Ergebnisse von HYSTEM gegenüber KOSIM lassen sich auch durch die Überschätzung des Retentionseffekts erklären.

Die idealisierte Einheitsganglinie von Verworn-Harms (Abb. 5) wird mit Hilfe der drei Parameter  $t_p$  (Zeit bis zum Auftreten des Maximalabflusses in min),  $Q_p$  (Maximalabfluß in  $m^3/s$ ) und  $k$  (Speicherkonstante in min) charakterisiert, die aus den dimensionslosen Parametern der Standardeinheitsganglinie ( $Q'$ ,  $t'$ ,  $k'$ ) und den gebietsbezogenen Parametern  $t_L$  (der geschätzten Schwerpunktlaufzeit) und  $A_e$  (der angeschlossenen Fläche) ermittelt werden (Verworn, Harms, 1980). Diese idealisierte Einheitsganglinie läßt sich als Approximation der Antwort eines linearen Einzelspeichers interpretieren, wenn die Input-Belastung kein Momentan-Impuls ist, sondern einen konstanten Wert über  $\Delta t = t_p$  aufweist (Abb. 6). Weitere Vergleiche zwischen den Übertragungsfunktionen nach der Standardeinheitsganglinie und nach der Speicherkaskade (Khelil, Semke, 1991) lassen folgende Schlußfolgerungen zu:

- Hinsichtlich  $t_L$  verhält sich die Standardeinheitsganglinie wie eine Speicherkaskade mit  $n = 1,96$ .
- Hinsichtlich  $t_p$  verhält sich die Standardeinheitsganglinie wie eine Speicherkaskade mit  $n = 1,21$ .

*Falls die oben erwähnte Totzeit dem eigentlichen Transportbaustein vorgeschaltet ist, werden möglicherweise beide Modelle HYSTEM und KOSIM gleichwertige Ergebnisse liefern.*

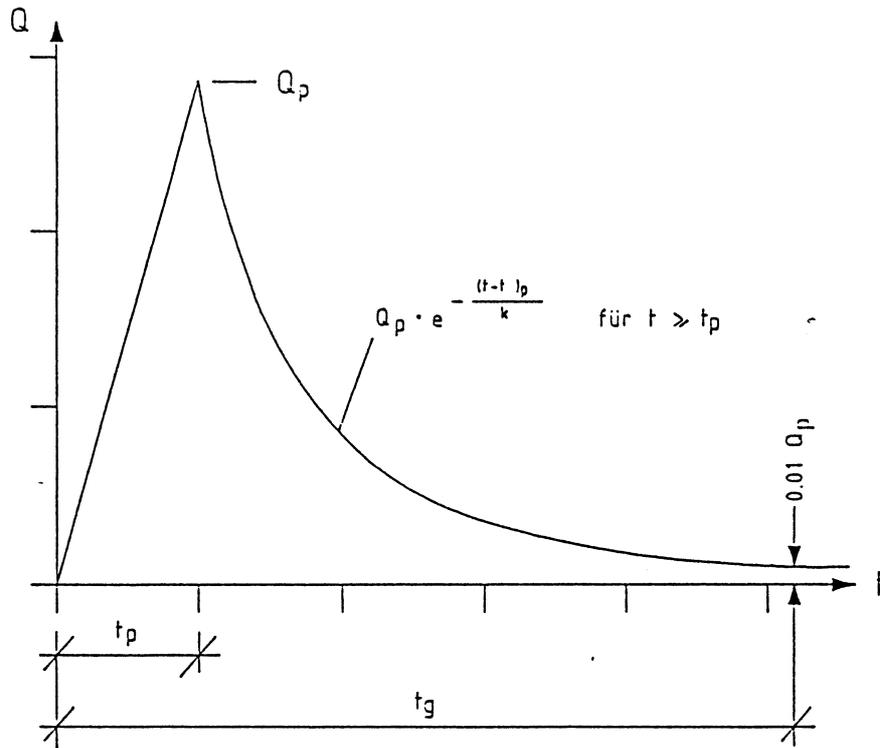


Abb. 5: Idealisierte Standardeinheitganglinie von Verwoorn-Harms

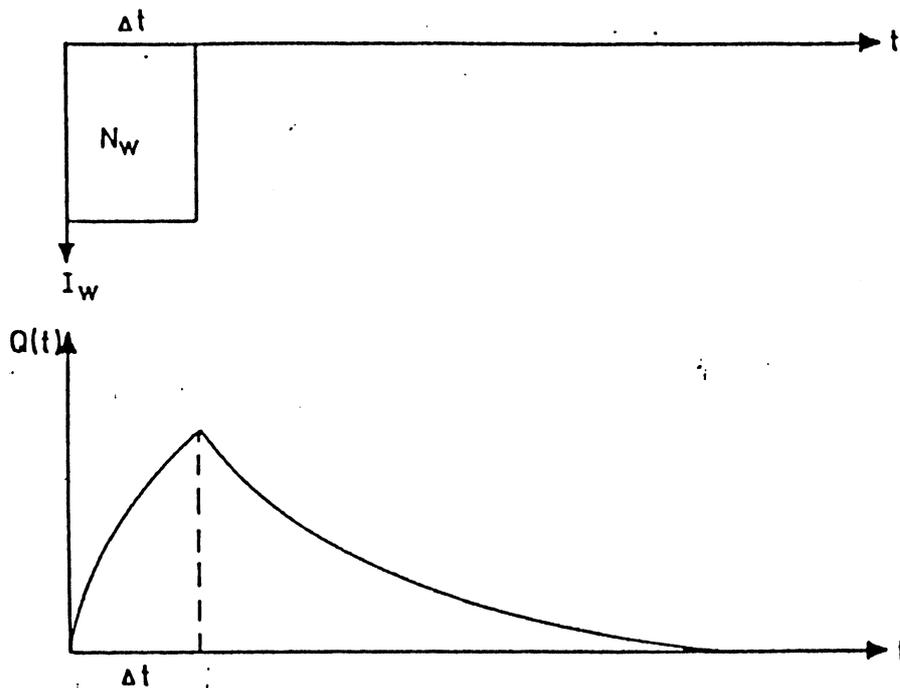


Abb. 6: Antwort eines linearen Einzelspeichers auf eine konstante Belastung über  $\Delta t$

### Einfluß der Belastung auf die Kalibrierungsergebnisse

Die Ergebnisse der Kalibrierung von KOSIM mit Blockregen 2 weisen gegenüber denen mit Blockregen 1 kaum Unterschiede auf:

- Die Kalibrierungsergebnisse für Blockregen 2 ( $n_2$ ,  $k_2$ ) sind gegenüber denjenigen für Blockregen 1 ( $n_1$ ,  $k_1$ ) kaum verändert. Dementsprechend sind die Übertragungsfunktionen fast deckungsgleich (vgl. Kap. 8.3).
- Die Deviationen DEVS liegen im gleichen Bereich.
- Die systematische Verschlechterung der Ergebnisse durch Fixierung des n-Wertes auf  $n = 3$  bleibt in der gleichen Größenordnung.

Mit den optimierten Parametern der ersten Kalibrierung ( $n_1$ ,  $k_1$ ) wurden weiterhin die Netze IT01 und CA02 für Blockregen 2 simuliert. Die so erhaltenen Abflußganglinien sind nicht von den Abflußganglinien zu unterscheiden, die mit den optimalen Parametern ( $n_2$ ,  $k_2$ ) berechnet wurden. Im Belastungsbereich zwischen Blockregen 1 und 2 reagiert also das Übertragungsglied weitgehend linear. Dies wird durch den Vergleich der Schwerpunktlaufzeit  $t_L$  in beiden Fällen ( $t_{L1}$ ,  $t_{L2}$ ) untermauert. Die

relative Differenz  $\frac{t_{L1} - t_{L2}}{t_{L2}}$  liegt zwischen 1,3 % (IT01) und 7,3 % (GB02),  $\mu = 4,7$  % und  $\sigma = 1,7$  %<sup>4</sup>.

### 8.3 Holistische Simulation nach der Transportzeitverteilung (TZV)

Das Konstruktionsprinzip des TZV-Ansatzes beruht auf einer gebietsmorphologischen Interpretation der Systemfunktion bzw. Einheitsganglinie. Letztere wird als Verteilung der Einzugsgebietsflächen im Bezug auf die Transportfließzeiten (vgl. Tab. 4) bis zum Gebietsauslaß charakterisiert. Daher ist sie, streng genommen, nur für die Kanalisation (Transport) repräsentativ und schließt die Wellentransformation an der Oberfläche (Konzentration) aus. Um letztere zu berücksichtigen, wird gegebenenfalls eine Simulation mit HYSTEM vorgeschaltet. Die berechnete Schwerpunktlaufzeit wird in diesem Fall durch Gl. 6 bestimmt, wobei die angesetzte undurchlässige Fläche dem durchschnittlichen Wert aller Kanalhaltungsflächen entspricht. Anlage 2 zeigt eine Gegenüberstellung der ermittelten Einheitsganglinien nach der linearen Speicherkaskaden (Blockregen 1 und 2) und nach der Transportzeitverteilung (TVZ).

Der TVZ-Ansatz ist sinnvoller, wenn innerhalb des Entwässerungssystems die Fließzeiten eine große Streuung aufweisen, d.h. wenn der Kanal eine gewisse

---

<sup>4</sup> Eine statistische Auswertung der Werte von  $t_{L1}$  (Blockregen 1) und  $t_{L2}$  (Blockregen 2) über alle Netze liefert die Regressionsformel  $t_{L2} = 0,92 \cdot t_{L1} + 0,52$  (min) mit Korrelationskoeffizient  $r = 0,999$

Größe erreicht hat. Aus diesem Grunde wurde eine Untersuchung mit dem größten Kanalnetz FR01 (181 Haltungen) und Blockregen 1 durchgeführt<sup>5</sup>.

|         | DEVS<br>[%] | V <sub>1</sub><br>[m <sup>3</sup> ] | VOL<br>[%] | YMAX <sub>1</sub><br>[m <sup>3</sup> /s] | DY<br>[%] | S1<br>[min] | DS<br>[%] |
|---------|-------------|-------------------------------------|------------|--|-----------|-------------|-----------|
| [1]-[2] | 14.98       | 4698.6                              | 3.37       | 2.29                                     | 21.18     | 43.32       | -33.59    |
| [1]-[3] | 6.79        | 4698.6                              | 3.01       | 2.29                                     | 15.16     | 43.32       | -12.79    |
| [2]-[3] | 17.38       | 4857.0                              | -0.35      | 2.77                                     | -4.97     | 28.77       | 31.32     |

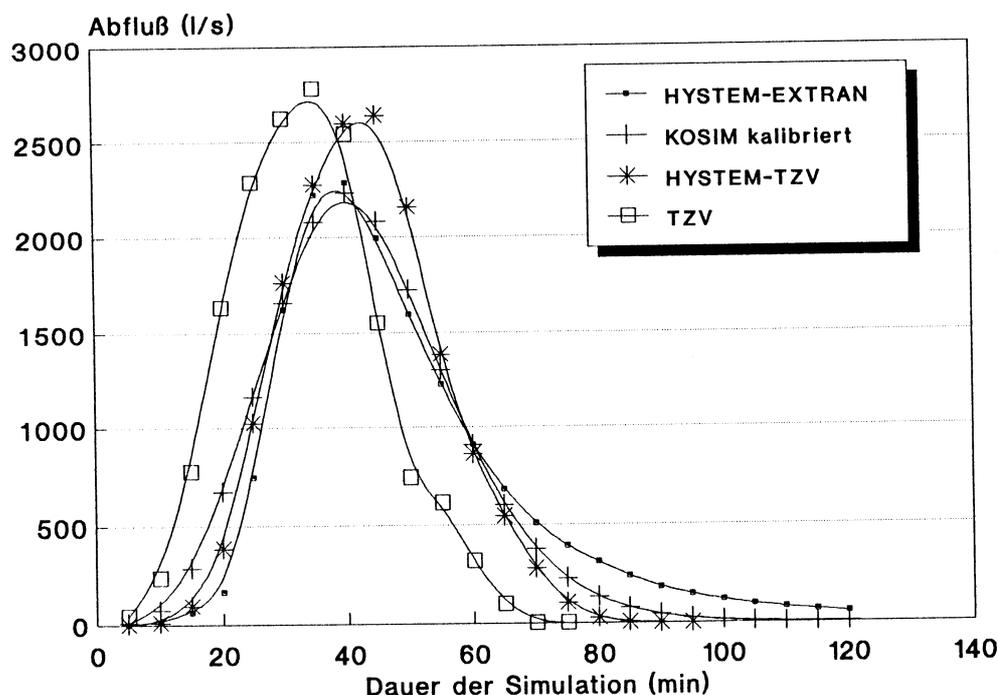
Tab. 14: Abweichungen zwischen HYSTEM-EXTRAN und dem TZV-Ansatz; FR01, Blockregen 1, Regenverluste nach Standardwerte

[1]: Abflußganglinien HYSTEM-EXTRAN

[2]: Abflußganglinien nach dem TZV-Ansatz

[3]: Abflußganglinien nach HYSTEM-TZV-Ansatz

In Abb. 7 sind alle drei berechneten Abflußganglinien und die Ganglinie nach KOSIM ( $n_1$ ,  $k_1$ ) graphisch gegenübergestellt. Die Verbesserung der Simulationsergebnisse durch Berücksichtigung der Oberflächenkonzentration wird hier deutlich.



Netz: UDM\_FR01 Blockregen1

Abb. 7: Gegenüberstellung der Abflußganglinien nach 4 Ansätzen

<sup>5</sup> Dies entspricht deshalb einem günstigen Fall, weil die Fließzeit im Kanal möglicherweise diejenige an der Gebietsoberfläche deutlich überschreitet (vgl. Anlage 2 und Tab. 14).

Trotz Verbesserung liegt die Deviation [1]-[3] immer noch deutlich höher, als in den Untersuchungen mit HYSTEM bzw. KOSIM. Der Spitzenabfluß in [3] ist 15 % höher und die Schwerpunktlaufzeit 13% geringer als in [1] (HYSTEM-EXTRAN Simulation). Diese Diskrepanzen haben folgende Gründe:

- der Speichereffekt in der Kanalisation wird nicht berücksichtigt (Normalabfluß).
- die Wellengeschwindigkeit wird wegen der Annahme eines Normalabflusses bei Vollenfüllung überschätzt .

In Tab. 15 sind die berechneten Schwerpunktlaufzeiten<sup>6</sup> für alle drei holistischen Modelle aufgeführt. Der Belastungsfall ist Blockregen 1.

|      | t <sub>L</sub> [1]<br>[min] | t <sub>L</sub> [2]<br>[min] | t <sub>L</sub> [3]<br>[min] | t <sub>L</sub> [4]<br>[min] | t <sub>L</sub> [5]<br>[min] |
|------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| AU01 | 21,45                       | 18,8                        | 20,52                       | 8                           | 12,2                        |
| CA01 |                             |                             |                             | 5                           | 9,2                         |
| CA02 | 21,85                       | 18,2                        | 21,3                        | 7                           | 12,3                        |
| CH01 | 11,49                       | 8,6                         | 12,54                       | 2                           | 5,3                         |
| DK01 | 13,35                       | 8,6                         | 13,68                       | 5                           | 9,5                         |
| FR01 | 31,17                       | 28,25                       | 28,15                       | 16                          | 20,3                        |
| GB01 | 11,08                       | 9,0                         | 12,16                       | 4                           | 7                           |
| GB02 | 19,81                       | 17,2                        | 19,5                        | 12                          | 14,7                        |
| HU01 | 16,93                       | 13,3                        | 16,9                        | 5                           | 8,5                         |
| IT01 | 6,44                        | 6,1                         | 8,37                        | 1                           | 4,1                         |
| NO01 | 11,37                       | 8,5                         | 12,72                       | 3                           | 7,1                         |
| SE01 | 11,43                       | 9,7                         | 12,53                       | 4                           | 7,5                         |
| SE02 | 14,04                       | 11,6                        | 14,88                       | 5                           | 8,5                         |
| US01 | 15,85                       | 10,9                        | 16,7                        | 2                           | 4,8                         |
| US02 | 21,82                       | 17,2                        | 20,46                       | 8                           | 11,7                        |
| US03 |                             |                             |                             | 10                          | 14,0                        |
| US04 | 16,07                       | 13,7                        | 16,4                        | 7                           | 10,9                        |
| US05 |                             | 11,2                        |                             | 1                           | 5,2                         |
| YU01 |                             |                             |                             | 2                           | 4,2                         |

Tab 15: Vergleich zwischen den Schwerpunktlaufzeiten für die untersuchten Ansätze; Blockregen 1

[1] : Detaillierte Simulation mit HYSTEM-EXTRAN

[2] : Kalibrierte Simulation mit HYSTEM

[3] : Kalibrierte Simulation mit KOSIM

[4] : Simulation mit der TZV-Funktion (ohne Oberflächenkonzentration)

[5] : Simulation mit der HYSTEM-TZV-Funktion (mit Oberflächenkonzentration)

<sup>6</sup> Die in HYSTEM bzw. in der TZV-Funktion angesetzten Schwerpunktlaufzeiten wurden jeweils aus den Daten in Tab. 2 ( $A_{\text{und}}$ ), Tab. 4 ( $L$ ,  $l_f$ ) und Tab. 11 ( $\alpha_U$ ) nach Gl. 6 errechnet. Die in KOSIM angesetzten Schwerpunktlaufzeiten errechnen sich aus Gleichung  $t_L = n \cdot k$ .

Die Schwerpunktlaufzeiten im kalibrierten HYSTEM  $t_L[2]$  sind gegenüber den tatsächlichen  $t_L[1]$  (HYSTEM-EXTRAN) systematisch unterschätzt. Eine statistische Auswertung der Daten ergibt folgende Regressionsformel:

$$(Gl. 7) \quad t_L[1] = 2,09 + 1,08 \cdot t_L[2] \text{ (min)}^7$$

Die Kalibrierung der linearen Speicherkaskade (n, k) ergibt eine bessere Anpassung der Laufzeitwerte. Zudem gibt es keine systematische Über- bzw. Unterschätzung dieser Werte. Dies hängt mit der Form der Übertragungsfunktion zusammen und ist ein zusätzlicher Beweis dafür, daß die Form der Standardeinheitsganglinie nicht so gut geeignet ist wie diejenige der Speicherkaskade, wenn Konzentration- und transportvorgänge in einem Schritt zusammengefaßt werden.

Bei dem Ansatz nach der Transportzeitverteilung (TZV) erfolgt wie erwartet eine erhebliche Unterschätzung der Schwerpunktlaufzeiten (bzw. Überschätzung des maximalen Abflusses). Dies geschieht auch, wenn die Oberflächenkonzentration

berücksichtigt wird. Im letzteren Fall beträgt der relative Fehler  $\frac{t_L[5] - t_L[1]}{t_L[1]}$  im

Durchschnitt - 41%. Die relativ geringe Streuung ( $\sigma = 10\%$ ) dieses Fehlers deutet auf eine Systematik hin.

## 9. ZUSAMMENFASSUNG

Sechs Ansätze wurden verwendet zur Simulation der Prozesse "Oberflächenkonzentration" und "Transport-im-Kanal". Verglichen wurden die jeweiligen Abflußganglinien am Systemauslaß der 19 gewählten UDC-Netze.

Die Ergebnisse des hydrologischen detaillierten Ansatzes HYSTEM-KMROUT liefern meistens eine sehr gute Approximation vom detaillierten hydrodynamischen Modell HYSTEM-EXTRAN. Deutliche Abweichungen können jedoch im einzelnen auftreten, insbesondere wenn sich die Sohlgefälle von zwei miteinander verknüpften Haltungen sehr unterscheiden. Diese Abweichungen können aber durch geeignete Änderung der Kanalbeschreibung weitgehend korrigiert werden.

Gegenüber der detaillierten hydrologischen Simulation verschlechtern sich die Ergebnisse der holistischen Modelle deutlich. Zwischen den Ansätzen KOSIM, HYSTEM und TZV-Funktion besteht eine klare Reihenfolge, wobei KOSIM die bessere Anpassung an HYSTEM-EXTRAN erreicht. Die entsprechenden Deviationen DEVS vom kalibrierten KOSIM liegen alle im Bereich "sehr gut". Die

---

<sup>7</sup> Der Korrelationskoeffizient  $r = 0.98$

Anpassung von HYSTEM liegt in den meisten Fällen im Bereich "gut", in wenigen Fällen im Bereich "sehr gut".

Eine logische Erklärung für die Diskrepanz ist, daß die Anpassung der linearen Speicherkaskade durch Kalibrierung der *zwei* Parametern  $n$  und  $k$  vorgenommen wird, während diejenige der Standardeinheitsganglinie durch Kalibrierung des *einen* Parameters  $t_L$  (bzw. durch Bestimmung des optimierten  $\alpha_u$ ) erfolgt.

Die berechneten Speicheranzahlen für KOSIM sind erstaunlich hoch, wenn man die relativ kleine Größe der UDC-Netze bedenkt. Die Berücksichtigung einer zusätzlich vorgeschalteten Totzeit im Modell würde diese Zahl möglicherweise unter dem Wert  $n = 3$  reduzieren. Somit wären die Ansätze KOSIM und HYSTEM praktisch gleichwertig.

Der TZV-Ansatz sollte nur mit einem vorgeschalteten Abflußkonzentrationbaustein eingesetzt werden. Dies gilt auch bei größeren Netzen, bei denen der Transport im Kanal die Oberflächenkonzentration überwiegt. Die zu hoch geschätzten Fließgeschwindigkeiten (ungefähr das 2,5-fache der von HYSTEM-EXTRAN berechneten mittleren Werte) und die Vernachlässigung des Speichereffekts in der Kanalisation<sup>8</sup> sind für die größeren Abweichungen (insbesondere für die deutliche Überschätzung der maximalen Abflüsse) verantwortlich.

## LITERATURVERZEICHNIS

- Deyda, Khelil, Siekmann, 1993, "Erweiterung des Kanalnetzrechnungsmodells KMROUT auf die Simulation von Fließvorgängen im Einstau- bzw. Überstau-Bereich", Zeitschrift für Stadtentwässerung und Gewässerschutz, 22/1993
- EPA, 1971, " Storm Water Management Model", Final Report.
- Fuchs L., Verworn H.R., 1992, "Mikrocomputer in der Stadtentwässerung, Kanalnetzrechnung, Modellbeschreibung, HYSTEM-EXTRAN Version IV.3", ITWH, Hannover.
- Grotehusmann D., Semke M., 1990, "KMROUT, ein hydrologisches detailliertes Kanalnetzrechnungsmodell", Zeitschrift für Stadtentwässerung und Gewässerschutz, Hrsg. F. Sieker, Hannover.
- Grotehusmann D., 1991, "Erarbeitung und Entwicklung eines kombinierten hydrologisch hydrodynamischen Modells zur Langzeitsimulation des Abflußprozesses in städtischen Kanalnetzen unter qualitativen und quantitativen Aspekten", Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben I/62 917 der Stiftung Volkswagenwerk.

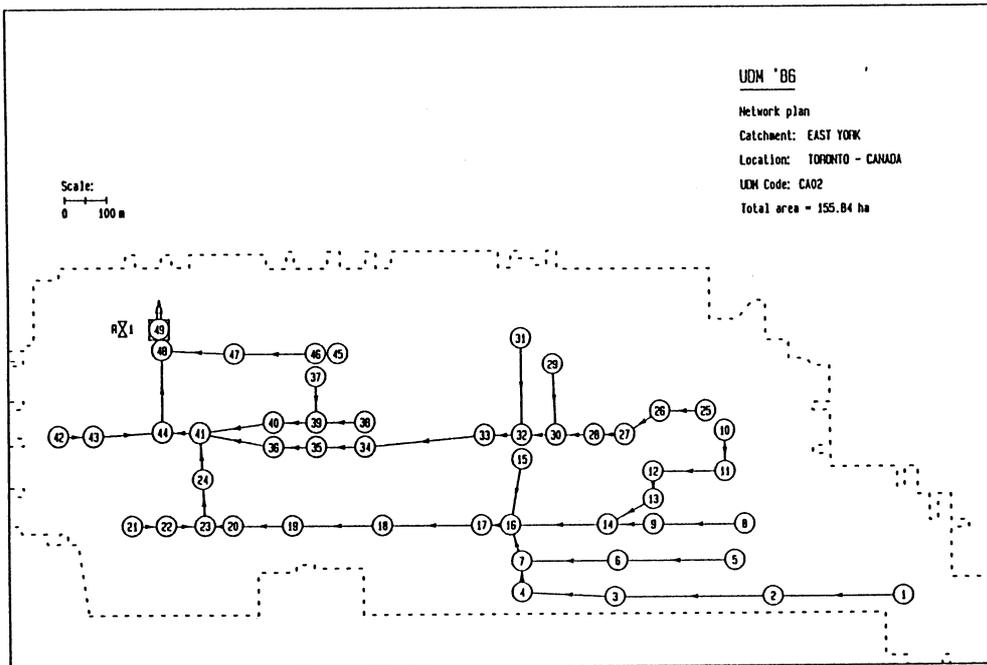
---

<sup>8</sup>Das Zeitbeiwertverfahren setzt ähnliche Fließbedingungen wie der TZV-Ansatz voraus. Dementsprechend sind die Bemessungsabflüsse überschätzt bzw. die tatsächliche Versagenshäufigkeit der Kanalisation ist deutlich geringer als die Häufigkeit der Regenspende.

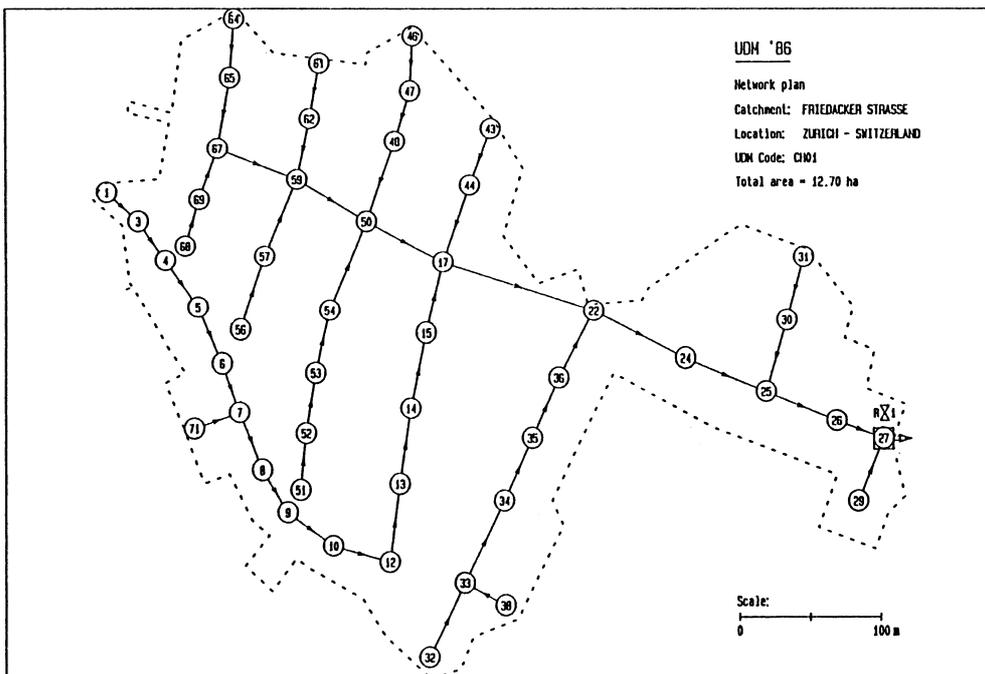
- Harms, Verworn, 1984, "HYSTEM -ein hydrologisches Stadtentwässerungsmodell, Teil I:Modellbeschreibung", Korrespondenz Abwasser, Heft 2/84.
- Khelil A., Semke M., 1991, "Quantifizierung der Unsicherheit bei der Abflußberechnung in städtischen Entwässerungssystemen", DFG Forschungsbericht SI 242/7-2.
- Maksimovic, C., Radojkovic, M., 1986, "Urban Drainage Catchment", Pergamon Press, London.
- Paulsen O.; "KOSIM, Kontinuierliche Simulation von Abflüssen und Stofffrachten in der Trennentwässerung", Mitteilung Heft 62, Institut für Wasserwirtschaft der Uni. Hannover, ISBN 0343-8090, 1987.
- Rahlf, Holger, 1989, "Kanalnetzvereinfachung", DA Institut für Wasserwirtschaft der Universität Hannover, unveröffentlicht.
- Sieker F., "Grundlagen hydrologischer Berechnungen : Abflußkonzentration Teil 1 und Teil 2", Sammelwerk Hydrologie der Stadtentwässerung; SUG Verlag.
- Verworn, W., 1980, "Hydrodynamische Kanalnetzberechnung und die Auswirkungen von Vereinfachungen der Berechnungsgleichungen", Mitteilung des Institut für Wasserwirtschaft, Universität Hannover, Heft 47.
- Zior, F., 1987, "Regenwasserabfluß auf Fahrbahnflächen -experimentelle und theoretische Untersuchungen-", Technische Berichte über Ingenieurhydrologie und Hydraulik, Institut für Wasserbau der TH Darmstadt, Heft 38.
- Zinn, H.; 1990, "Entwicklung eines Expertensystems zur Kalibrierung eines Niederschlag-Abfluß-Modells", DA Institut für Wasserwirtschaft Uni. Hannover, unveröffentlicht.

**ANLAGE 1**  
**DARSTELLUNG DER UDC-NETZE**

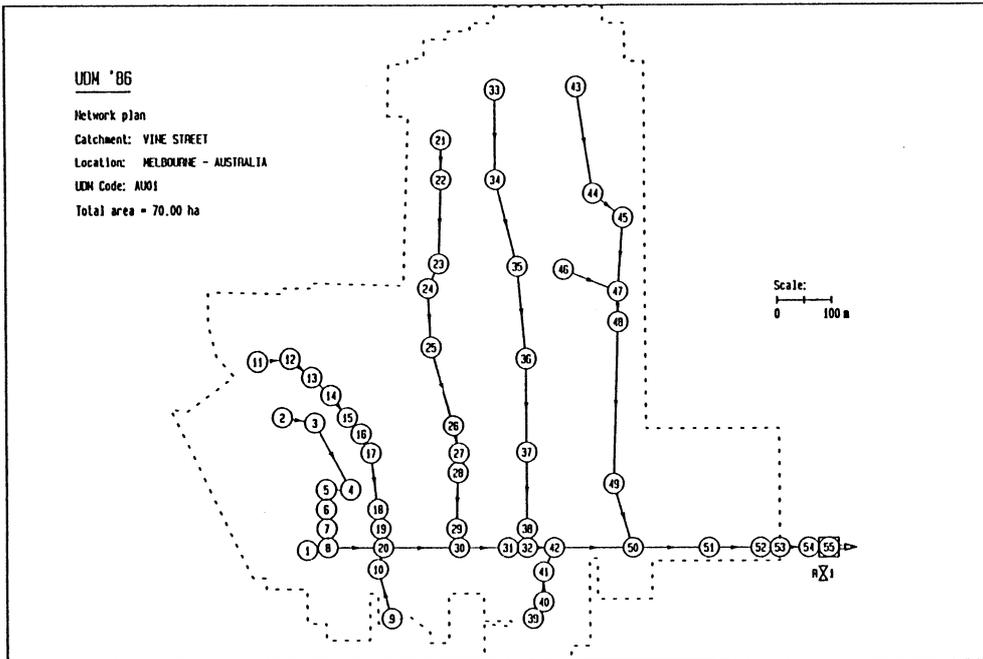
Kanalnetz: CA02



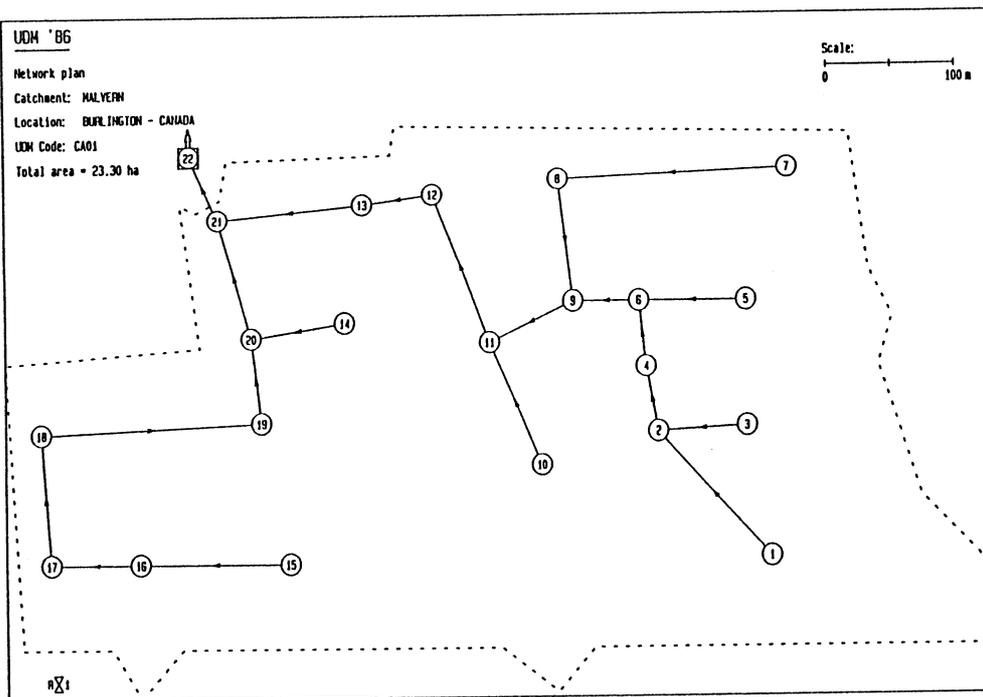
Kanalnetz: CH01  
Kanalnetz: CH011

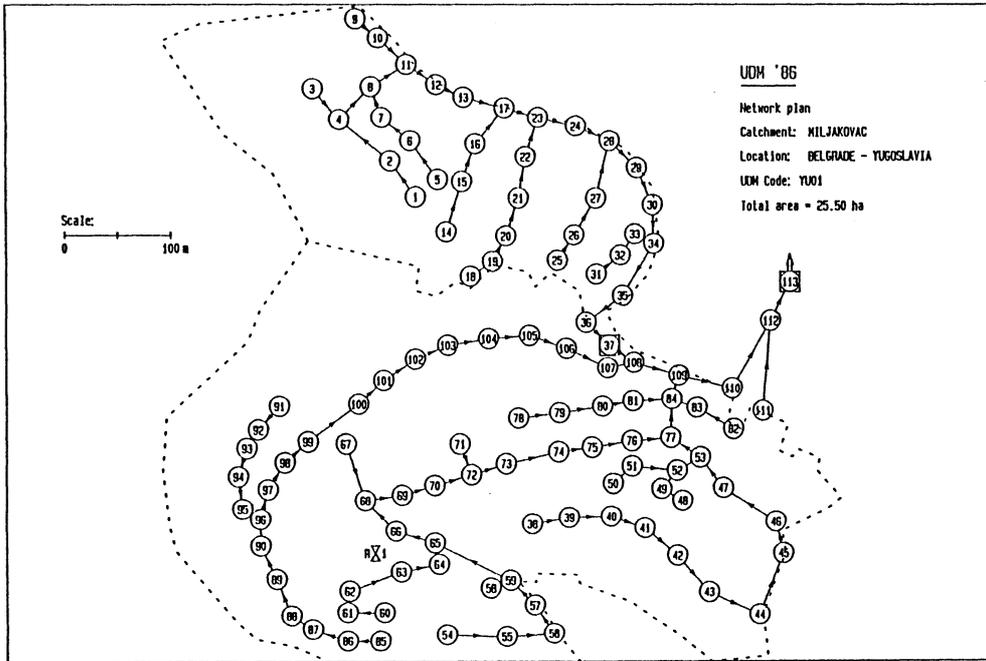


Kanalnetz: AV01

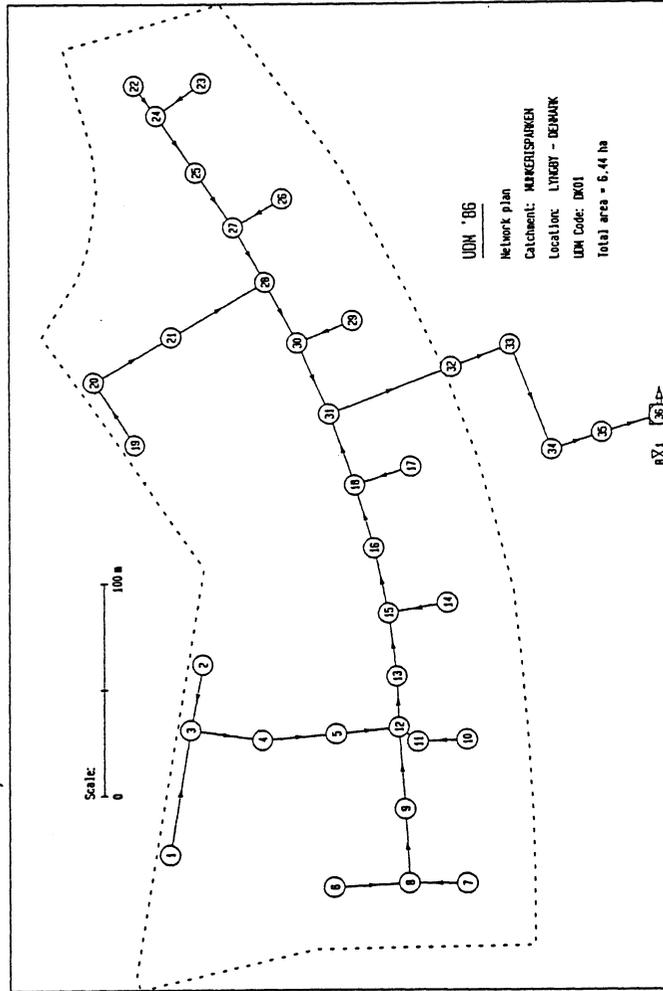


Kanalnetz: CA01

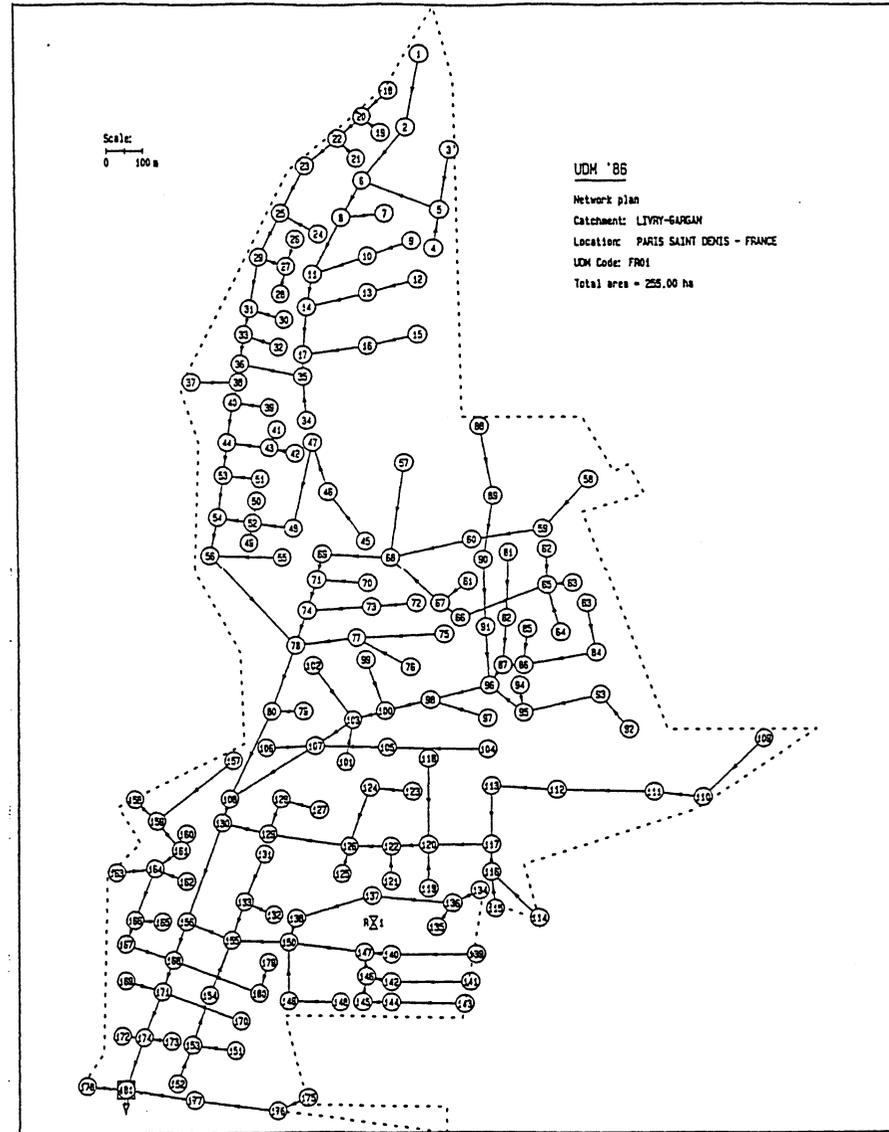




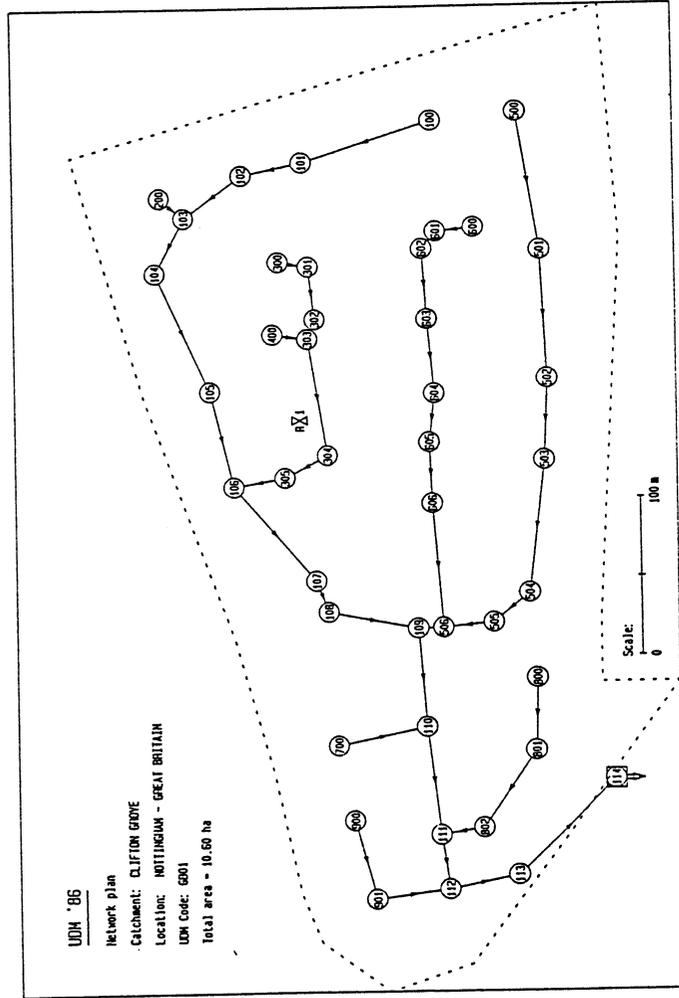
Kanalnetz: DK01



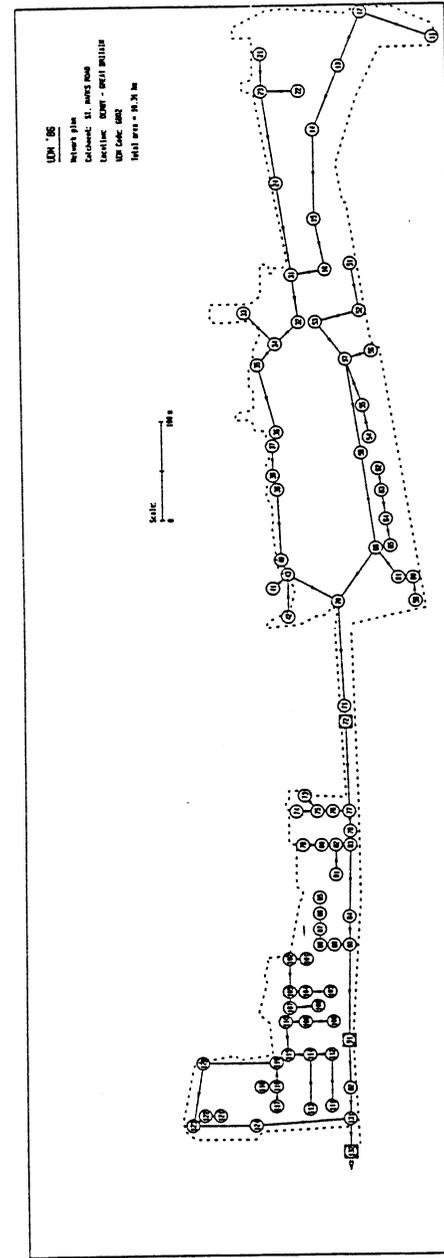
Kanalnetz: FR01



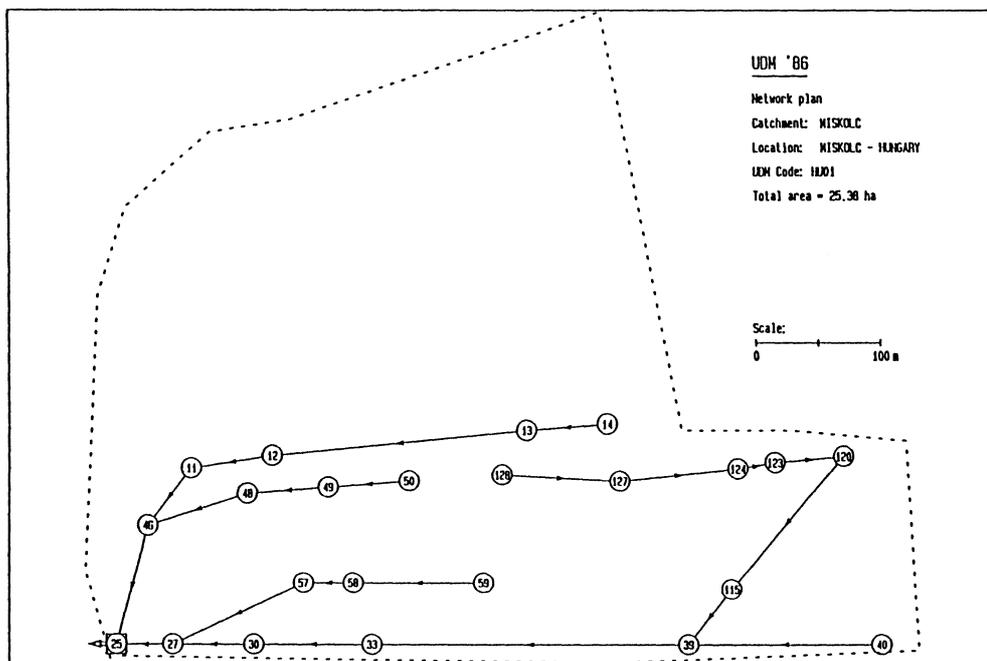
Kanalnetz: GB01



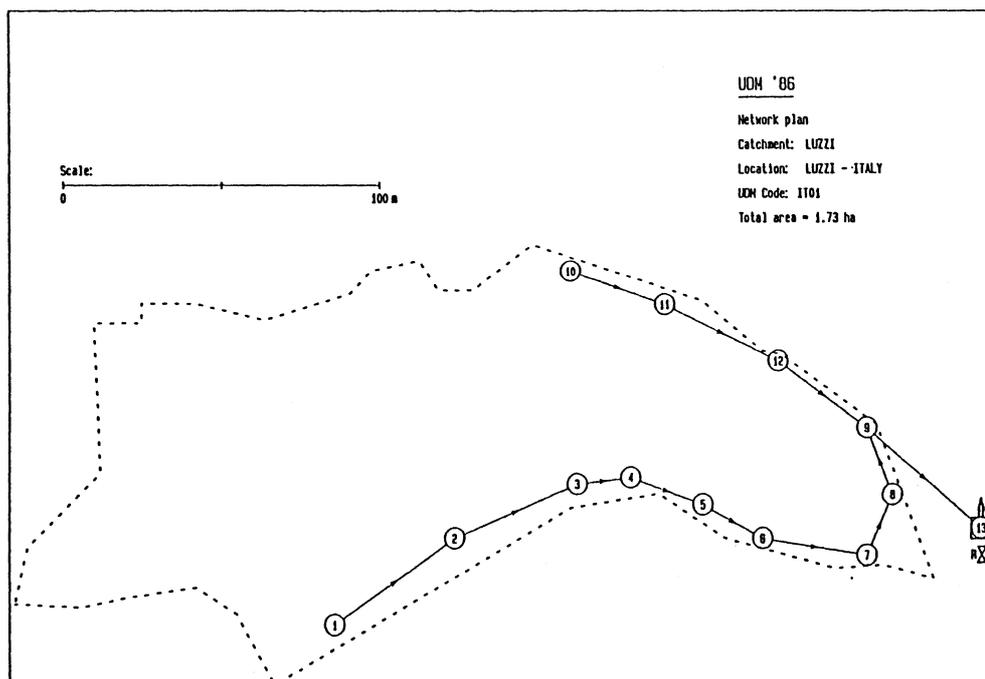
Kanalnetz: GB02



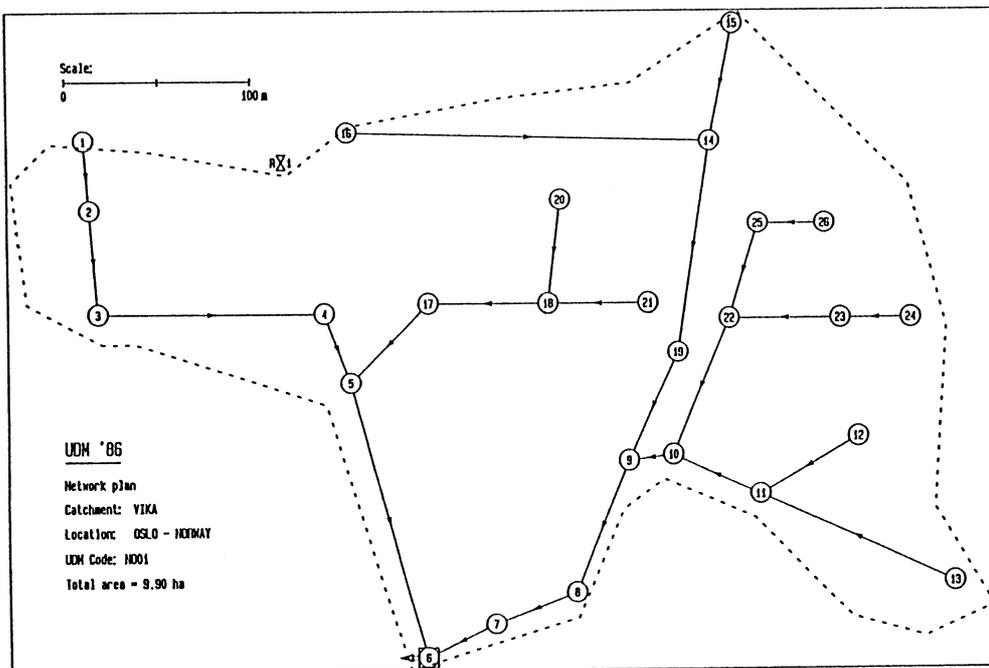
Kanalnetz: HU01



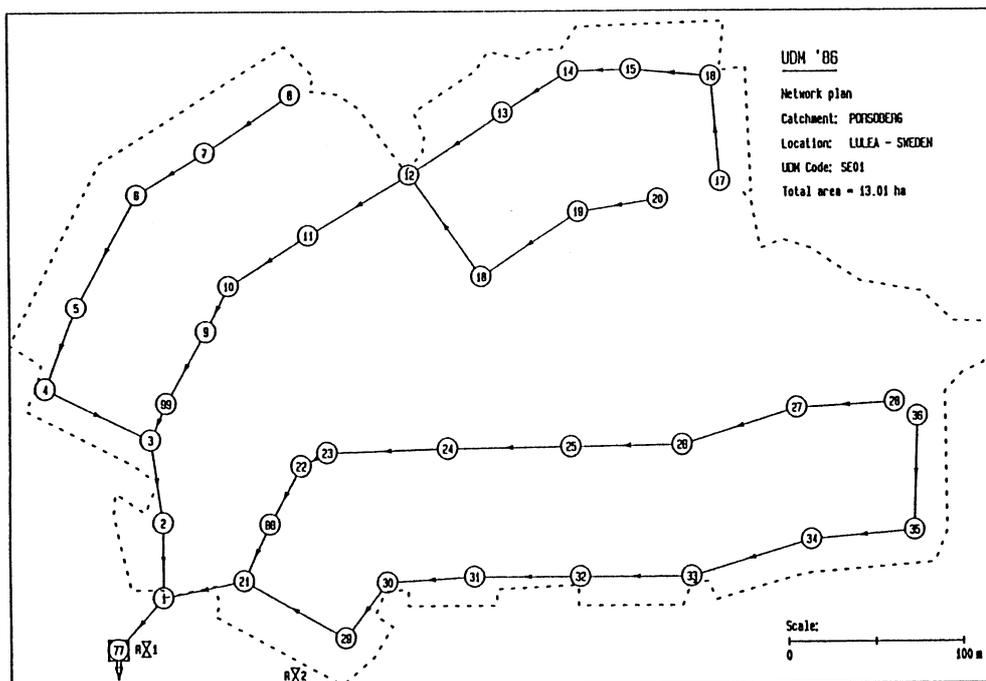
Kanalnetz: IT01



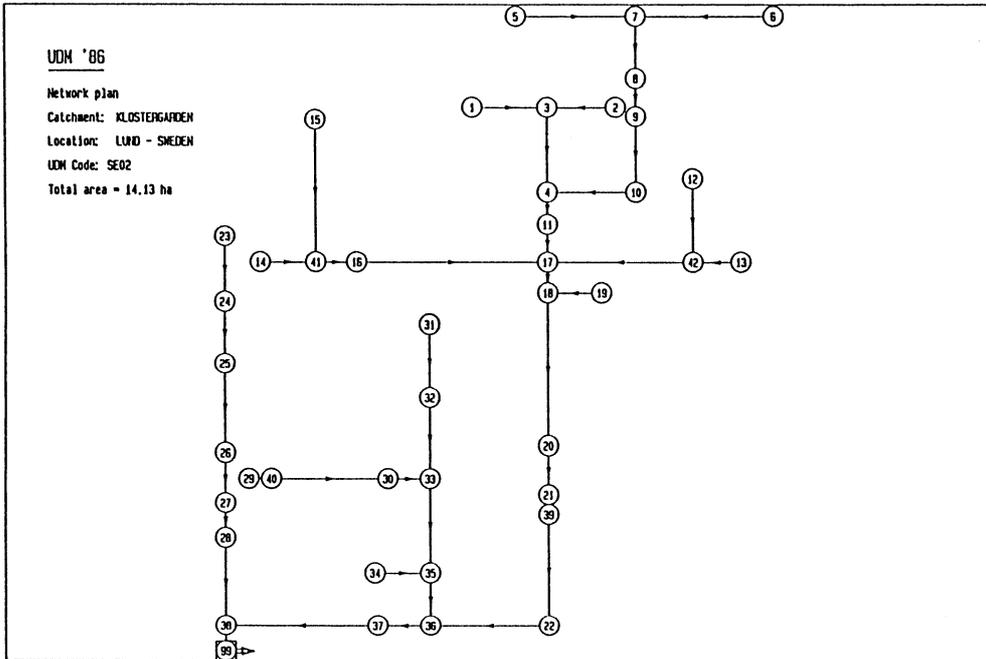
Kanalnetz: N001



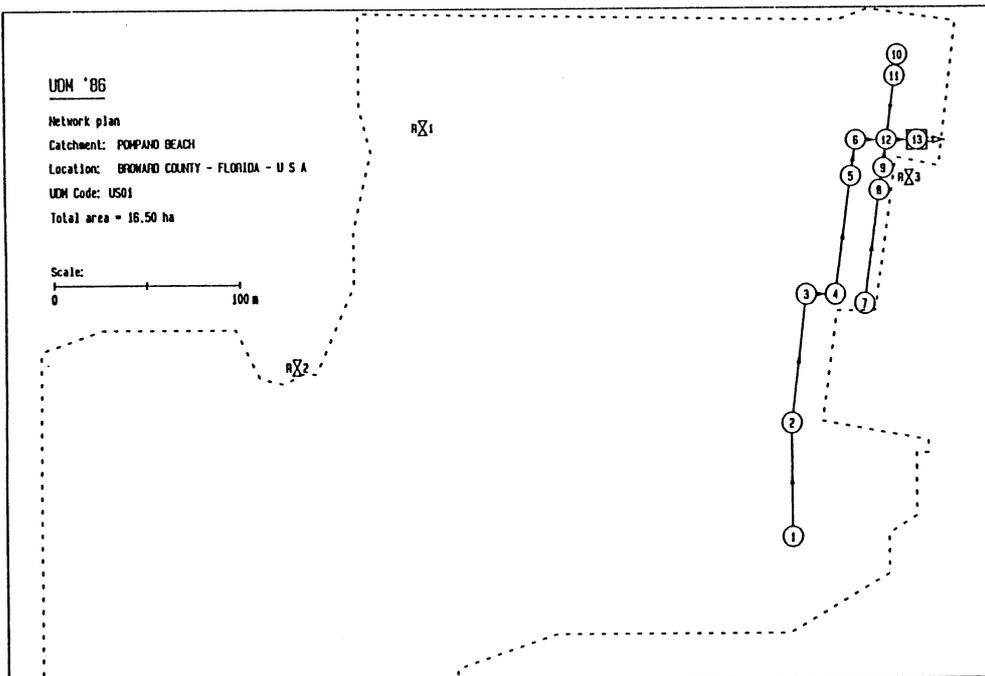
Kanalnetz: SE01



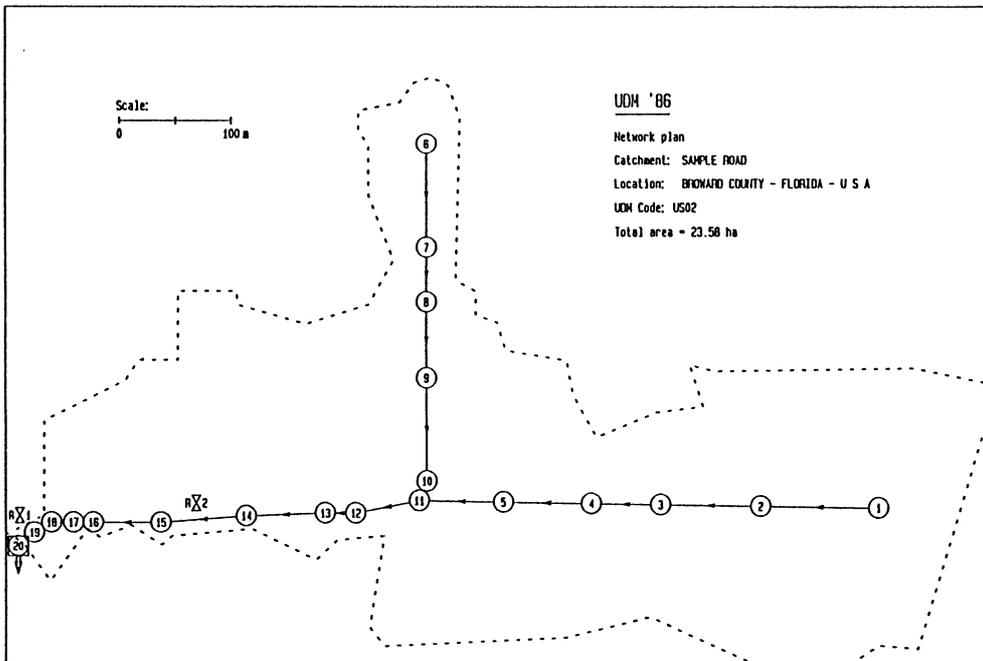
Kanalnetz: SE02



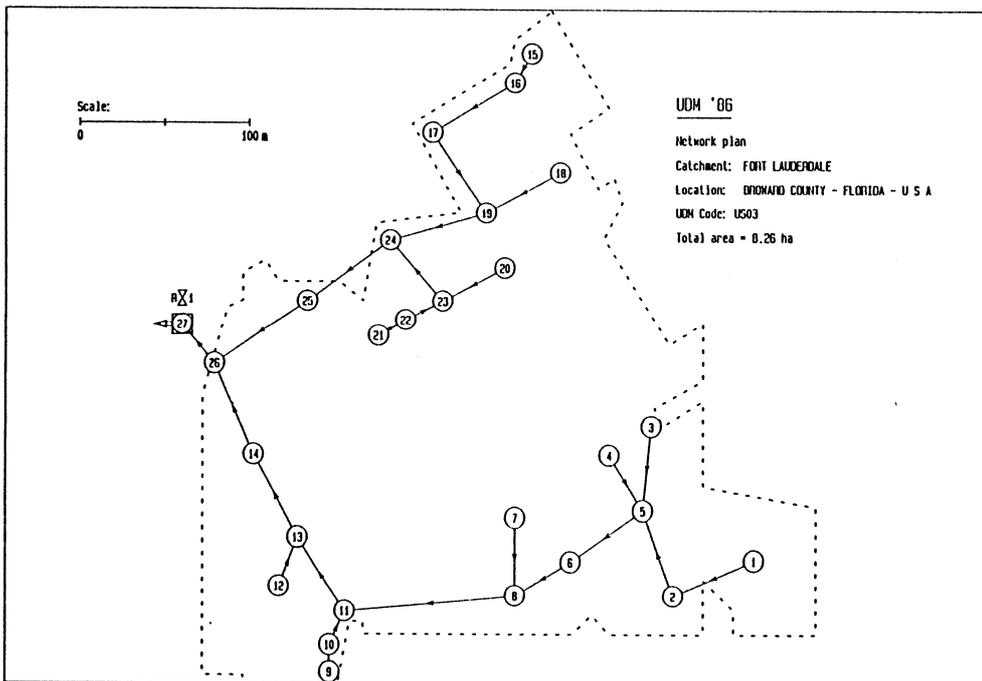
Kanalnetz: US01



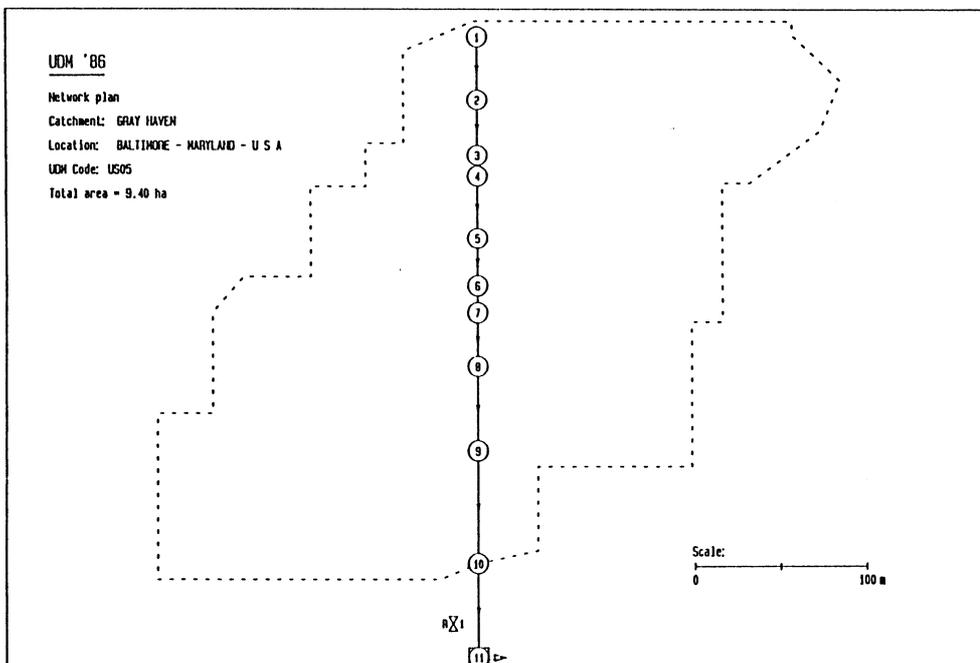
Kanalnetz: US02



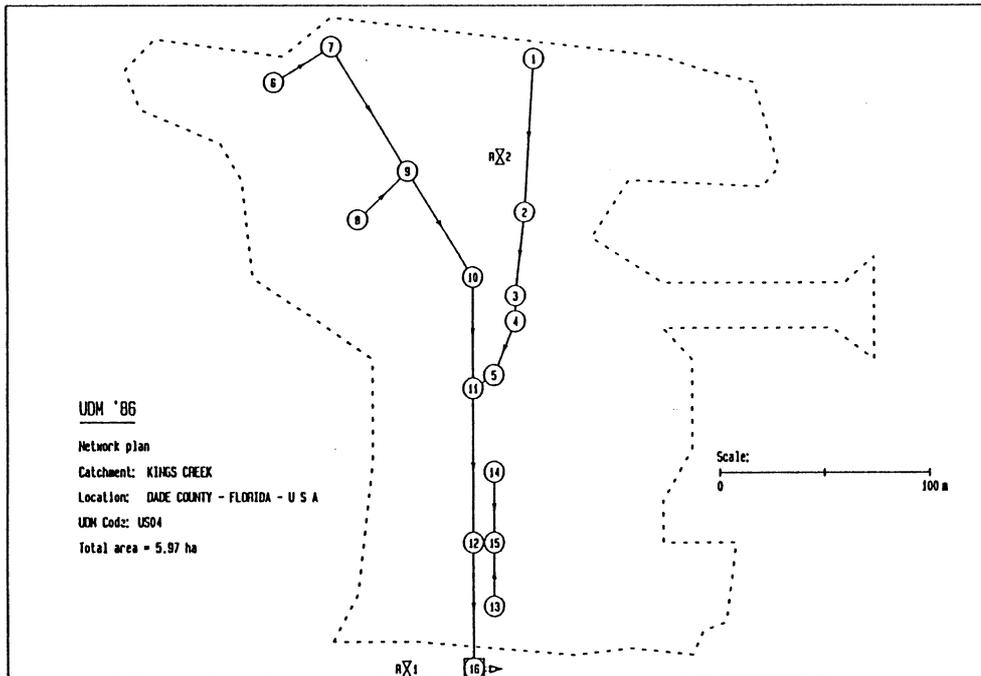
Kanalnetz: US03



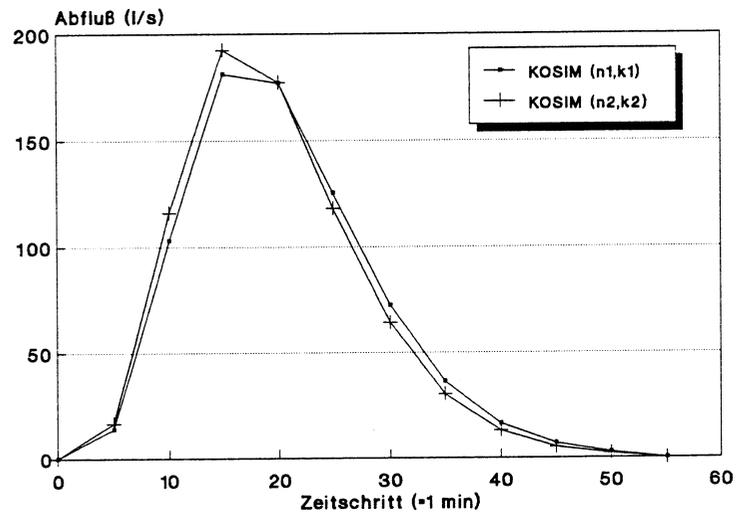
Kanalnetz: US05



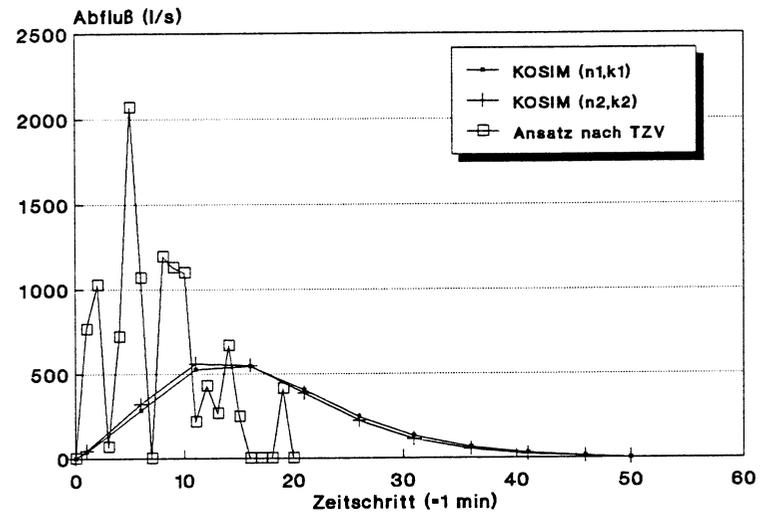
Kanalnetz: US04



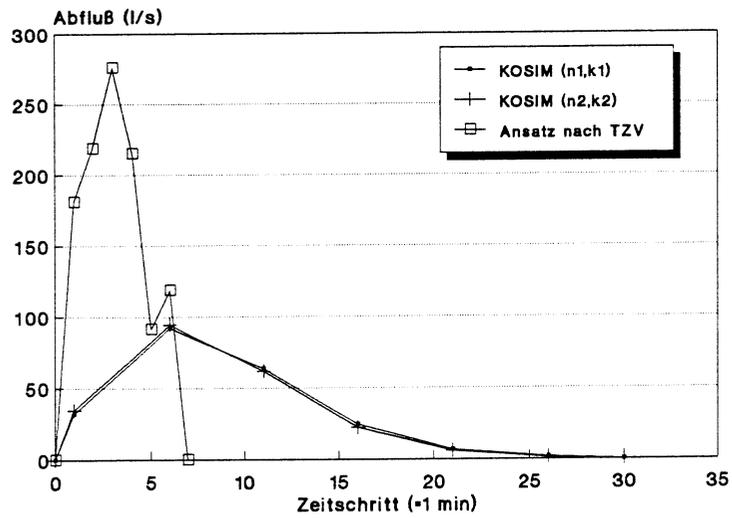
**ANLAGE 2**  
**VERGLEICH DER ÜBERTRAGUNGSFUNKTIONEN**  
**NACH KOSIM UND DEM TZV-ANSATZ**



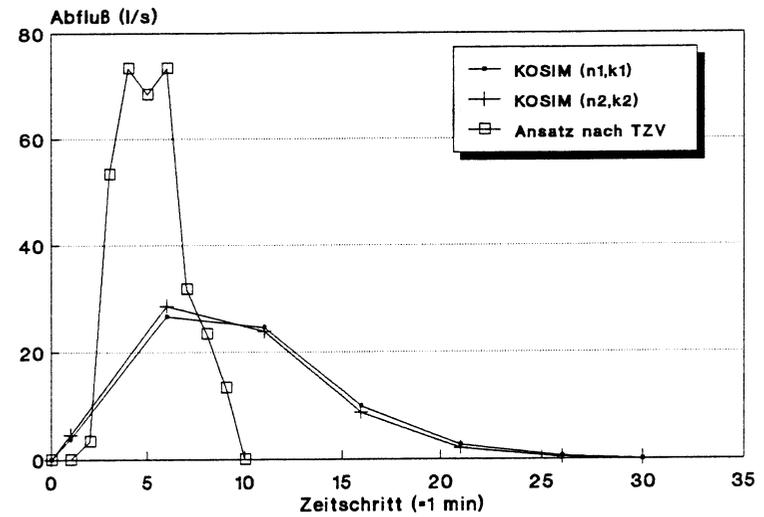
Kanalnetz AU01



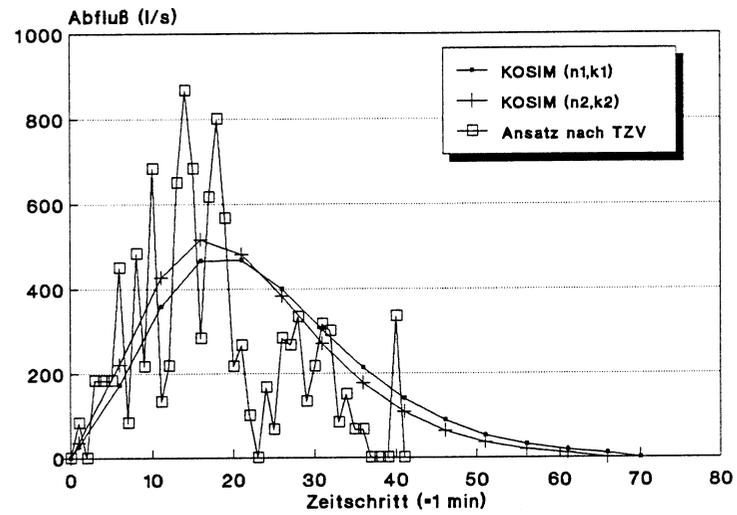
Kanalnetz CA02



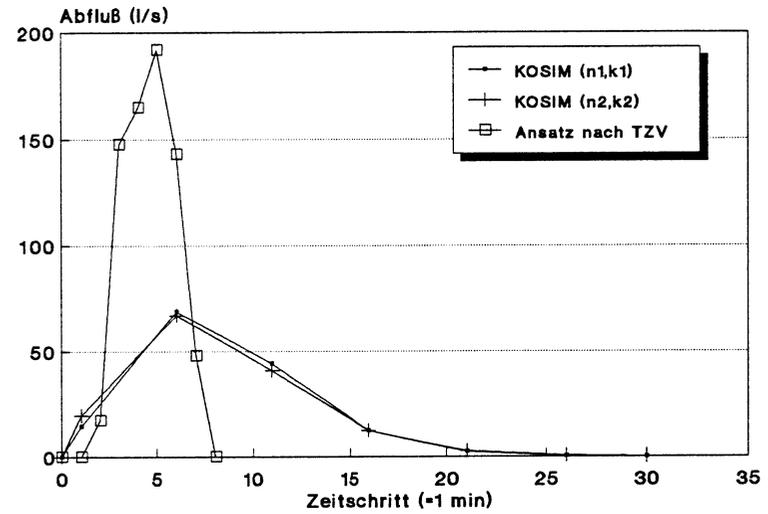
Kanalnetz CH01



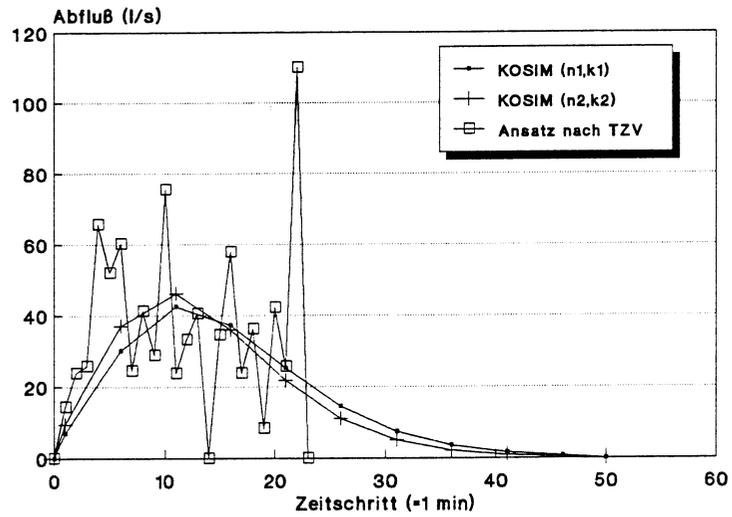
Kanalnetz DK01



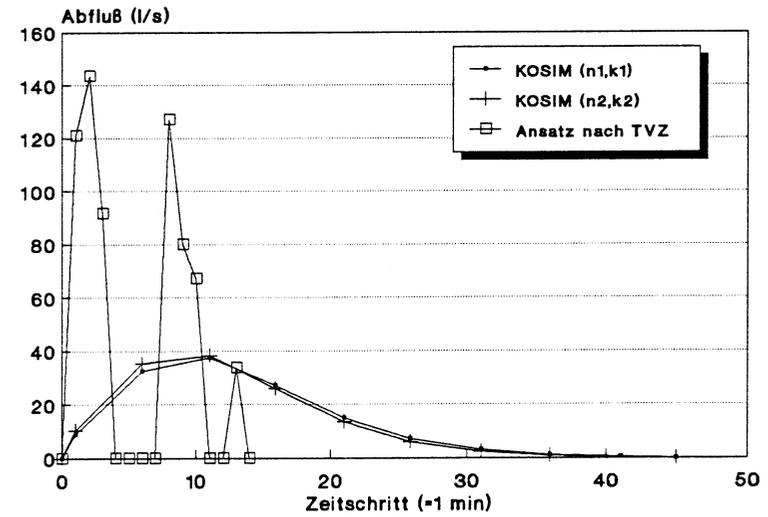
Kanalnetz FR01



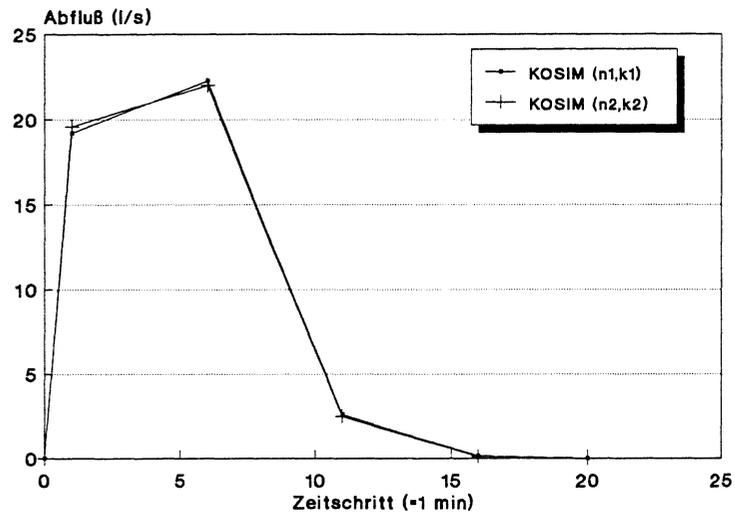
Kanalnetz GB01



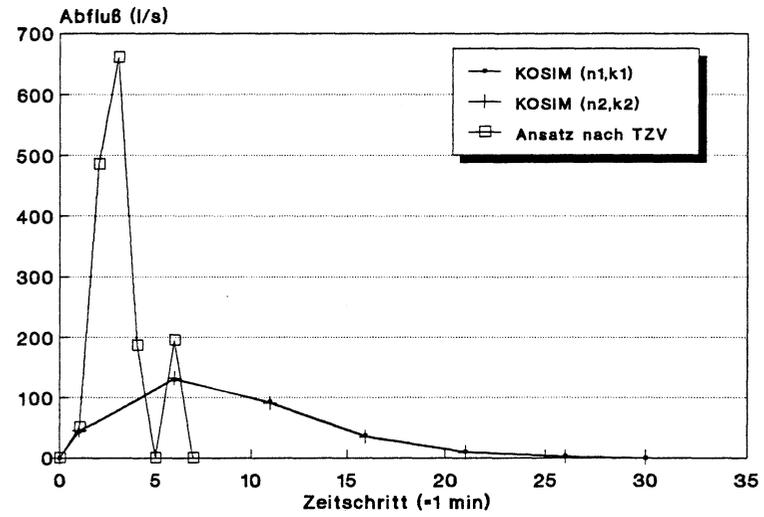
Kanalnetz GB02



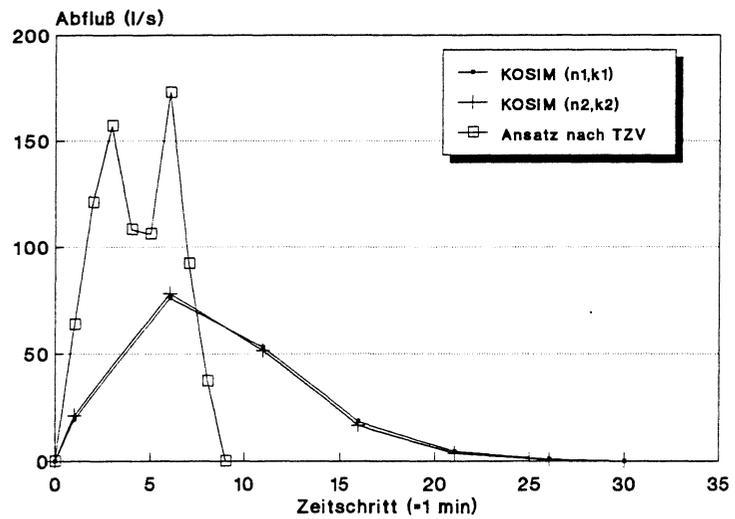
Kanalnetz HU01



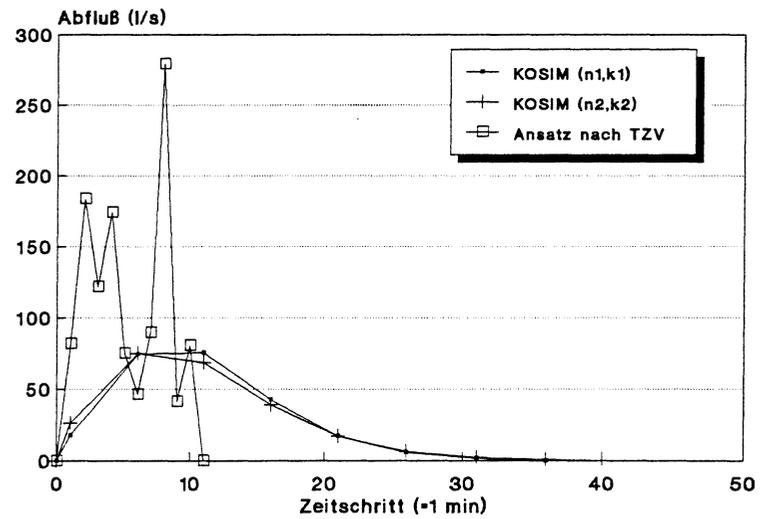
Kanalnetz ITO1



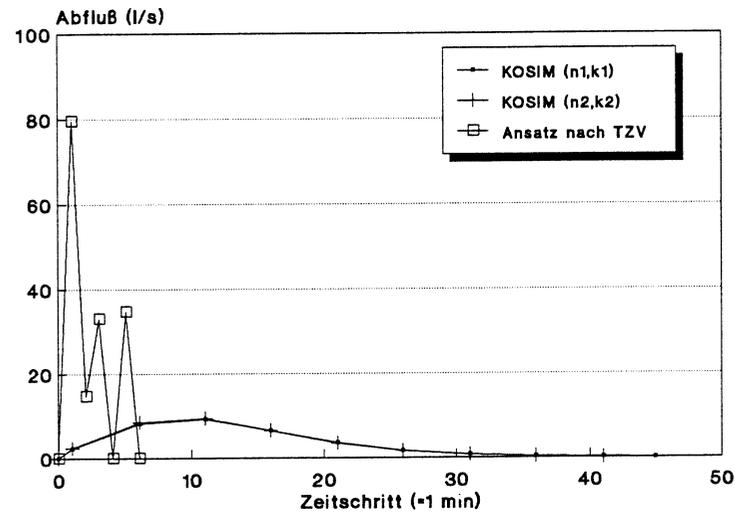
Kanalnetz NO01



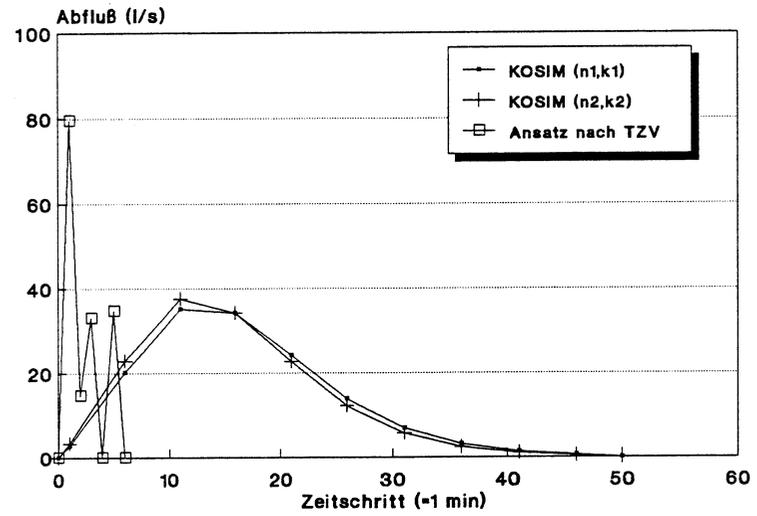
Kanalnetz SE01



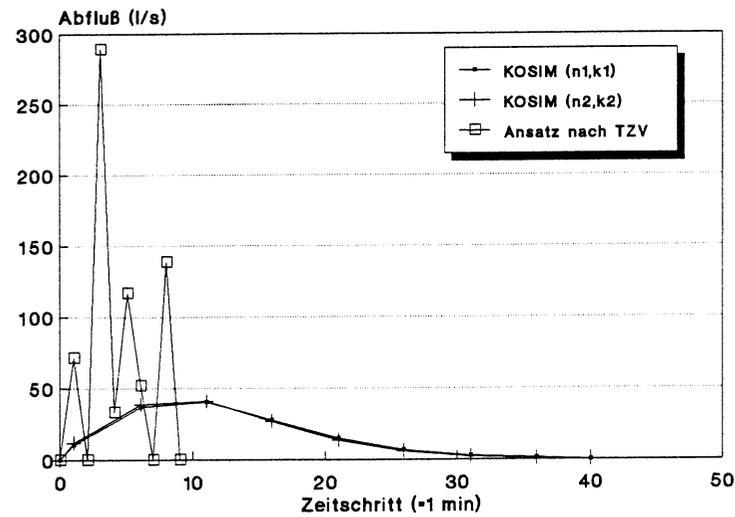
Kanalnetz SE02



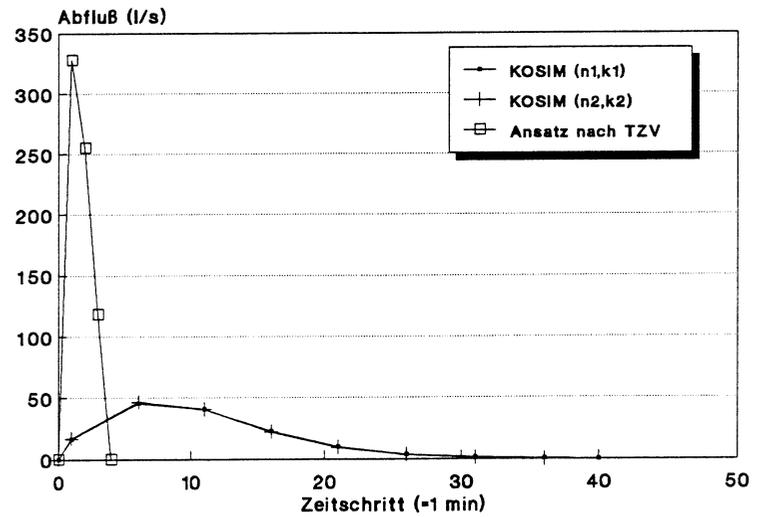
Kanalnetz US01



Kanalnetz US02



Kanalnetz US04



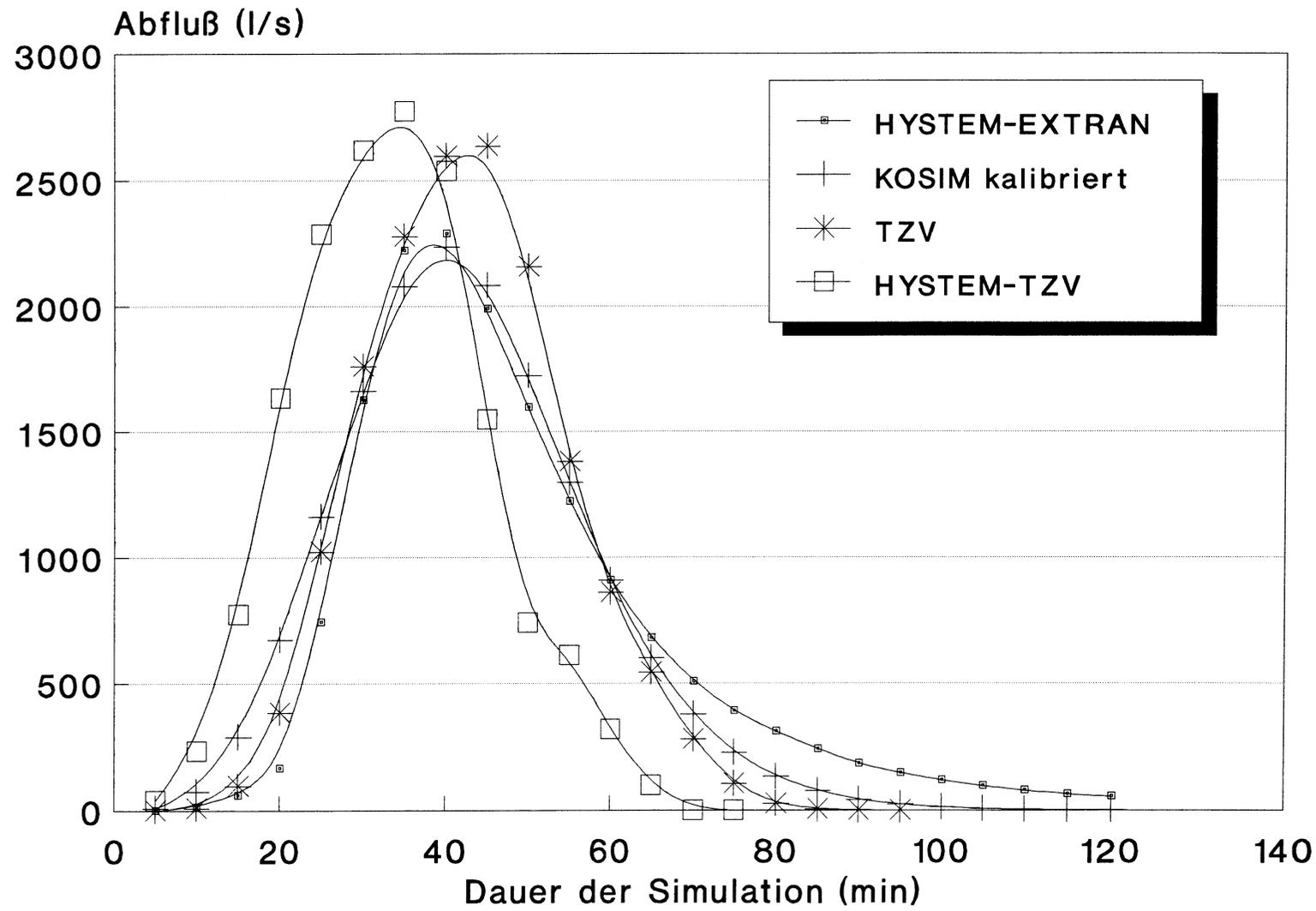
Kanalnetz US05

Tab. 3: weitere Kenndaten der UDC-Netze (Mittelwerte über alle Haltungen)

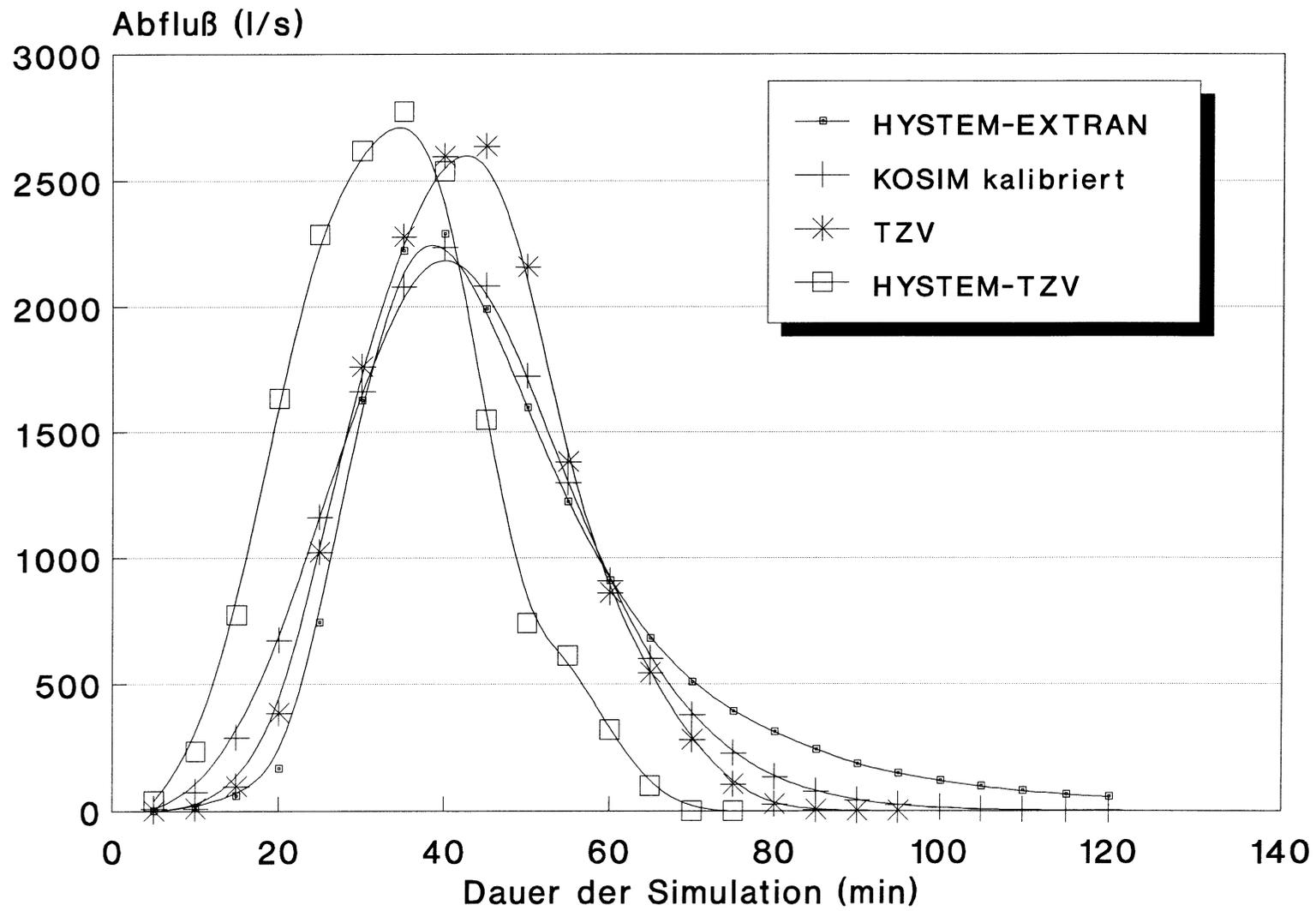
| Netze<br>[-] | A <sub>ges</sub><br>[ha] | A <sub>und</sub><br>[ha] | A <sub>ges</sub> /A <sub>und</sub><br>[-] | D<br>[m] | I<br>[%] | Länge<br>[m] | Vol<br>[m <sup>3</sup> ] | L/A <sub>und</sub><br>[m/ha] | V/A <sub>und</sub><br>[m <sup>3</sup> /ha] |
|--------------|--------------------------|--------------------------|---|----------|----------|--------------|--------------------------|------------------------------|--|
| AU01         | 1,30                     | 0,41                     | 3,40                                      | 0,67     | 0,5      | 89,1         | 39,3                     | 342                          | 134,0                                      |
| CA01         | 1,11                     | 0,38                     | 2,00                                      | 0,54     | 1,0      | 88,6         | 21,5                     | 136                          | 31,6                                       |
| CA02         | 3,25                     | 1,41                     | 1,41                                      | 0,84     | 0,7      | 142,6        | 88,9                     | 53                           | 31,2                                       |
| CH01         | 0,26                     | 0,14                     | 1,92                                      | 0,38     | 2,5      | 47,2         | 6,7                      | 602                          | 78,1                                       |
| DK01         | 0,18                     | 0,58                     | 3,25                                      | 0,31     | 1,2      | 32,7         | 3,3                      | 531                          | 38,9                                       |
| FR01         | 1,40                     | 0,45                     | 3,12                                      | 0,53     | 1,4      | 142,4        | 47,6                     | 502                          | 119,9                                      |
| GB01         | 0,25                     | 0,10                     | 2,21                                      | 0,26     | 3,2      | 47,5         | 2,8                      | 419                          | 23,6                                       |
| GB02         | 0,19                     | 0,07                     | 1,67                                      | 0,23     | 1,8      | 37,6         | 2,5                      | 765                          | 37,4                                       |
| HU01         | 1,10                     | 0,17                     | 4,36                                      | 0,58     | 2,9      | 99,5         | 34,6                     | 482                          | 104,0                                      |
| IT01         | 0,12                     | 0,11                     | 1,16                                      | 0,28     | 17,6     | 33,8         | 2,2                      | 608                          | 42,4                                       |
| NO01         | 0,38                     | 0,36                     | 0,67                                      | 0,44     | 2,6      | 71,4         | 14,4                     | 141                          | 26,2                                       |
| SE02         | 0,34                     | 0,17                     | 3,16                                      | 0,31     | 0,8      | 49,3         | 3,8                      | 418                          | 31,4                                       |
| US01         | 1,37                     | 0,08                     | 14,60                                     | 0,76     | 0,2      | 34,2         | 15,9                     | 1808                         | 586,6                                      |
| US02         | 1,21                     | 0,22                     | 4,42                                      | 0,85     | 0,2      | 65,7         | 35,3                     | 391                          | 227,2                                      |
| US03         | 0,32                     | 0,31                     | 0,98                                      | 0,43     | 0,2      | 47,2         | 8,1                      | 282                          | 37,5                                       |
| US04         | 0,40                     | 0,28                     | 1,21                                      | 0,72     | 0,8      | 46,8         | 22,7                     | 126                          | 64,3                                       |
| US05         | 0,94                     | 0,42                     | 2,52                                      | 0,92     | 0,8      | 37,9         | 28,6                     | 121                          | 74,0                                       |
| YU01         | 0,23                     | 0,04                     | 7,56                                      | 0,34     | 5,6      | 36,8         | 3,6                      | 2181                         | 198,4                                      |

**Tab. 2:** Kenndaten der UDC-Netze (Absolute Werte).

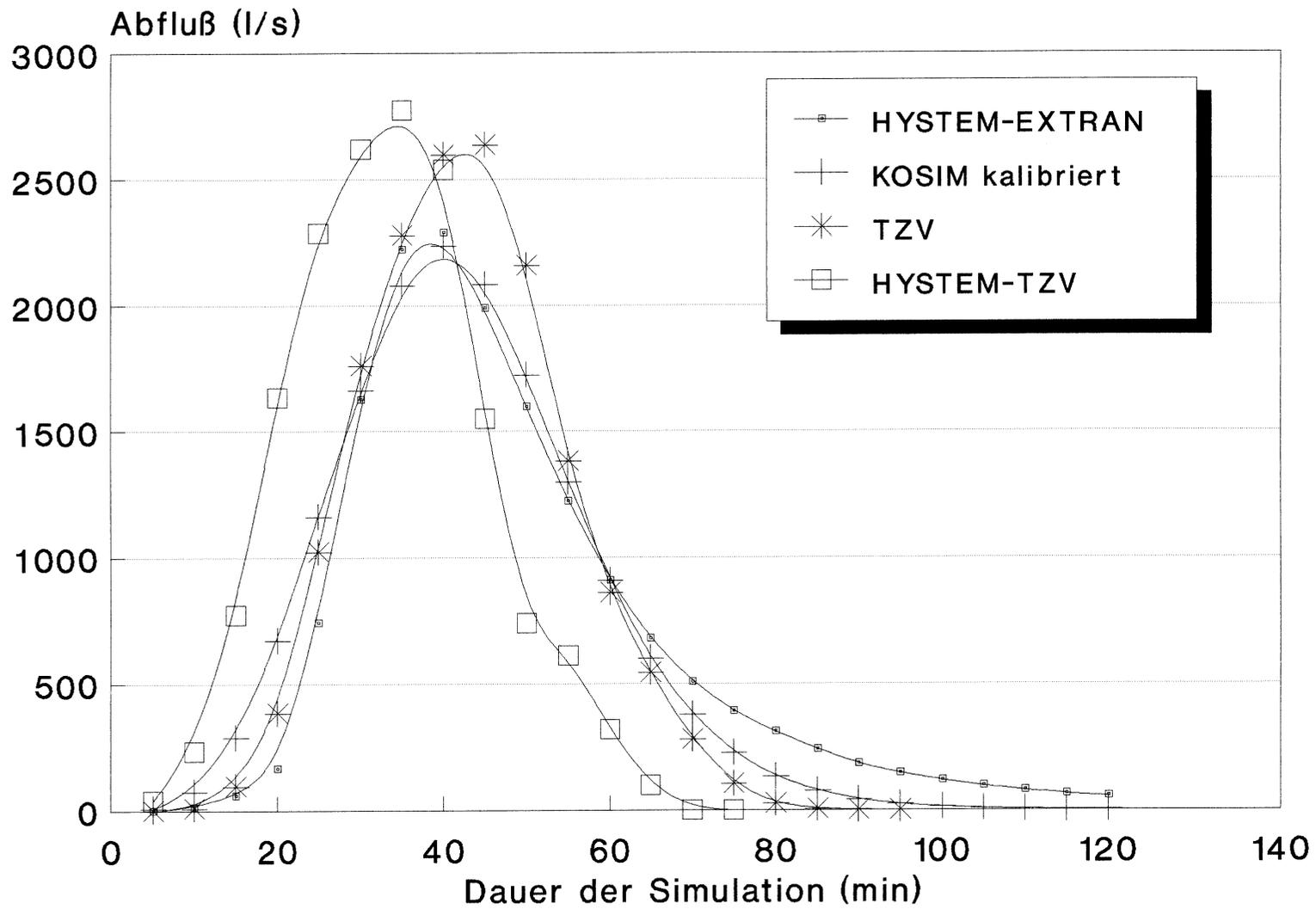
| Netz | Anzahl<br>Haltungen<br>[-] | Gesamt-<br>Länge<br>[m] | mittl.<br>Länge<br>[m] | Gesamt-<br>Volumen<br>[m <sup>3</sup> ] | Ages<br>[ha] | Aund<br>[ha] | Aund/Ages<br>[%] | mittl.<br>D<br>[m] | mittl.<br>I<br>[%] |
|------|----------------------------|-------------------------|------------------------|---|--------------|--------------|------------------|--------------------|--------------------|
| AU01 | 54                         | 4800                    | 88,9                   | 2121                                    | 70,0         | 22,0         | 31,4             | 0,64               | 0,45               |
| CA01 | 21                         | 1860                    | 88,6                   | 452                                     | 23,3         | 7,9          | 34,0             | 0,54               | 0,87               |
| CA02 | 48                         | 6845                    | 142,6                  | 4268                                    | 155,8        | 68,1         | 43,7             | 0,81               | 0,68               |
| CH01 | 48                         | 2265                    | 47,2                   | 323                                     | 12,5         | 6,6          | 52,8             | 0,39               | 2,45               |
| DK01 | 35                         | 1150                    | 32,9                   | 114                                     | 6,4          | 2,0          | 31,9             | 0,32               | 1,09               |
| FR01 | 181                        | 25759                   | 142,3                  | 8616                                    | 253,5        | 82,4         | 35,0             | 0,53               | 1,43               |
| GB01 | 42                         | 1997                    | 47,5                   | 116                                     | 10,6         | 4,3          | 40,3             | 0,26               | 3,32               |
| GB02 | 87                         | 3270                    | 37,6                   | 218                                     | 10,3         | 5,1          | 49,2             | 0,26               | 1,09               |
| HU01 | 22                         | 2188                    | 99,5                   | 796                                     | 25,2         | 4,0          | 15,8             | 0,56               | 2,21               |
| IT01 | 12                         | 405                     | 33,8                   | 26                                      | 1,5          | 1,3          | 91,7             | 0,28               | 15,83              |
| NO01 | 25                         | 1756                    | 70,2                   | 375                                     | 9,8          | 9,5          | 96,5             | 0,43               | 2,36               |
| SE01 | 38                         | 2016                    | 53,1                   | 154                                     | 13,3         | 5,2          | 38,7             | 0,30               | 1,48               |
| SE02 | 42                         | 2071                    | 49,3                   | 160                                     | 14,1         | 7,0          | 49,8             | 0,30               | 0,88               |
| US01 | 12                         | 410                     | 34,2                   | 191                                     | 16,5         | 1,0          | 5,9              | 0,76               | 0,20               |
| US02 | 19                         | 1248                    | 65,7                   | 670                                     | 23,0         | 4,3          | 18,5             | 0,79               | 0,22               |
| US03 | 26                         | 1228                    | 47,2                   | 211                                     | 8,3          | 8,1          | 97,6             | 0,45               | 0,23               |
| US04 | 15                         | 702                     | 46,8                   | 340                                     | 6,0          | 4,2          | 70,0             | 0,76               | 0,37               |
| US05 | 10                         | 379                     | 37,9                   | 285                                     | 9,4          | 4,2          | 44,7             | 0,95               | 0,91               |
| YU01 | 112                        | 4121                    | 36,8                   | 404                                     | 25,5         | 4,9          | 19,1             | 0,34               | 5,22               |



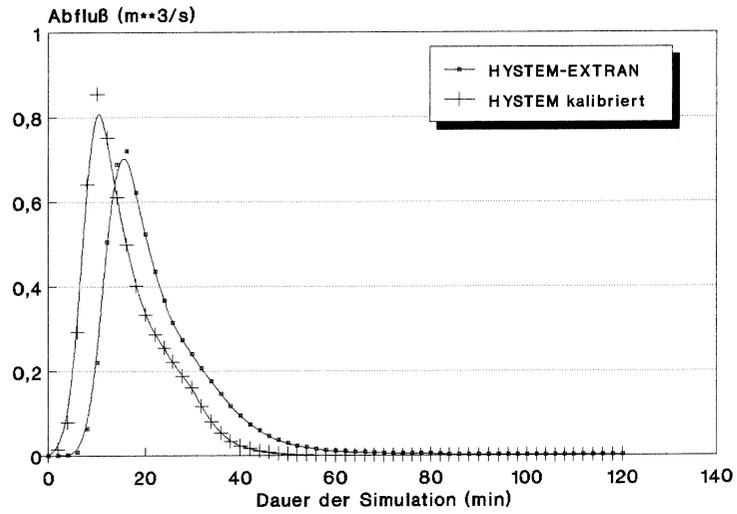
Netz: UDM\_FR01 Blockregen1



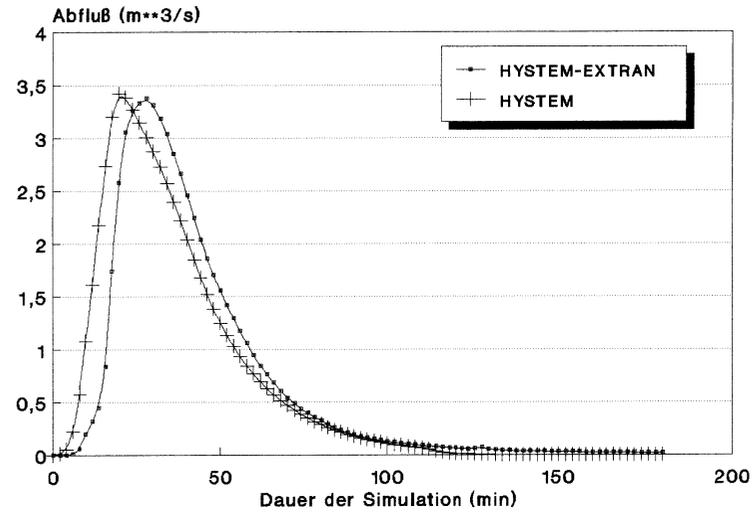
Netz: UDM\_FR01 Blockregen1



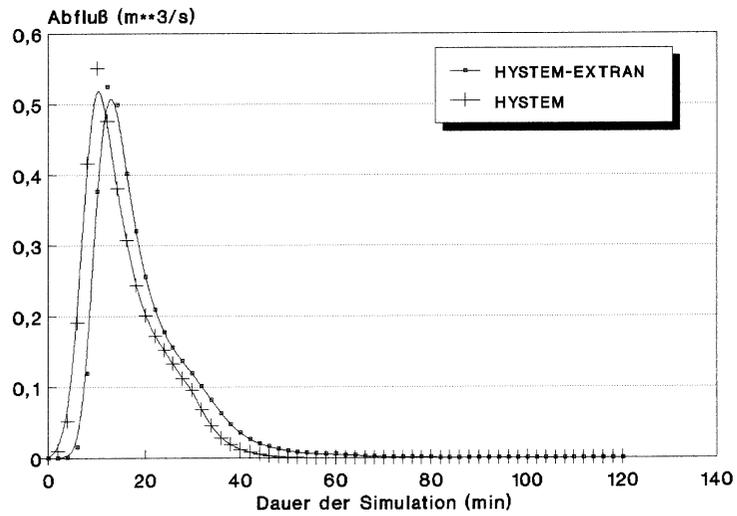
Netz: UDM\_FR01 Blockregen1



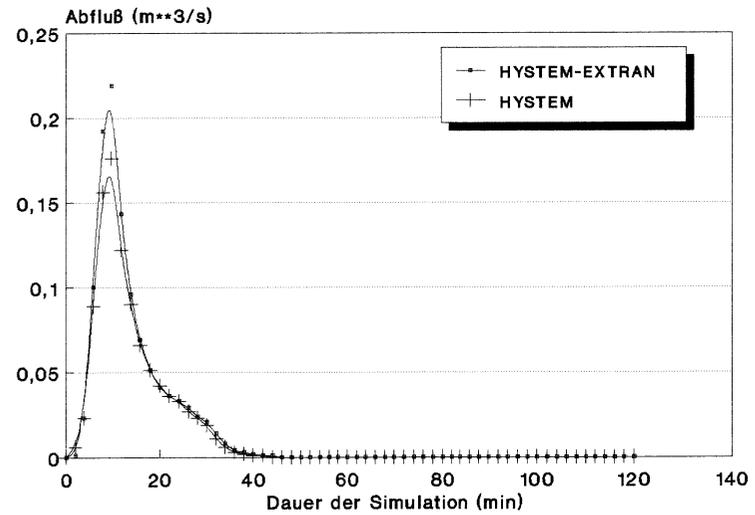
CA01, Blockreg.1, Aund ohne Verluste



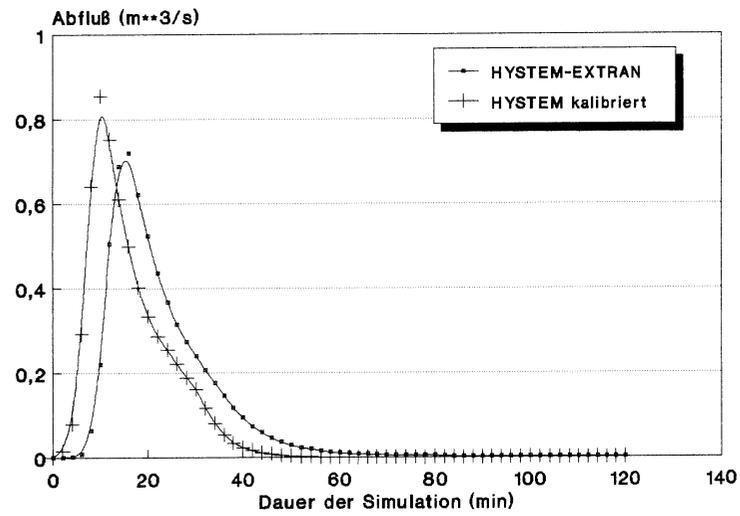
FR01, Blockreg.1, Aund ohne Verluste



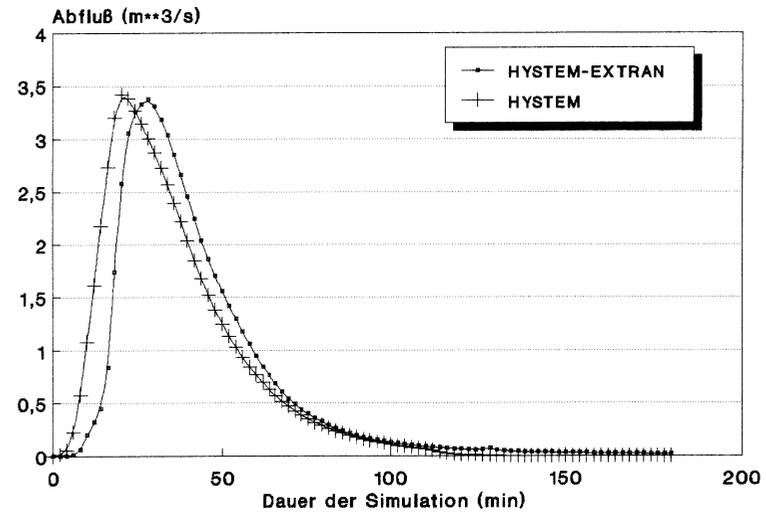
YU01, Blockreg.1, Aund ohne Verluste



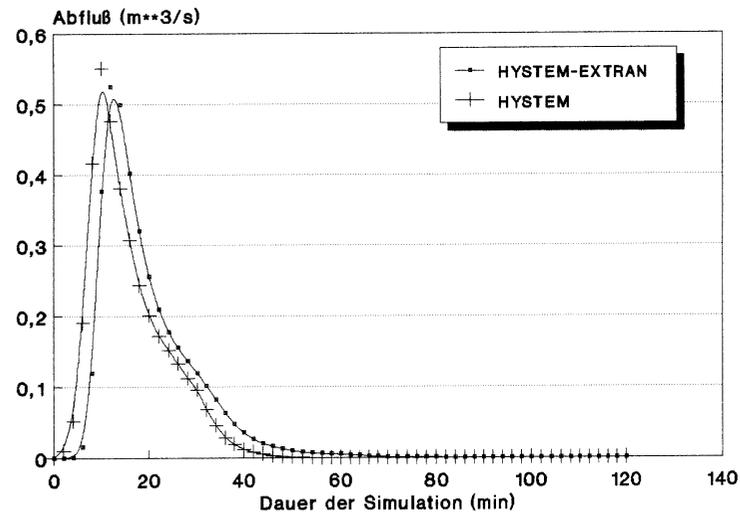
IT01, Blockreg. 1, Aund ohne Verluste



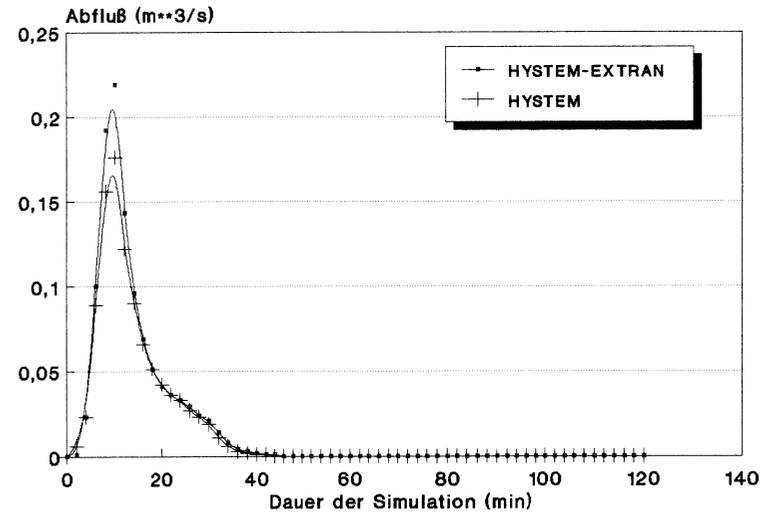
CA01, Blockreg.1, Aund ohne Verluste



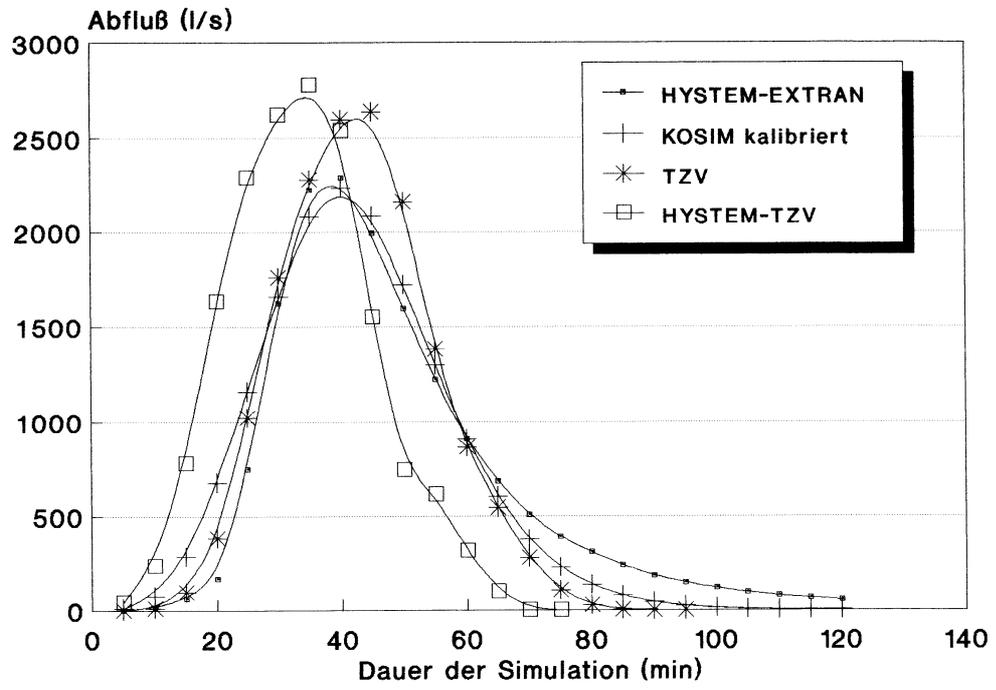
FR01, Blockreg.1, Aund ohne Verluste



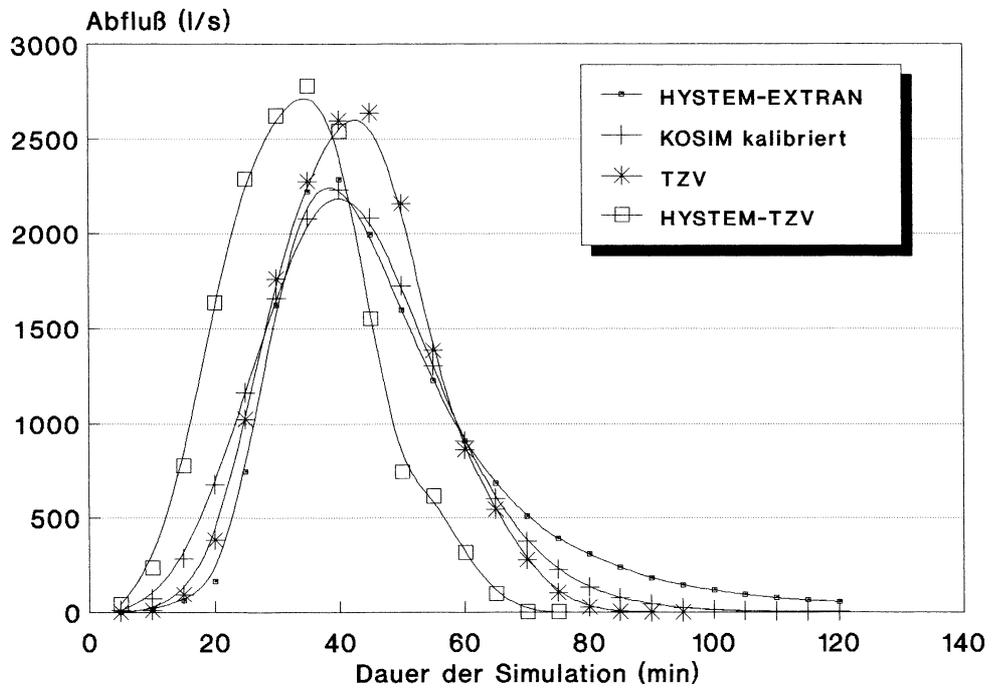
YU01, Blockreg.1, Aund ohne Verluste



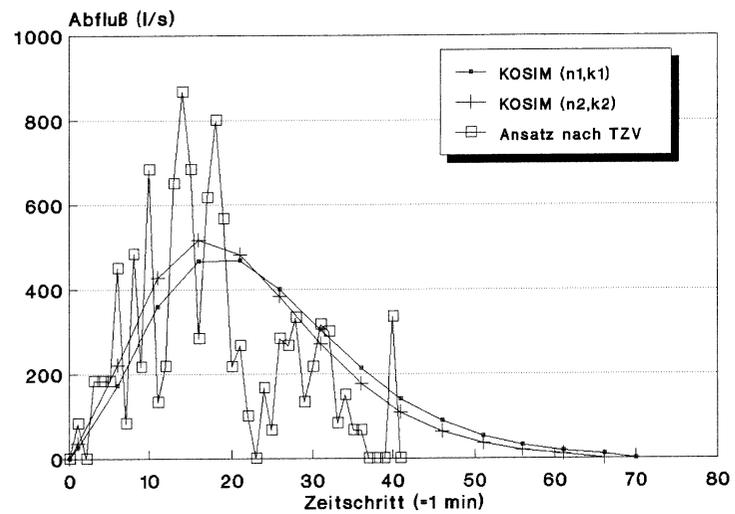
IT01, Blockreg. 1, Aund ohne Verluste



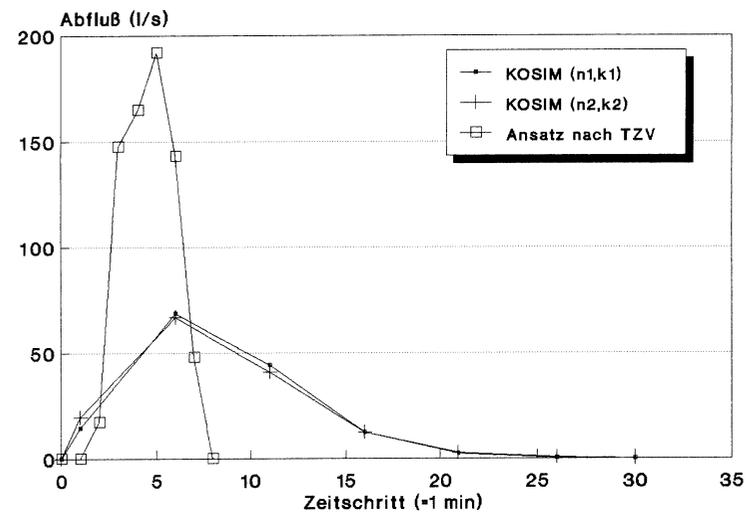
Netz: UDM\_FR01 Blockregen1



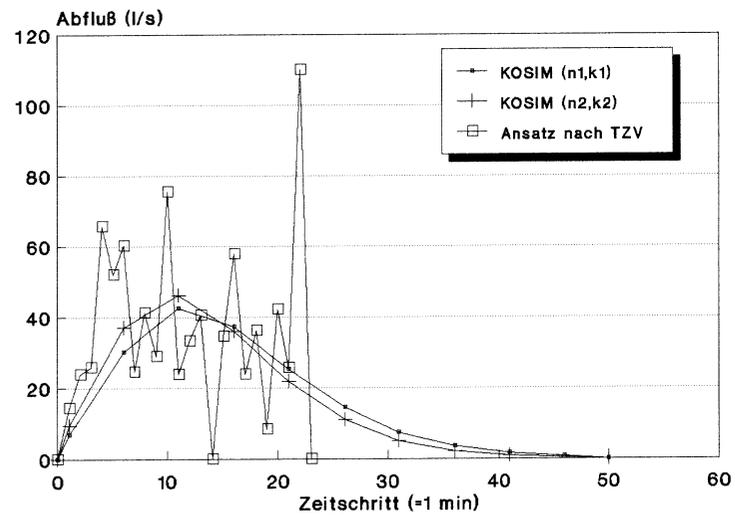
Netz: UDM\_FR01 Blockregen1



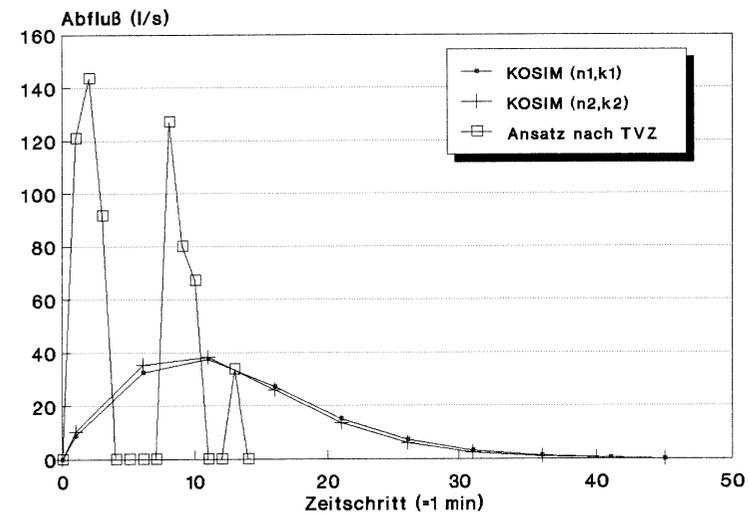
Kanalnetz FR01



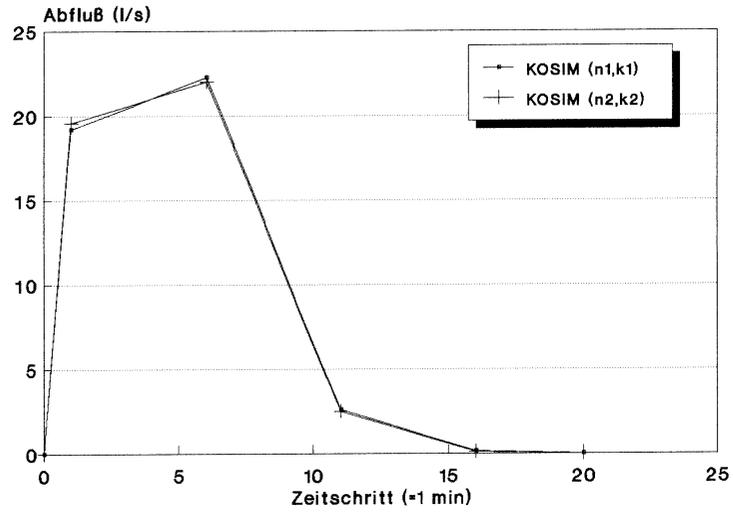
Kanalnetz GB01



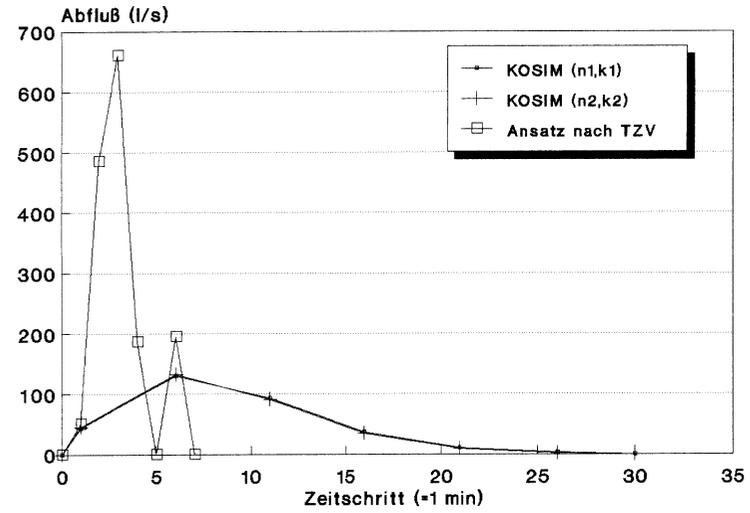
Kanalnetz GB02



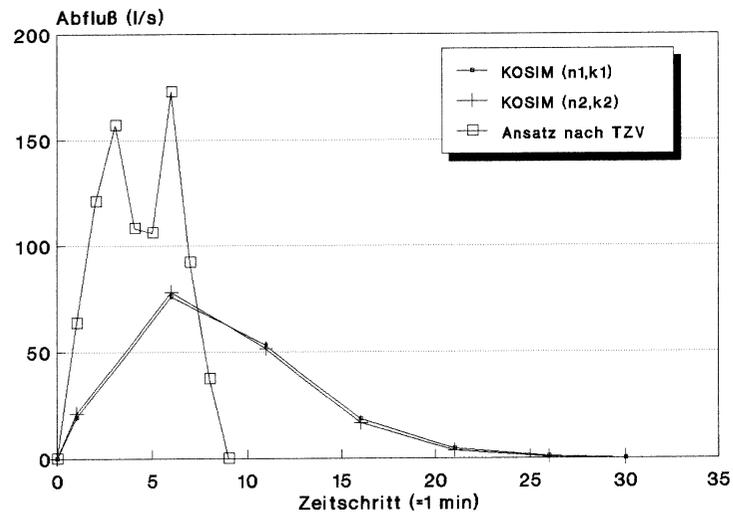
Kanalnetz HU01



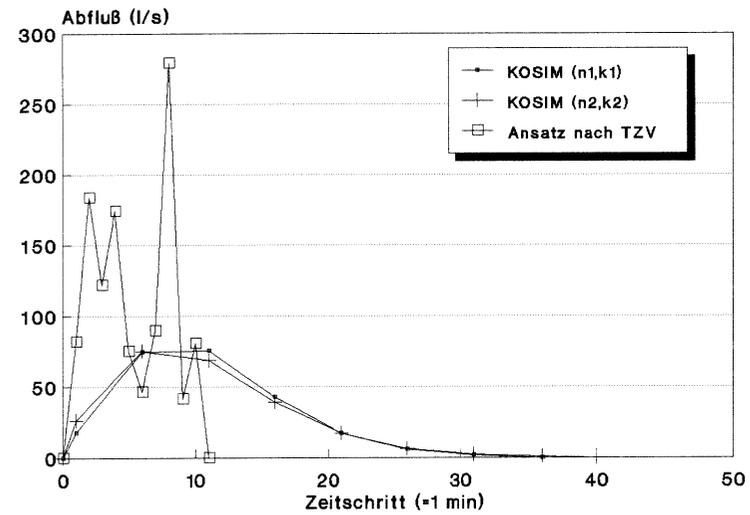
Kanalnetz IT01



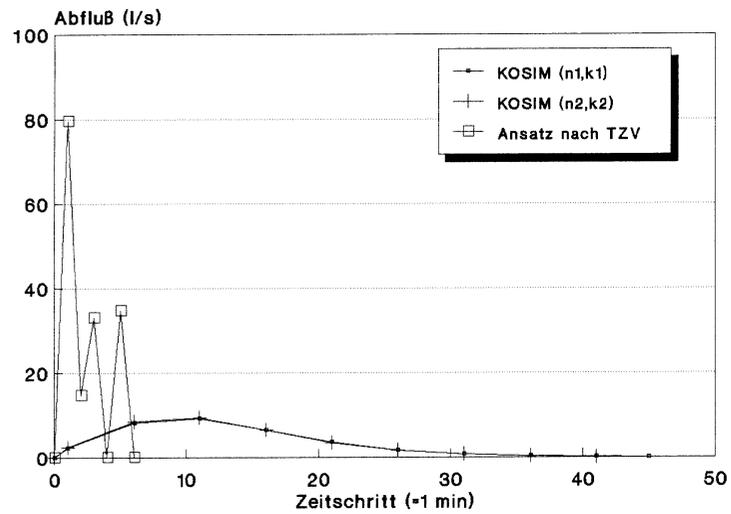
Kanalnetz NO01



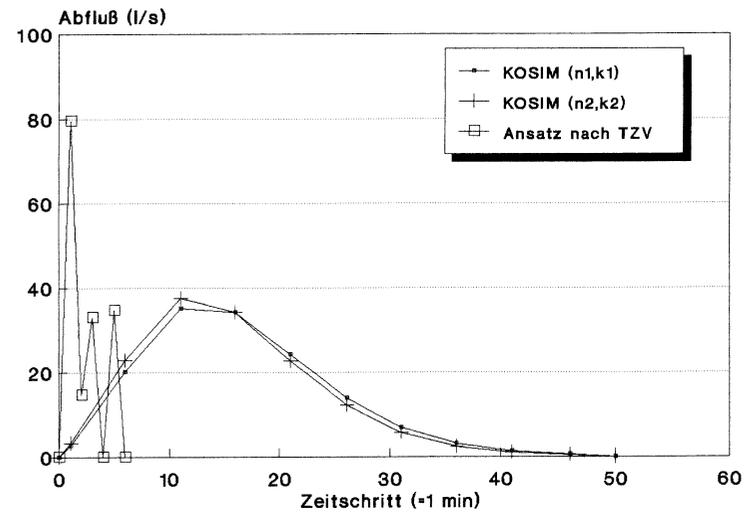
Kanalnetz SE01



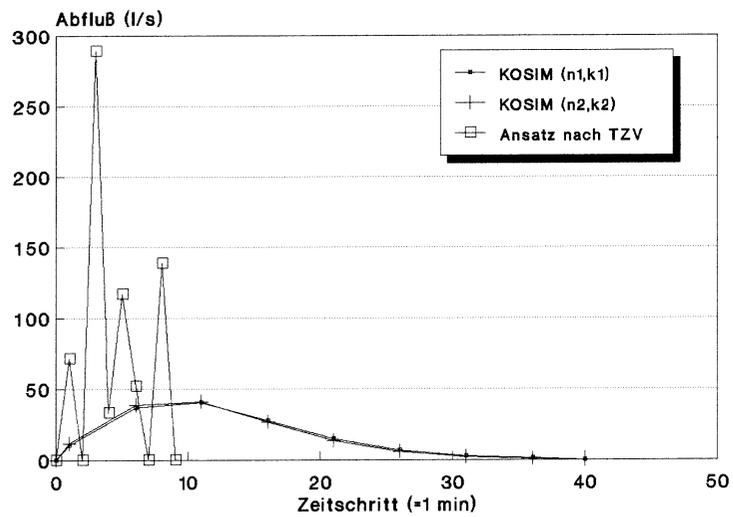
Kanalnetz SE02



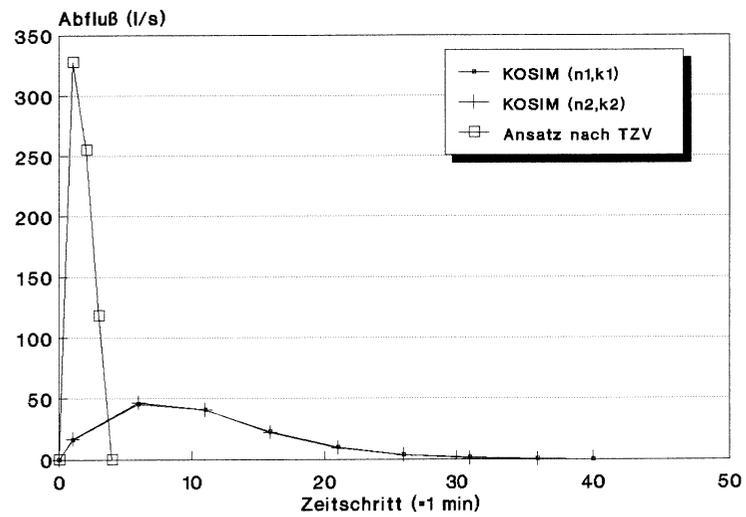
Kanalnetz US01



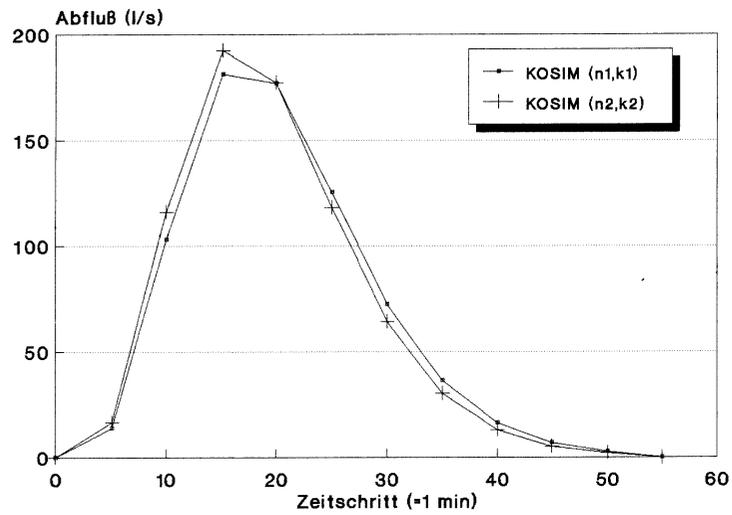
Kanalnetz US02



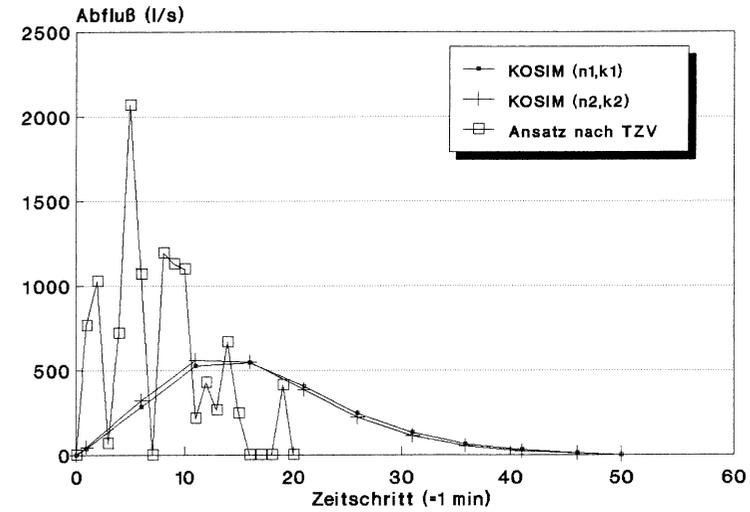
Kanalnetz US04



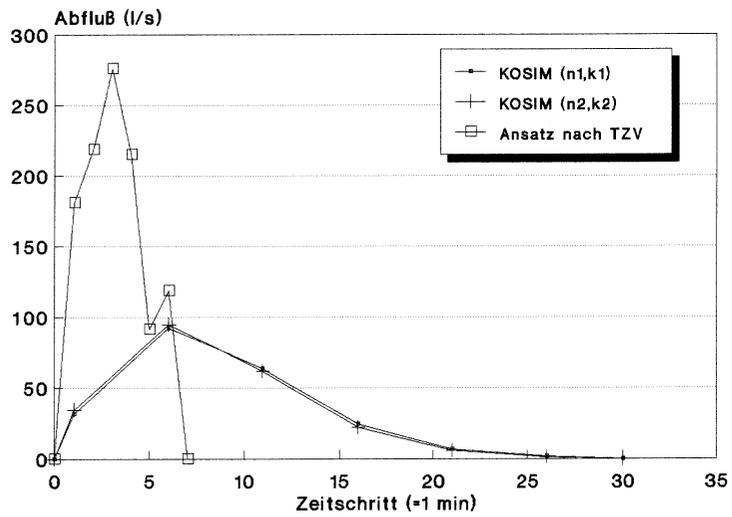
Kanalnetz US05



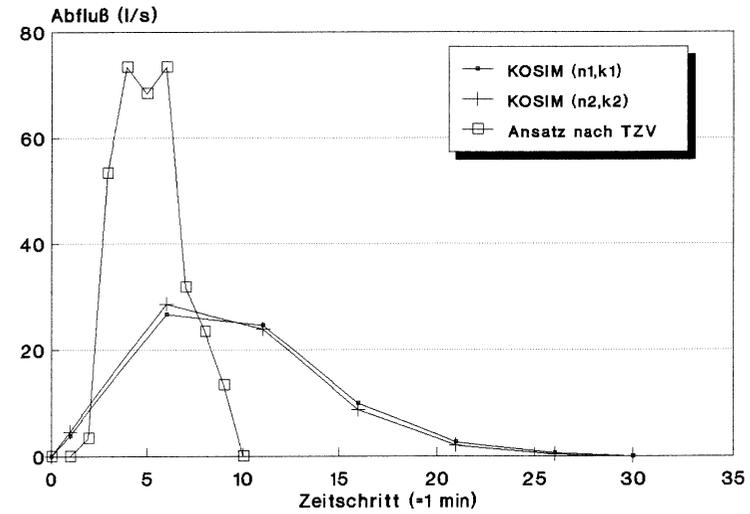
Kanalnetz AU01



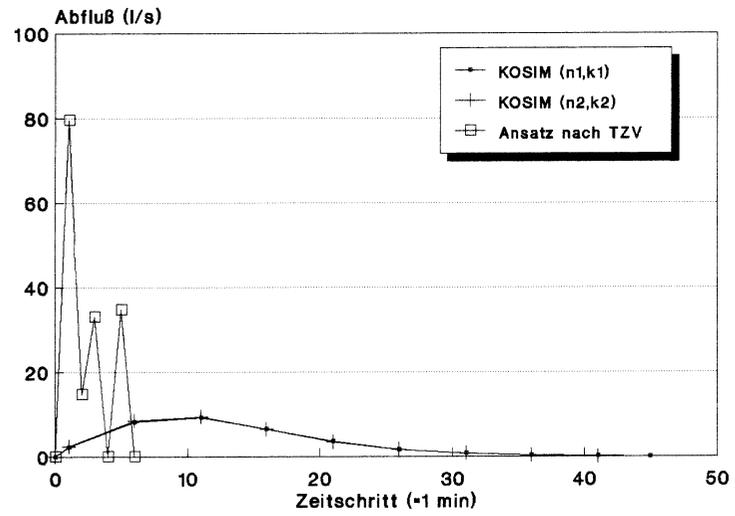
Kanalnetz CA02



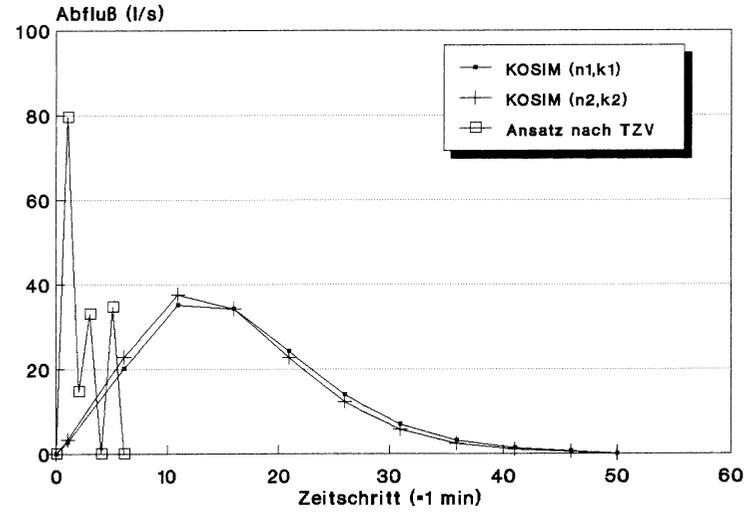
Kanalnetz CH01



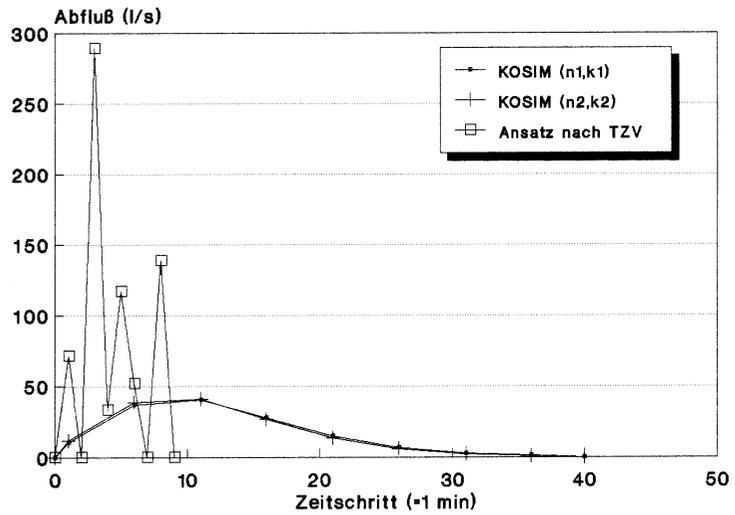
Kanalnetz DK01



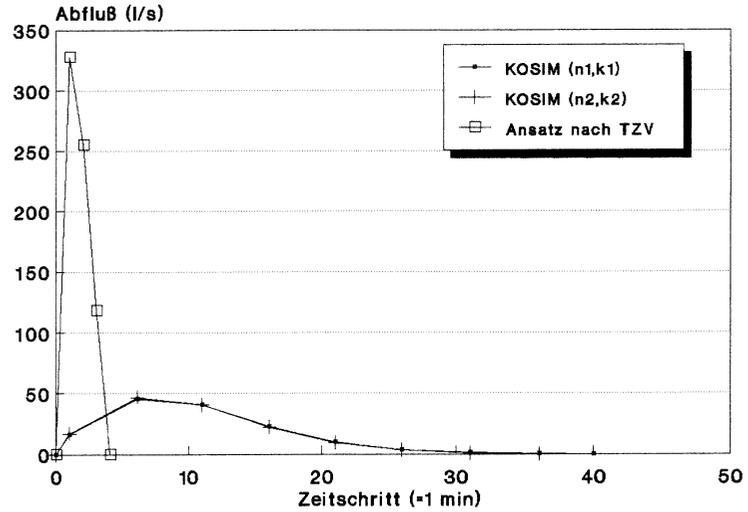
Kanalnetz US01



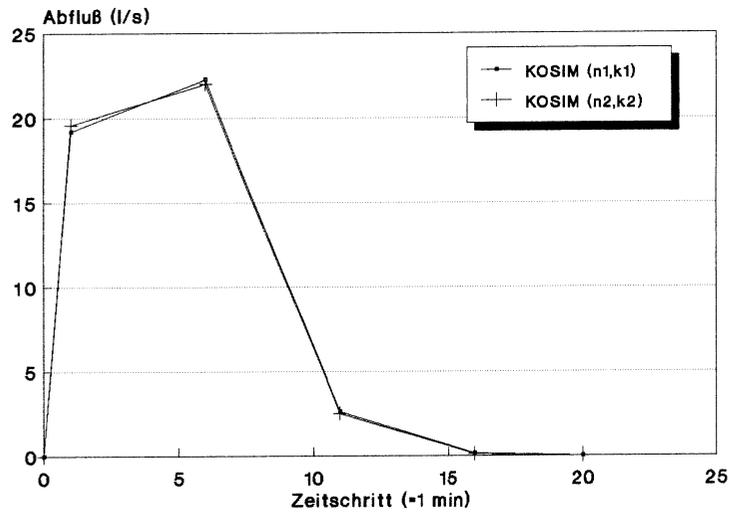
Kanalnetz US02



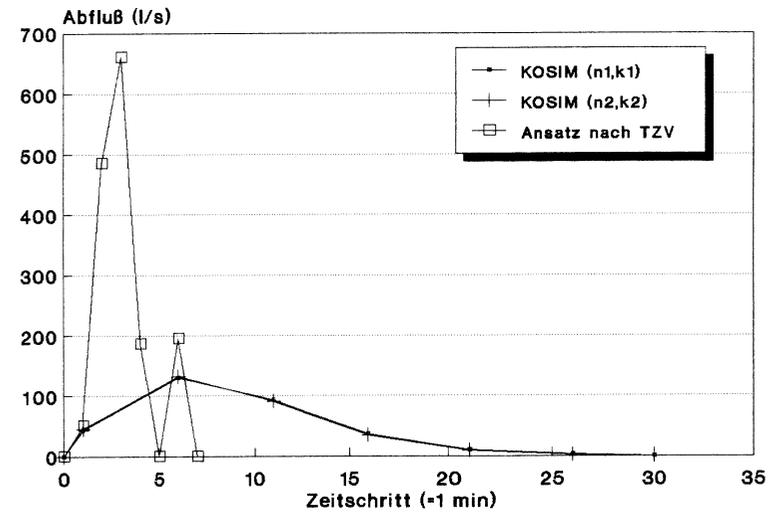
Kanalnetz US04



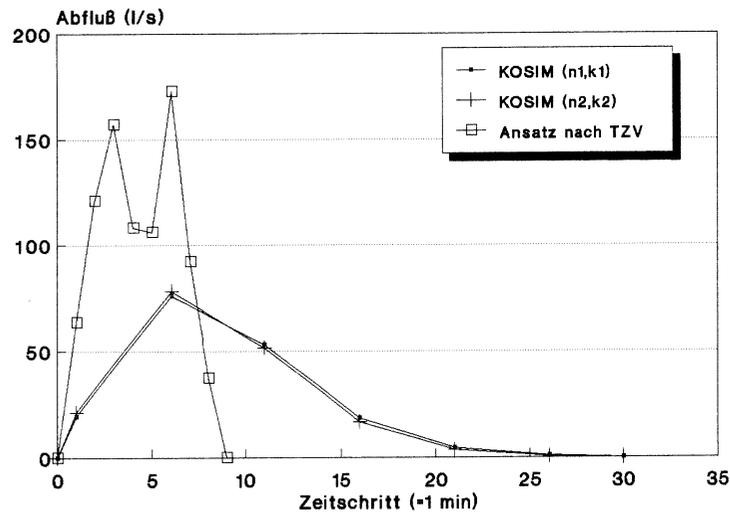
Kanalnetz US05



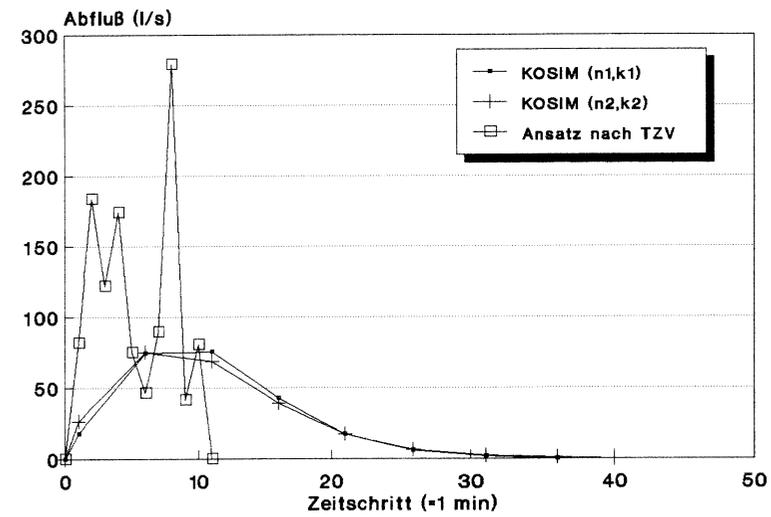
Kanalnetz IT01



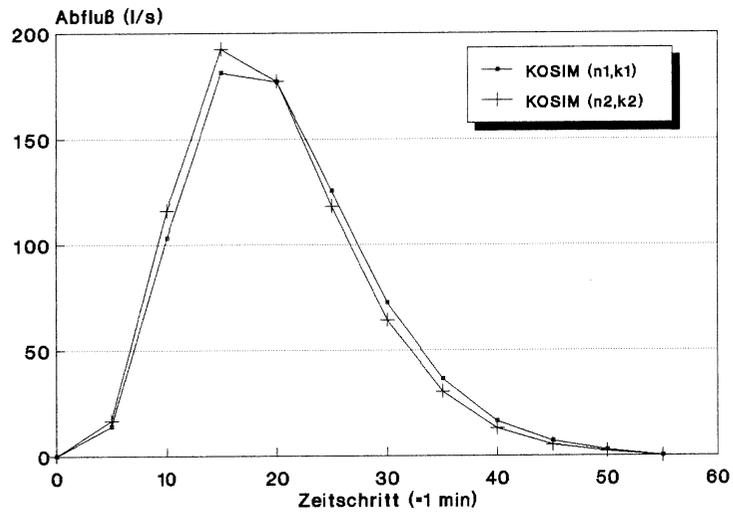
Kanalnetz NO01



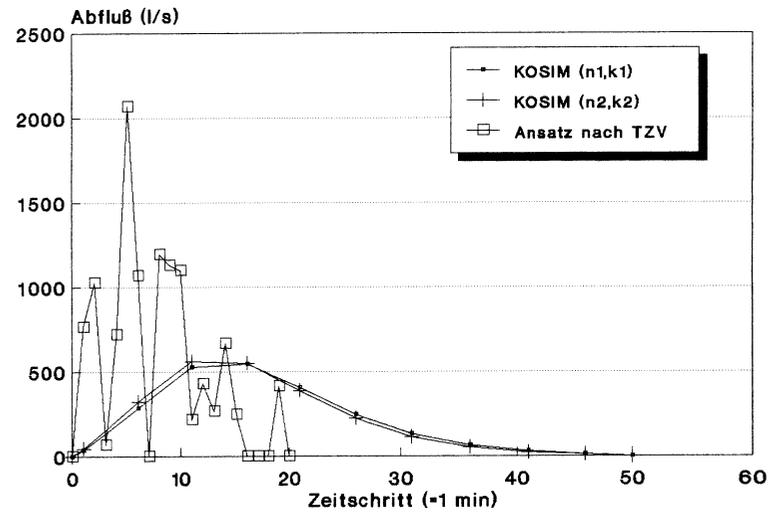
Kanalnetz SE01



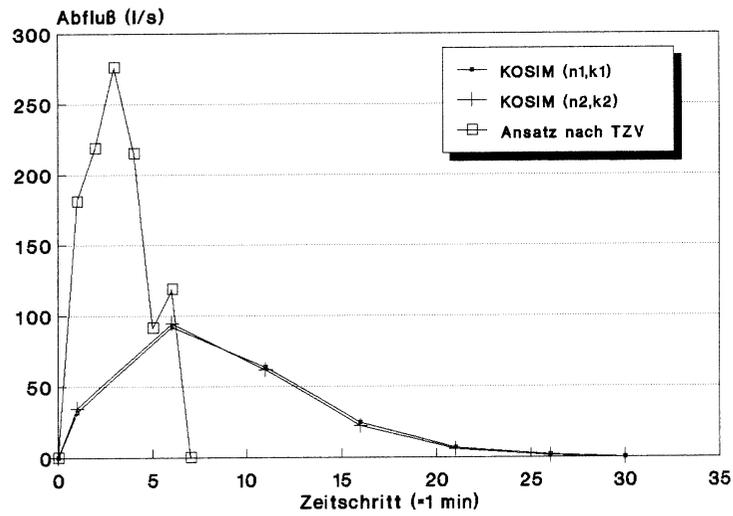
Kanalnetz SE02



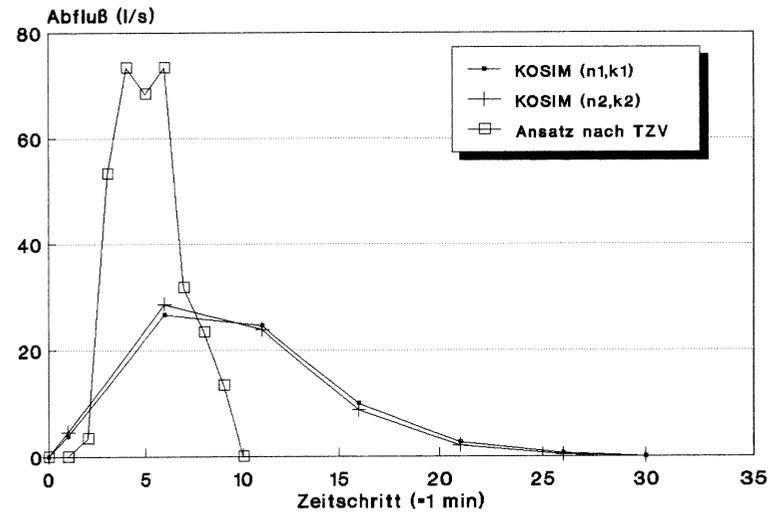
Kanalnetz AU01



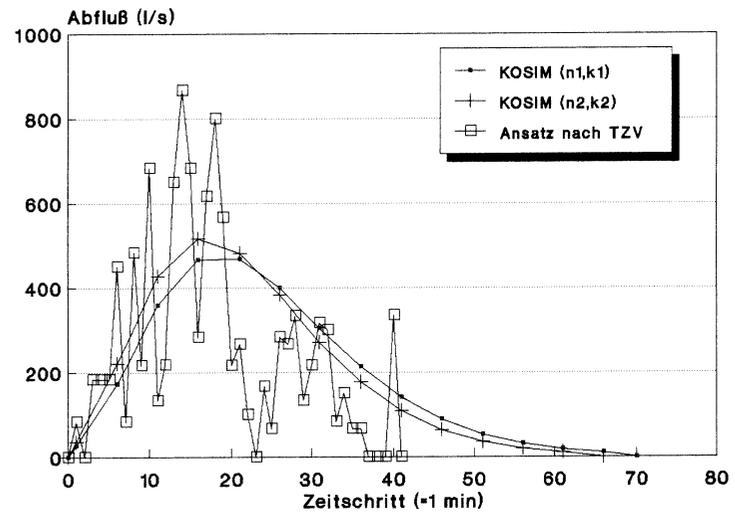
Kanalnetz CA02



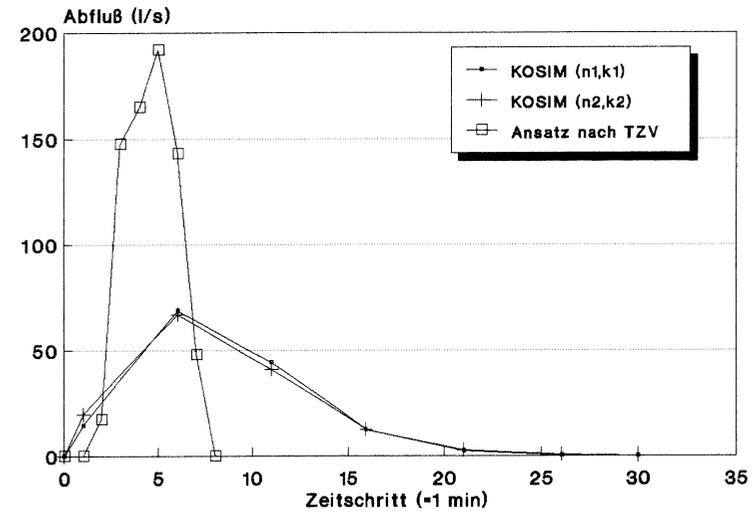
Kanalnetz CH01



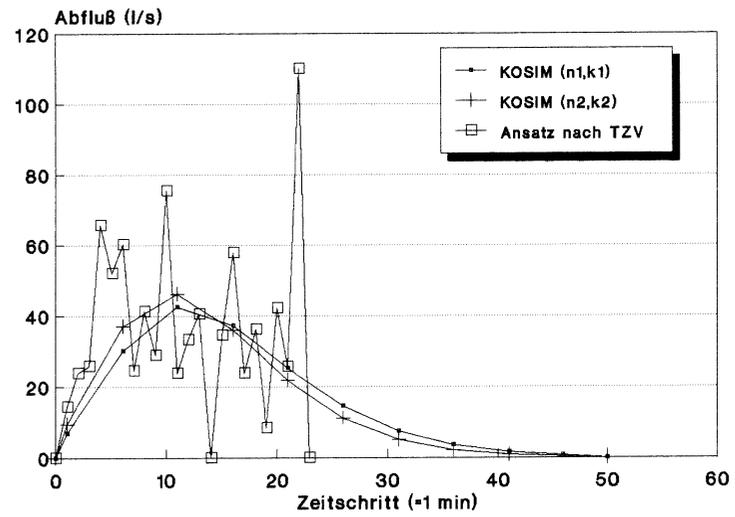
Kanalnetz DK01



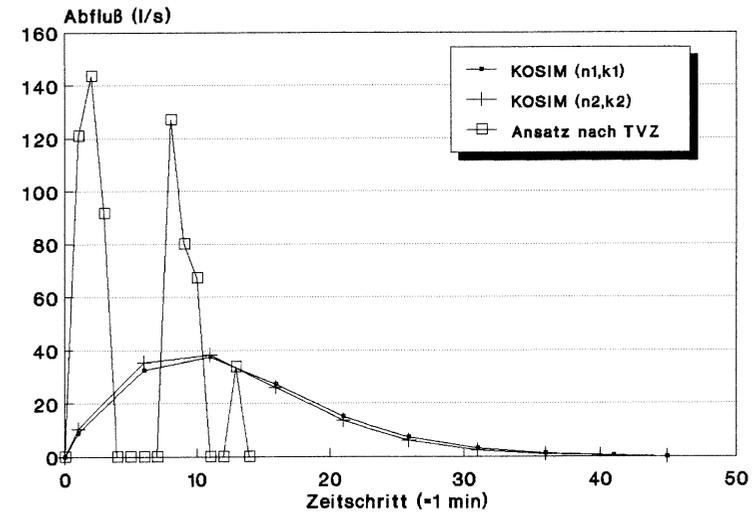
Kanalnetz FR01



Kanalnetz GB01



Kanalnetz GB02



Kanalnetz HU01