

Deutsche Forschungsgesellschaft

Forschungsbericht

DFG SI 242/7-2

Band 2

Quantifizierung der Unsicherheiten
bei der Abflußberechnung in
städtischen Entwässerungssystemen

von

Dr.-Ing. Amar Khelil

Dipl.-Math. Marita Semke

Universität Hannover
Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie
und landw. Wasserbau

Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Friedhelm Sieker

Teil IV : Empirische Untersuchungen

1. Wichtige Charakteristiken der verwendeten
Simulationsmodelle

| | |
|--------------------------|------|
| 1.1 Modell "HYSTEM"..... | S. 2 |
| 1.2 Modell "HYSRAD"..... | S. 3 |
| 1.3 Modell "KOSIM"..... | S. 4 |
| 1.4 Modell "KMROUT"..... | S. 5 |
| 1.5 Modell "EXTRAN"..... | S. 7 |

2. Ziele, Vorgehensweise und Randbedingungen der prak-
tischen Untersuchung

| | |
|--|-------|
| 2.1 Allgemeine Randbedingungen..... | S. 8 |
| 2.2 Ziele der Untersuchung..... | S. 12 |
| 2.2.1 Abflußbildung..... | S. 12 |
| 2.2.2 Wellen-Bewegung..... | S. 13 |
| 2.3 Beschreibung der UDC-Entwässerungssysteme..... | S. 14 |
| 2.3.1 Auflistung..... | S. 14 |
| 2.3.2 Wichtige Kenndaten..... | S. 18 |
| 2.4 Verwendete Regenbelastungen..... | S. 19 |

3. Untersuchung der Abflußbildung

| | |
|--|-------|
| 3.1 Ergebnisse der Simulationen..... | S. 21 |
| 3.1.1 Vergleich zwischen GWM1, GWM2..... | S. 21 |
| 3.1.2 Vergleich zwischen GWM2, PROM und KONM..... | S. 24 |
| 3.2 Schlußfolgerungen..... | S. 31 |

'QUANTIFIZIERUNG DER UNSICHERHEITEN VON ABFLUSSBERECHNUNG IN
STÄDTISCHEN ENTWÄSSERUNGSSYSTEMEN';

ABSCHLUßBERICHT DFG SI 242/7-2

Projektleiter: Prof.Dr.-Ing. F. Sieker

Sachbearbeiter:

erste Fassung (August 1989):

Dr.-Ing. L. Fuchs
Dipl.-Math. R. Okroy

zweite Fassung (1991):

Dr.-Ing. A. Khelil
Dipl.-Math. M. Semke

4. Abfluvorgänge an der Oberfläche und im Kanal

| | |
|---|----|
| 4.1 Untersuchung mit einem hydrologisch-hydrodynamischen detaillierten Transport-Modell.....S. | 33 |
| 4.1.1 Kalibrierung.....S. | 33 |
| 4.1.2 Vergleichsimulationen mit kalibrierten und mit Standardparametern.S. | 37 |
| 4.2 Vergleich zwischen hydrodynamischer und hydrologischer detaillierter Transport-Simulation.....S. | 40 |
| 4.2.1 Ergebnisse.....S. | 40 |
| 4.2.2 Schlußfolgerungen.....S. | 44 |
| 4.3 Untersuchung der vereinfachten hydrologischen Simulation.....S. | 46 |
| 4.3.1 Einführung.....S. | 46 |
| 4.3.2 Vereinfachte Simulation mit der Einheitsganglinie (HYSTEM).....S. | 47 |
| 4.3.3 Vereinfachte Simulation mit der linearen Speicherkaskade (KOSIM)....S. | 52 |
| 4.3.4 Anwendung einer der Kanalnetzcharakteristik entsprechenden Übertragungsfunktion (U-H Funktion).....S. | 58 |
| 4.3.5 Schlußfolgerungen.....S. | 62 |
| 4.4 Einfluß der Niederschlagsvariabilität....S. | 65 |
| 4.4.1 Ungenauigkeit von Niederschlagsdaten.S. | 68 |
| 4.4.1.1 Vergleich Tropfenspektrograph - Regenschreiber.....S. | 68 |
| 4.4.1.2 Vergleich Radar - Regenschreiber...S. | 70 |
| 4.4.2 Untersuchungen zur Niederschlagsvariabilität.....S. | 75 |
| 4.4.3 Schlußfolgerungen.....S. | 94 |

LISTE DER ABBILDUNGEN/TABELLEN

TEIL IV: Empirische Untersuchung

| | |
|----------|--|
| Abb. 1: | Gegenüberstellung der abflußwirksamen Regenintensitäten nach GWM1 und GWM2 |
| Abb. 2: | Gegenüberstellung der abflußwirksamen Regenintensitäten nach GWM2, PROM und KONM |
| Abb. 3: | Gegenüberstellung der Deviationen zwischen Abflußganglinien nach GWM2 und PROM in den systematischen Untersuchungen (mit detaillierten und vereinfachten Netzen) |
| Abb. 4: | Ergebnisse der α_u -Kalibrierung, Abflußganglinie der Simulation IT01-Blockregen 1 |
| Abb. 5: | Ergebnisse der α_u -Kalibrierung, Abflußganglinie der Simulation CA02-Blockregen 2 |
| Abb. 6: | Abflußganglinien der Simulationen CA02-Blockregen 1 mit HYSTEM-EXTRAN und KOSIM |
| Abb. 7: | Abflußganglinien der Simulationen IT01-Blockregen 1 mit HYSTEM-EXTRAN und KOSIM |
| Abb. 8: | Abflußganglinie ermittelt nach der UH-Funktion ohne Berücksichtigung der Oberflächenkonzentration |
| Abb. 9: | Simulationsergebnisse mit der UH-Funktion unter Berücksichtigung der Oberflächenkonzentration |
| Abb. 10: | Radar-Messung einer Schauerlinie |
| Abb. 11: | Vergleich der Niederschlags-Summenlinien von Tropfenspektrograph und Wippengerät |
| Abb. 12: | Vergleich von Punkt- und Radarmessungen für drei verschiedene Koordinaten (aus Becker, Geiger 1983) |
| Abb. 13: | Vergleich des Gebietsniederschlages ermittelt aus Punkt- und Radarmessung (aus Becker, Geiger 1983) |
| Abb. 14: | Standorte der Regenschreiber im Radar-Meßsektor |
| Abb. 15: | Vergleich täglicher Niederschlagshöhen aus Radar- und Punkt-Messungen für zwei Stationen |

- Abb. 16: Vergleich punktuell gemessenen Niederschlages dreier Meßstationen (aus Becker, Geiger 1983)
- Abb. 17: Räumliche Variabilität eines Ereignis-Zeitpunktes anhand der Angaben der Regenhöhen (aus Becker, Geiger 1983)
- Abb. 18: Intensitätsverteilung künstlicher Niederschlags-Daten
- Abb. 19: Vergleich zweier Abflußganglinien auf der Basis flächenhafter (Radar) und gleichförmiger (1 RS) Überregnung
- Abb. 20: Vergleich der Variabilität von Punkt-Niederschlägen V_p (5 Regenschneemesser) und gemessenen/verstärkten Radar-Niederschlägen V_R (identische Meßpunkte wie Punkt-Meß-geräte)
- Abb. 21: Niederschlagsinformationen aufgrund unterschiedlicher Registrierungsintervalle
- Tab. 1: Bewertung der Prüfgrößen DEVS, DEVM, STAN, VOL
- Tab. 2: UDC-Kanalnetzdaten
- Tab. 3: Haltungsspezifische Parameter der UDC-Netze
- Tab. 4: Charakteristiken der einzelnen UDC-Netze
- Tab. 5: Deviationen zwischen den berechneten Oberflächenabflußganglinien nach GWM1 und GWM2 (mit TEST.NET)
- Tab. 6: Vergleich der Abflußganglinien nach GWM2 / PROM / KONM, Kanalnetz UDMCA01
- Tab. 7: Vergleich der Abflußganglinien nach GWM / PROM / KONM, Kanalnetz UDMCA02
- Tab. 8: Vergleich der Abflußganglinien nach GWM / PROM / KONM, Kanalnetz UDMIT01
- Tab. 9: Deviationen zwischen den Abflußganglinien nach GWM / PROM, Originalnetze, Modellregen 1
- Tab. 10: Deviationen zwischen den Abflußganglinien nach GWM / PROM, vereinfachte Netze, Modellregen 1
- Tab. 11: Deviationen zwischen den Abflußganglinien nach GWM / PROM, Originalnetze, Blockregen 1
- Tab. 12: Hydrodynamische detaillierte Simulation mit Naturereignissen; Ergebnisse der Kalibrierung von 5 Modellparametern
- Tab. 13: Bewertung der Simulationsergebnisse mit HYSTEM-EXTRAN nach Kalibrierung der Abflußbildung und -konzentration, 3 UDC-Netze, Naturereignisse
- Tab. 14: Volumenfehler des Modells HYSTEM-EXTRAN nach Kalibrierung der Abflußbildung und -konzentration, 3 UDC-Netze, Naturereignisse
- Tab. 15: Hydrodynamische detaillierte Simulation mit Naturereignissen; Vergleich der Ergebnisse mit kalibrierten und Standardparametern, 3 UDC-Netze
- Tab. 16: Deviationen der Abflußganglinien HYSTEM-EXTRAN und HYSTEM-KMROUT, 5 UDC-NETZE, Naturereignisse
- Tab. 17: Abflußspezifische Werte der UDC-Kanalnetze
- Tab. 18: Deviationen der Abflußganglinien HYSTEM-EXTRAN und HYSTEM-KMROUT, Blockregen 1
- Tab. 19: Deviationen der Abflußganglinien HYSTEM-EXTRAN und HYSTEM-KMROUT, Blockregen 2
- Tab. 20: Deviationen der Abflußganglinien HYSTEM-EXTRAN und HYSTEM-KMROUT, Blockregen 3
- Tab. 21: Deviationen HYSTEM-EXTRAN und HYSTEM-KMROUT für Kanalnetz US03 nach Änderung von Haltung 13
- Tab. 22: Ergebnisse des Kalibrierungsprozesses, vereinfachte Simulation mit der Einheitsganglinie, 3 Blockregen
- Tab. 23: Deviationen zwischen den Abflußganglinien nach HYSTEM-EXTRAN und nach HYSTEM (kalibriert), Modellregen 1
- Tab. 24: Ergebnisse der Kalibrierung für die vereinfachte Simulation mit KOSIM, Blockregen 1
- Tab. 25: Ergebnisse der Kalibrierung für die vereinfachte Simulation mit KOSIM, Blockregen 2
- Tab. 26: Deviationen der Ganglinien HYSTEM-EXTRAN und UH-Funktion, Kanalnetz FR01, Blockregen 1
- Tab. 27: Vereinfachte hydrologische Simulation; Vergleich zwischen den "optimalen" Schwerpunktlaufzeiten für die 3 untersuchte Ansätze; Blockregen 1

- Tab. 28: Mittlere Quotienten X und X_K aus 88 Radar- und Regenschreiber-gemessenen Niederschlägen für verschiedeneenergiebige Niederschläge
- Tab. 29: Relative Abweichungen bei Verwendung punktueller Meßwerte gegenüber flächenmäßiger Werte
- Tab. 30: Abweichungen bei Verwendung punktueller Meßwerte gegenüber flächenmäßigen Werte für ein städtisches Einzugsgebiet
- Tab. 31: Meßnetzdichte unterschiedlicher Niederschlagsauflösung
- Tab. 32: Niederschlagssumme bei unterschiedlicher räumlicher Auflösung
- Tab. 33: Mittlerer relativer Fehler bei der N-A-Simulation mit unterschiedlichen räumlicher Niederschlagsauflösungen
- Tab. 34: Abweichungen bei der Verwendung von flächenmäßigen Niederschlags-Daten mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung
- Tab. 35: Mittlerer relativer Fehler bei der N-A-Simulation mit unterschiedlichen zeitlicher Niederschlagsauflösungen

**TEIL IV:
EMPIRISCHE UNTERSUCHUNG**

1. Wichtige Charakteristiken der verwendeten Simulationsmodelle

1.1 Das Programm HYSTEM

HYSTEM wurde von Verworn/Harms (Fuchs, Verworn, 1990) am Institut für Wasserwirtschaft der Universität Hannover entwickelt.

HYSTEM ist ein hydrologisches Modell zur Simulation der Abfluß-Bildung und -Konzentration. Der Netzzustand wird durch den Abfluß aus dem Gebiet definiert.

In jedem Einzugsgebiet (bzw. Teileinzugsgebiet des Entwässerungskanal) erfolgt eine **Trennung zwischen durchlässigen und undurchlässigen Flächen**, deren Charakteristiken sich sowohl bei der Berechnung der Verluste als auch bei der Ermittlung des Oberflächenabflusses sehr unterscheiden. Zudem wird bezüglich der durchlässigen (bzw. undurchlässigen) Flächen innerhalb eines betrachteten (Teil-) Gebiets keine eingehendere Unterscheidung durchgeführt, d.h die eingesetzten hydrologischen Parameter entsprechen einem pauschalen Verhalten des Bodens.

Abflußbildung der undurchlässigen Flächen (vgl. Teil III.1) :

- Vorwegabzug der Benetzungsverluste
- restliche Oberflächenverluste (Mulden-, Verdunstungs- und andere Dauer-Verluste) nach der **Grenzwertmethode**:
Grundgleichung: Gl. III.2; Arbeitsgleichung: direkte Übertragung der Gl. III.2 mit einem Berechnungszeitschritt von einer Minute ($\Delta t = 1 \text{ min}$)
- **Standardparameter**: $V_b=0,7 \text{ mm}$; $V_m=1,8 \text{ mm}$; $\psi_o=0,25$; $\psi_e=0,85$

Abflußbildung der durchlässigen Flächen :

- Vorwegabzug der Benetzungs- und Mulden-Verluste
- Versickerungsverluste nach dem **Ansatz von Neumann**:
Grundgleichung: Gl. III.13; Arbeitsgleichungen in integraler Form: Gl. III.32 bzw. Gl. III.33
- **Standardparameter**: siehe Tab. III.2

Abflußkonzentration:

- Für die durchlässigen sowie für die undurchlässigen Flächen wird der "Black-Box" Ansatz nach der **Standard-Einheitsganglinie** (Verworn, Harms, 1980) eingesetzt. Der einzige hydrologische Modell-Parameter (die Schwerpunktlaufzeit t_L eines jeden betrachteten Teilgebietes) wird aus statistischen Regressionsformeln gerechnet:
 - für die undurchlässigen Flächen : t_L nach Gl. III.75
 - für die durchlässigen Flächen : t_L nach Gl. III.76
- Die Arbeitsgleichung zur Berechnung des Faltungsintegrals entspricht der Gl. III.88 und der Berechnungsschritt Δt beträgt (wie bei der Abflußbildung) 1 Minute

Bemerkung:

Da die Regeninformation im besten Fall mit einem 5-minütigen Erfassungsintervall in die Regendatei geschrieben wird, muß eine Vorberechnung der Niederschlagshöhe über ein 1-minütiges Intervall erfolgen, sodaß eine konstante Regenintensität über 5 Minuten angenommen wird ($N_{5min} = 5 \cdot N_{1min}$).

1.2 Das Programm HYSRAD

HYSRAD versteht sich in folgenden Punkten als Erweiterung (bzw. Verbesserung) des Programms HYSTEM:

1. Beschreibung der Eingangsdaten (Niederschlagsintensitäten):

Es besteht in HYSRAD die Möglichkeit zur Berücksichtigung der räumlichen Variabilität des Niederschlags durch Angabe eines repräsentativen Regenschreibers je Teilgebiet (bzw. Haltung) des Entwässerungssystems (in HYSTEM ist nur eine Regeninformation für das gesamte simulierte Gebiet anzugeben).

2. Verteilung der Muldenverluste

Zur Berechnung der Muldenverluste nach der Grenzwertmethode wird im Gegensatz zu HYSTEM eine integrierbare Formel (Gl. III.2) eingesetzt (vgl. 1.3-1 Grenzwertmethode in KOSIM).

Bei der Berechnung der Mulden-Verluste für durchlässige Flächen wird ebenfalls die Grenzwertmethode herangezogen, anstatt diese (wie in HYSTEM) vorweg abzuziehen.

3. Wahlmöglichkeit des Ansatzes zur Berechnung der Versickerungsleistung

Zur Berechnung der Versickerungsleistung besteht die Möglichkeit, den **Ansatz von Horton** (Gl. III.8) anzuwenden (vgl. 1.3-2 Versickerungsverluste in KOSIM).

4. Differenziertere Berechnung der Schwerpunktlaufzeit

Bei der Berechnung der Schwerpunktlaufzeit undurchlässiger Flächen eines Teileinzugsgebietes wird eine zweite Regressionsformel herangezogen, wenn die entsprechende Fläche mehr als 2500 m² beträgt.

1.3 Das Programm KOSIM

KOSIM wurde am Institut für Wasserwirtschaft der Universität Hannover von Paulsen (1987) entwickelt und **ermöglicht wie HYSTEM (bzw. HYSRAD) eine Berechnung der Abfluß-Bildung und -Konzentration.**

Im Prinzip verläuft die Simulation eines einzelnen Ereignisses wie in HYSTEM (bzw. HYSRAD). KOSIM ist aber (im Gegensatz zu HYSTEM/HYSRAD) zur kontinuierlichen Simulation entworfen. Gegenüber HYSTEM (und gegebenenfalls HYSRAD) ergeben sich Unterschiede in den folgenden Punkten:

1. Verteilung der Muldenverluste

Bei der Berechnung der Muldenverluste undurchlässiger Flächen wird eine Grenzwertmethode herangezogen, deren Grundgleichung (Gl. III.2) integrierbar ist. Gl. III.5 und Gl. III.6 stellen die entsprechenden Arbeitsgleichungen des Modells.

2. Versickerungsleistungen nach Horton

Zur Berechnung der Versickerungsleistung der durchlässigen Flächen wird der Ansatz von Horton verwendet. Die entsprechende Arbeitsgleichung ist in integraler Form formuliert (Gl. III.28). Falls die potentielle Infiltrationsrate nicht überschritten wird, findet eine Regenerationsphase statt (Gl. III.29, III.30, III.31).

3. Berechnung der Abflußkonzentration

Das hydrologische Modell zur Berechnung des Oberflächenabflusses beruht auf dem Konzept der linearen Speicherkaskade (vgl. III.4.2 und III.4.3.2).

Die Kern-Funktion $h(t)$ wird nach Gl. III.64 formuliert. Die im Programm verwendete Arbeitsgleichung entspricht Gl. III.88, wobei die zwei folgenden numerischen Randbedingungen festgelegt wurden:

- der Berechnungszeitschritt beträgt 5 Minuten ($\Delta t = 5 \text{ min}$)
- über jedes Berechnungsintervall wird die Kern-Funktion $h(t)$ als konstant betrachtet. Mathematisch läßt sich diese Annahme wie folgt formulieren:

$$h(t, \Delta t) = h(t, 5 \text{ min}) = h(t)$$

Die hydrologischen Parameter n und k des Modells müssen direkt vom Benutzer angegeben werden.

1.4 Das Programm KMROUT

KMROUT wurde am Institut für Wasserwirtschaft der Universität Hannover von Semke (1984) entwickelt, dann von Grotehusmann (1991) modifiziert und geht auf eine Idee von Euler (1973, 1983) zurück.

Es ist ein detailliertes hydrologisches Modell zur Simulation des Transports im Kanalnetz (vgl. III.4.4.2.1).

Theoretische Basis des Modells stellen die Überlegungen von Kalinin-Miljukov zur Übertragung des Konzeptes linearer Speicher auf (charakteristische) Abschnitte eines Entwässerungssystems dar. **Nach KMROUT entspricht jede Haltung einem (charakteristischen!) Abschnitt.** Der Netzzustand zur Zeit t wird durch Angabe aller Zuflüsse und Abflüsse aus den Teilsystemen definiert.

Für jede Haltung (bzw. Teilsystem) wird der einzige hydrologische Modellparameter k aus einer entsprechenden Abflußkurve berechnet. Die im Programm verwendeten Kurven entstammen dem ATV-Arbeitsblatt A110 oder in Sonderfällen aus der Berechnungsformel von Manning-Strickler (Gl. III.44). Es bestehen zwei Möglichkeiten zur Bestimmung des Parameters k aus den Abflußkurven:

- für jeden gegebenen Abschnitt einen mittleren Wert für k über den gesamten Simulationszeitraum, wie es Euler vorschlägt.
- zu jedem Simulationszeitschritt wird in Abhängigkeit vom Teilfüllungsgrad ein Wert $k(h)$ ermittelt. Dafür kann jeder Querschnitt maximal in 50 Bereiche unterteilt werden.

Das Grundgleichungssystem (des linearen Speichers) besteht aus den Gleichungen III.59 und III.60. Die theoretische Lösung wird entsprechend der Gleichung III.61¹ formuliert. Aus die-

¹ streng genommen, gilt die Lösung nach Gl.61. nur, wenn der Koeffizient k konstant bleibt. Falls $k=k(h)$ sollte auf die folgende allgemeine Lösung zurückgegriffen werden (siehe z.B. Bronstein S.378 oder Seus-Rösl).

$$(Gl.1) \quad Z(t) = Z_0 \cdot e^{-\int_{t_0}^t \frac{dr}{k(r)}} + \int_{t_0}^t \frac{U(r)}{k(r)} \cdot e^{-\int_r^t \frac{d\eta}{k(\eta)}} \cdot dr$$

In KMROUT wird aber auf diese Unterscheidung verzichtet. Dies führt möglicherweise zu einer Verletzung der Volumenbilanz.

ser Formulierung ergibt sich eine Rekursionsformel nach Gl. III.89 für jeden Abschnitt (bzw. Teilsystem). Ihre numerische Umsetzung entspricht einer Arbeitsgleichung nach Gl. III.90. In KMROUT wird das numerische Umsetzungs-Schema Nr.3 benutzt (vgl. III.4.5.2), so daß sich die Koeffizienten A,B,C der Arbeitsgleichung aus der Tabelle III.6 ermitteln lassen. Für das gesamte System ergibt sich eine lineare Rekursions-Matrix, auf deren Basis der Systemzustand zur Zeit $t+\Delta t$ aus dem Zustand zur Zeit t und dem Oberflächenzufluß zum Kanal zwischen t und $t+\Delta t$ errechnet wird.

Einstau und Überstau werden in KMROUT zur Zeit nicht modelltechnisch berücksichtigt. Daher wird der Wellentransport bei Einstau/Überstau durch den gleichen Algorithmus wie bei Teilfüllung ermittelt. Der Parameter k , wenn veränderlich, erhält bei Einstau/Überstau den gleichen Wert wie bei Vollfüllung ($k=k_{\text{voll}}$).

Der Berechnungszeitschritt ist frei wählbar.

1.5 Das Programm EXTRAN

EXTRAN wurde ursprünglich in den USA als Teil des Programmpaketes "Storm Water Management Model" (SWMM) vom "Environmental Protection Agency" (EPA, 1971) entwickelt. Der Transportbaustein wurde am Institut für Wasserwirtschaft der Universität Hannover übernommen und weiter entwickelt (Fuchs, 1987; Verworn, 1990).

EXTRAN ist ein hydrodynamisches detailliertes Modell zur Simulation des Transports im Kanalnetz. Dementsprechend werden zur Berechnung des Netzverhaltens sowohl Abflüsse als auch Wasserstände berücksichtigt.

Im normalen Fall² wird das vollständige Saint-Venant-Differentialgleichungssystem nach dem modifizierten Euler-Verfahren

² Die Berechnung des Netzzustandes erfolgt, ohne das Saint-Venant-Differentialgleichungssystem in Betracht zu ziehen, in folgenden Fällen:

- an Sonderbauwerken (Pumpen, Wehre, Auslässe)

ren gelöst (vgl. III.3). Die Kontinuitätsgleichung wird dabei für die Schächte gelöst und die Bewegungsgleichung für die Haltungen.

Als infinitesimaler Kanalabschnitt (Δx) gilt eine Haltung. Der Berechnungszeitschritt Δt ist frei wählbar.

2. Ziele, Vorgehensweise und Randbedingungen der praktischen Untersuchung

2.1 Allgemeine Randbedingungen

In Teil III wurden durch eine theoretische Betrachtung die möglichen Ursachen der Modellunsicherheit aufgezählt und erläutert. Unsicherheiten entstehen entweder durch die mathematisch vereinfachte Formulierung der tatsächlichen Zusammenhänge oder durch das numerische Verfahren zur Lösung der entsprechenden Gleichungen. Zudem wurde schon versucht, eine Aussage über die relative Wichtung der einzelnen Unsicherheiten zu treffen. Dafür wurden entweder Untersuchungsergebnisse aus der Literatur herangezogen oder die zu betrachtenden Gleichungen direkt untersucht.

In Teil IV werden Simulationsergebnisse mit 5 gewählten Modellen (HYSTEM, HYSRAD, KOSIM, KMROUT, EXTRAN) dargestellt und diskutiert. Diese Modelle vertreten jeweils den Ansatz, auf dem sie beruhen.

Alle verwendeten Kanalnetzdaten wurden aus "Urban Drainage Catchment" (UDC) (Maksimovic-Radojkovic, 1986) entnommen.

Hierbei handelt es sich um eine weltweite Sammlung von zwanzig Kanalnetzen mit detaillierten Niederschlag-Abfluß Messungen. Zum Vergleich zwischen den verschiedenen Modellierungskonfigurationen (relativer Vergleich) oder zwischen den

- wenn besondere hydraulische Zustände in der betrachteten Haltung herrschen (z.B. die Haltung fällt trocken)

In beiden Fällen wird angenommen, daß ein (quasi-)stationärer Zustand herrscht; z.B. werden Wehrformeln herangezogen, die aus der Bernouilli Energiegleichung im stationären Zustand abgeleitet werden können. Normalabfluß (bzw. Grenzabfluß) wird beim Trockenfallen eines Rohres angenommen.

Simulations- und Meß-Ergebnissen (absoluter Vergleich) werden hauptsächlich die Abflußganglinien aus dem Kanal herangezogen.

Zur Quantifizierung der Deviationen zweier Ganglinien werden folgende 7 Größe berechnet: DEVS, DEVM, STAN, VOL, DY, DS, Z (Fuchs, 1989; Grotehusmann, 1991; Paulsen, 1986).

1. Deviation DEVS (%):

Die Deviation DEVS bezieht sich auf den maximalen Wert der Bezugskurve und berechnet sich nach folgender Gleichung (Zior, 1987):

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

mit

- i : der Zeitpunkt $i \cdot \Delta t$ - es wird angenommen, daß die Ordinaten-Werte der zu vergleichenden Kurven zu den gleichen Zeitpunkten angegeben werden -
- n : Anzahl der Meß- (bzw. Berechnungs-) punkte
- Y_1 : Ordinaten-Werte der Bezugskurve (bzw. gemessene Abflußwerte) (m^3/s)
- Y_{\max} : maximaler Ordinaten-Wert der entsprechenden Kurve (bzw. Spitzenabflußwert) (m^3/s)
- Y_2 : Ordinaten-Werte der zu vergleichenden Kurve (bzw. berechnete Abflußwerte) (m^3/s)

Diese Formel berücksichtigt Abweichungen in Nähe des Maximalwertes besonders stark. Große Auswirkung hat ebenfalls eine Zeitverschiebung von Ganglinien gleicher Form, da gerade dann im Bereich der Ganglinienspitze eine große Differenz zwischen Y_{1i} und Y_{2i} auftritt. Bei völliger Übereinstimmung der Kurven ergibt sich die Deviation-DEVS zu Null ($\text{DEVS} = 0$).

2. Deviation DEVM (%)

Ritscher (1971) schlägt vor, die Deviation DEVS auf den Mittelwert der Bezugskurve zu beziehen;

$$(Gl. 2) \text{ DEVM} = \text{DEVS} \cdot \frac{Y_{1\max}}{Y_{1m}}$$

Y_{1m} ist der Mittelwert der Bezugskurve (bzw. der gemessenen Abflußganglinie) (m^3/s); $Y_{1m} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Y_{1i}$.

DEVS und DEVM sind also um den Faktor $\frac{Y_{1\max}}{Y_{1m}} > 1$ verschieden.

Deviation STAN (-):

STAN ist die modifizierte Standardabweichung nach Maniak (1973) und wird wie folgt berechnet:

$$(Gl. 3) \text{ STAN} = \frac{R_0^2 - R^2}{R_0^2}$$

mit

- R_0^2 : Varianz³ der Bezugsganglinie (bzw. der gemessenen Abflußganglinie);
- R^2 : Mittelwert der quadratischen Abweichung der Ordinaten zwischen den zu vergleichenden Ganglinien.

Bei völliger Übereinstimmung der beiden Kurven wird STAN zu 1. Abweichungen ergeben Werte < 1 , die gegebenenfalls negativ sein können.

³ $R_0^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{1i} - Y_{1m})^2$ und $R^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{1i} - Y_{2i})^2$

Volumenvergleich VOL (%)

Die Volumenbilanz zweier Abflußganglinien wird durch die Prüfgröße VOL ausgedrückt;

$$(Gl. 4) \quad VOL = 100 \cdot \frac{V_2 - V_1}{V_1}$$

V_1 : Integralfläche⁴ unterhalb der Bezugsganglinie (bzw. der gemessenen Abflußganglinie)

V_2 : Integralfläche unterhalb der zweiten Ganglinie (bzw. der berechneten Ganglinie)

Zur quantitativen Beurteilung der Prüfgrößen sind folgende Wertebereiche bekannt (Maniak, 1973; Ritscher, 1971; Schultz, 1968; Zior, 1987):

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

Tab. 1: Bewertung der Prüfgrößen DEVS, DEVM, STAN, VOL

Deviation DY (%)

DY stellt die relative Differenz zwischen den Spitzenwerten (bzw. zwischen gemessenen und berechneten Abflußganglinien) dar:

$$(Gl. 5) \quad DY = \frac{Y_{2max} - Y_{1max}}{Y_{1max}}$$

⁴ Da die betrachteten Ganglinien Abflußganglinien sind, entsprechen die jeweiligen Integralflächen dem aus dem System über die Betrachtungsdauer abgeflossenen Gesamtvolumen (m³).

Deviation DS (%)

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

$$(Gl. 6) \quad DS = \frac{S_2 - S_1}{S_1}$$

S_1 : zeitlicher Schwerpunkt der Bezugsganglinie (bzw. gemessenen Ganglinie) (min)

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

Deviation Zi (in Promille)

$$(Gl. 7) \quad Z = 1000 \cdot \frac{\sqrt[3]{\sum_{i=1}^n Y_{1i} \cdot (Y_{1i} - Y_{2i})^2}}{n \cdot Y_{1max}}$$

Die Optimierungsmethode nach dem Newtonverfahren, die von Paulsen (1986) zur Anpassung des Ansatzes der Speicherkaskade (Ermittlung der n und k Parameter) an die Meßergebnisse entwickelt wurde, verwendet die Größe Z (bzw. den Ausdruck $\sum_{i=1}^n Y_{1i} \cdot (Y_{1i} - Y_{2i})^2$) als Optimierungskriterium.

2.2 Ziele der Untersuchung**2.2.1. Abflußbildung**

Es werden ausschließlich Ansätze zur Berechnung des abflußwirksamen Niederschlags aus den undurchlässigen Flächen untersucht. Dementsprechend werden für diese Untersuchung die durchlässigen Flächen in den entsprechenden Simulationen ganz außer Acht gelassen ($A_{ges} = A_{und}$).

Dieses wird dadurch begründet, daß für die meisten Ereignisse in der Stadthydrologie (in unseren Breiten) die Zuflüsse aus den durchlässigen Flächen gegenüber denen aus den undurchlässigen Flächen nur einen Bruchteil ausmachen. Auf der einen Seite sind die Niederschlagsverluste bei den durchlässigen Flächen viel höher (höhere Mulden- und Versickerungsverluste), auf der anderen Seite ist der Anschließungsgrad dieser Flächen an das Entwässerungssystem kleiner (und schwieriger abzuschätzen).

Der Verlauf des abflußwirksamen Niederschlags und der Verlauf der entsprechenden Abflußganglinien aus dem System wird für die betrachteten Ansätze berechnet und verglichen.

2.2.2. Wellen-Bewegung

Es werden Abflußganglinien am Auslaß der jeweiligen Kanalisation ermittelt, wobei verschiedene Kombinationen (globale/detaillierte und hydrologische/ hydrodynamische Simulation) zur Berechnung des Transports im Kanal herangezogen werden.

Im ersten Schritt werden Simulationsergebnisse direkt mit den gemessenen Daten verglichen. Dabei werden Simulationen mit Standardparametern denen mit kalibrierten Parametern gegenübergestellt.

Im weiteren Verlauf der Untersuchung werden die verschiedenen Modelle untereinander verglichen. Ziel dieser Teiluntersuchung ist es, ob und inwieweit globale hydrologische Modelle zur Simulation des Transports geeignet sind. Bezugsmodell ist das Modell HYSTEM-EXTRAN (hydrologisch-hydrodynamisch und detailliert) mit seinem Standardparametersatz (zur Berechnung der Abflußbildung und Konzentration).

2.3 Beschreibung der UDC-Entwässerungssysteme

2.3.1 Auflistung (bzw. Numerierung) 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 | UDMCH011.NET | FRIEDACKER, ZÜRICH, SWITZERLAND |
| 6 | UDMDK01.NET | MUNKERIS PARKEN, LINGBY, DENMARK |
| 7 | UDMFR01.NET | LIVRY GARGAN, SEINE-SAINT-DENIS, FRANCE |
| 8 | UDMGB01.NET | CLIFTON GROVE, NOTTINGHAM, GREAT-BRITAIN |
| 9 | UDMGB02.NET | ST. MARKS ROAD, DERBY, GREAT-BRITAIN |
| 10 | UDMHU01.NET | MISCOLC, MISCOLC CITY, HUNGARY |
| 11 | UDMIT01.NET | LUZZI, PROVINCE OF COSENCA, ITALY |
| 12 | UDMNO01.NET | VIKA, OSLO, NORWAY |
| 13 | UDMSE01.NET | PORSOEBERG, LULEA, SWEDEN |
| 14 | UDMSE02.NET | KLOSTERGARDEN, LUND, SWEDEN |
| 15 | UDMUS01.NET | POMPAND BEACH, BROWARD COUNTY, FLORIDA, USA |
| 16 | UDMUS02.NET | SAMPLE ROAD, BROWARD COUNTY, FLORIDA, USA |
| 17 | UDMUS03.NET | FORT LAUDERDALE, BROWARD COUNTY, FLORIDA |
| 18 | UDMUS04.NET | KINGS CREEK, DADE COUNTY, FLORIDA, USA |
| 19 | UDMUS05.NET | GRAY HEAVEN, BALTIMORE, MARYLAND, USA |
| 20 | UDMYU01.NET | MILJAKOVAC, BELGRADE, YUGOSLAVIA |

Bemerkungen:

1. Die 2 Kanalnetzdateien FRIEDACKER, ZÜRICH, SCHWEIZ unterscheiden sich lediglich in der Neigungsklasse

- UDMCH01.NET Neigungsklasse 1
- UDMCH011.NET Neigungsklasse 2

2. Eine graphische Darstellung jedes Netzes befindet sich in Anlage 1

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

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

| UDC-Netz (-) | t_p (min) | L_{tm} (m) | V_g (%) | L_{t10} (m) | B (m) | F_p (-) |
|-----------------|----------------|-----------------|--------------|------------------|----------|--------------|
| 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

mit:

B: charakteristische Breite des Gebietes bezogen auf die undurchlässige Fläche (A_{und}/L_u) (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 (%)

2.3.2 Wichtige Kenndaten der UDC-Kanalnetze

In den Tabellen 2 bis 4 sind die Werte der wichtigsten Kenndaten und Charakteristiken der einzelnen Netze aufgelistet.

In Tabelle 2 sind Absolutwerte angegeben;

- Das größte Kanalnetz UDMFR01.NET (Frankreich) enthält 181 Haltungen, die eine gesamte undurchlässige Fläche von 82,4 ha entwässern.
- Das kleinste Kanalnetz UDMUS01.NET (USA) enthält 12 Haltungen, die eine gesamte undurchlässige Fläche von 1,0 ha entwässern.
- Der mittlere Wert der an das Kanalnetz angeschlossenen undurchlässigen Flächen über alle Entwässerungssysteme (außer den 3 größten UDMAU01, UDMCA02, UDMFR01) beträgt 5 ha ($\sigma=2,3 \text{ ha}^5$). Die mittlere Anzahl der Haltungen über alle Entwässerungssysteme (außer den 3 größten) beträgt 35 ($\sigma=27$).
- In Tabelle 3 sind für die einzelnen Netze die mittleren Werte der wichtigsten Kenndaten ersichtlich. Genauere statistische Angaben (bzw. Verteilungsfunktionen) sind für die einzelnen Entwässerungssysteme aus Anlage 2 zu entnehmen.

- Tabelle 4 stellt einen ersten Versuch dar, die Geometrie der einzelnen Systeme, sowie ihr Transportverhalten vereinfacht zu charakterisieren. Zur Berechnung der (als konstant angenommenen) Fließzeiten in den jeweiligen Haltungen sind folgende Fließverhältnisse zugrunde gelegt:

- Normalabfluß (Berechnung nach Manning-Strickler vgl. Gl. III.44)
- Vollfüllung

Die berechneten Fließzeiten liegen zwischen 1 (UDMITO1, UDMUS05) und 16 Minuten (UDMFR01). Da die mittleren

⁵ σ : Standardabweichung

Fließgeschwindigkeiten in einer bestimmten Haltung niedriger als diejenigen bei Vollfüllung sind, bilden letztere die untere Grenze.

Aus dieser Tabelle wird zudem ersichtlich, daß alle untersuchten Netze eine reine Baumstruktur aufweisen (d.h. der Vermaschungsgrad ist in allen Fällen Null).

2.4 Die verwendeten Regenbelastungen

Die gewählten Regenbelastungen werden dahingehend unterschieden, ob es sich um einen Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Daten handelt oder um einen Vergleich von berechneten Daten aus unterschiedlichen Ansätzen.

Im ersten Fall handelt es sich um Naturereignisse, die im Buch von Maksimovic-Radojkovic beschrieben werden.

Im zweiten Fall werden (insgesamt) 5 künstliche Regen betrachtet:

- Blockregen 1: (9mm/30 min)
- Blockregen 2: (12mm/30 min)
- Blockregen 3: (15mm/30 min)
- Modellregen⁶ Nr.1; nach Euler Typ 2, Dauer=30 min, Höhe=12,9mm
- Modellregen Nr.2; nach Euler Typ 3, Dauer=30 min, Höhe=12,9mm

Nach einer statistischen Untersuchung der Station Westerholt in Nordrhein-Westfalen (KBZ 2006) haben beispielsweise die Modellregen folgende Wiederkehrzeiten (T):

- Blockregen 1: T = 5,6 Monate (schwaches Ereignis)
- Blockregen 2: T = 10,5 Monate (mittleres Ereignis)
- Blockregen 3: T = 1,6 Jahre (starkes Ereignis)
- Modellregen : T = 1 Jahr

⁶ Beide Modellregen nach Euler beruhen auf einer statistischen Analyse der Regendaten der Regenstation Westerholt (KBZ 2006).

Naturereignisse sowie Modellregen sind in Anlage 3 zusammengestellt.

Wichtige Bemerkung:

In allen durchgeführten Simulationen wurde angenommen, daß die Niederschlagsintensitäten jeweils konstant über dem gesamten Einzugsgebiet sind. Eine Untersuchung des Einflusses der räumlichen Niederschlagsvariabilität ist für diese Kanäle deswegen nicht möglich, weil eine differenzierte Aufzeichnung der Regenintensität fehlt. Die angeschlossenen Gebietsflächen sind allerdings so klein, daß dieser Faktor kaum eine Rolle spielen sollte (vgl. Teil II).

3. Untersuchung der Abflußbildung

3.1 Ergebnisse der Simulationen

Vier Ansätze zur Berechnung der Muldenverluste in den undurchlässigen Flächen (GWM2, GWM1, PROM, KONM) werden im folgenden am Beispiel der UDC-Netze verglichen. Dies erfolgt jeweils in zwei Etappen:

- 1) Durch den direkten Vergleich der berechneten abflußwirksamen Niederschlagsintensitäten⁷ für ausgewählte Regenbelastungen.
- 2) Durch den Vergleich der entsprechenden berechneten Abflußganglinien für einige beispielhafte Einzugsgebiete.

3.1.1 Vergleich der Grenzwertmethoden GWM1, GWM2

Der abflußwirksame Niederschlag wurde nach Grenzwertmethode 1 (GWM1) und Grenzwertmethode 2 (GWM2) für 4 unterschiedliche Regenbelastungen (3 Blockregen und Modellregen Nr.1) berechnet.

- Grenzwertmethode 1 (GWM1) beruht auf Gl. III.1 (vgl. III.1.2) und ist im Modell HYSRAD (vgl. IV.1.2) implementiert
- Grenzwertmethode 2 (GWM2) beruht auf Gl. III.2 und ist im Modell HYSTEM implementiert

In Abbildung 1 sind die resultierenden Niederschläge gegenübergestellt.

Entsprechende Oberflächenabflußganglinien wurden für ein künstliches Entwässerungssystem (TEST.NET) berechnet.

- TEST.NET enthält nur eine Haltung und die Einzugsgebietsfläche beträgt 1 ha (100% undurchlässig) -

Die Deviationen zwischen den Abflußganglinien GWM1/GWM2 sind in Tab.5 angegeben.

⁷ Den Abflußbildungsparametern werden jeweils bei der Berechnung der abflußwirksamen Niederschlagsintensitäten die Standardwerte zugewiesen.

Vergleich zwischen Abflußbildungsansätzen
Hysrad(GWM1)----Hystem(GWM2)

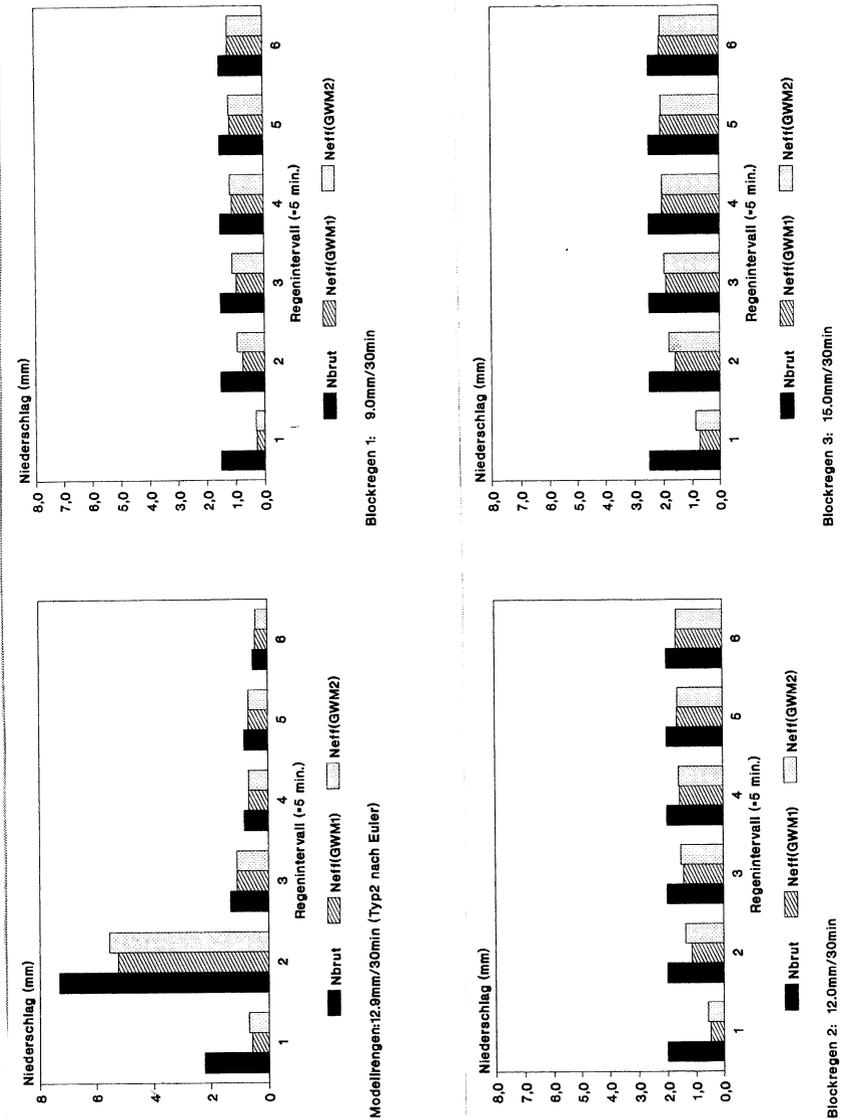


Abb. 1: Gegenüberstellung der resultierenden Niederschläge

| Regen | DEVS (%) | DEVM (%) | V ₁ (m ³) | VOL (%) | Z | YMAX ₁ (m ³ /s) | DY (%) | S ₁ (min) | DS (%) |
|---------|-------------|-------------|-------------------------------------|------------|------|--|-----------|-------------------------|-----------|
| block1 | 4.33 | 10.61 | 54.00 | 8.45 | 8.08 | .04 | 1.96 | 22.99 | -1.86 |
| block2 | 2.77 | 6.49 | 79.20 | 5.39 | 6.56 | .05 | -.29 | 22.54 | -1.82 |
| block3 | 2.20 | 4.99 | 104.40 | 3.69 | 5.64 | .07 | -1.07 | 22.20 | -1.62 |
| modreg1 | 1.30 | 5.50 | 86.40 | 4.50 | 4.58 | .11 | 5.44 | 15.92 | -.91 |

Tab.5 : Deviationen zwischen den Oberflächenabflußganglinien nach GWM1-HYSRAD und nach GWM2-HYSTEM; Netz: TEST.NET, 4 Regenbelastungen

Die entsprechenden Gegenüberstellungen der Abflußganglinien befinden sich in Anlage 4.

Die Deviationen DEVS und DEVM liegen für drei Regenbelastungen im Bereich "sehr gut". Einzig bei Blockregen 1 (die schwächste Belastung) liegt die Deviation DEVS nur im Bereich "gut". Dabei entsprechen die Blockregen dem ungünstigeren Fall.

Ein Unterschied bei der Ermittlung der gesamten Verluste wird jedoch festgestellt, obwohl die nominalen Werte der Verlustparameter B_V , M_V , A_O , A_e in beiden Simulationsfällen gleich sind. Dies ist auf die unterschiedlichen Formulierungen des Verlaufs des Abflußbeiwertes (nach Gl. III.1 in GWM1 und nach Gl. III.2 in GWM2) zurückzuführen.

Eine systematische Überschätzung der Verluste bei HYSRAD bzw. Gl. III.1 gegenüber HYSTEM bzw. Gl. III.2 wird festgestellt. Die relative Volumendifferenz VOL beträgt im ungünstigsten Fall der schwachen Regenbelastung mehr als 8%. Bei mittleren Belastungen (block2, modreg1) geht die Diskrepanz auf 5% zurück. Bei starken Ereignissen wird sie kleiner.

Bei Blockregen stimmen die zeitlichen Schwerpunkte sowie die Abflußspitzen weitgehend überein. Bei Modellregen 1 allerdings ergibt sich bei HYSTEM eine Überschätzung des Spitzenabflusses von mehr als 5% gegenüber HYSRAD.

3.1.2 Vergleich zwischen drei Abflußbildungsansätzen; GWM2, PROM und KONM

Für alle weiteren Simulationen bleibt die Höhe der gesamten Verluste gleich. Sie wurde aufgrund der Berechnung der Abflußbildung mit GWM2 (Standardwerte) ermittelt. Der Unterschied mit PROM (bzw. KONM) liegt einzig in der zeitlichen Verteilung der Verluste.

- Die Prozentmethode (PROM) zur Ermittlung der Muldenverluste während eines Ereignisses ist in III.1.2 erläutert.
- Bei der Methode der konstanten Verluste (KONM) werden die Verluste gleichmäßig über das gesamte Ereignis verteilt.

Eine erste Untersuchung wurde mit dem Modellregen Nr.2 für die Kanalnetze UDMCA01, UDMCA02 und UDMIT01 durchgeführt. In Abbildung 2 sind die abflußwirksamen Niederschlagsintensitäten aufgeführt.

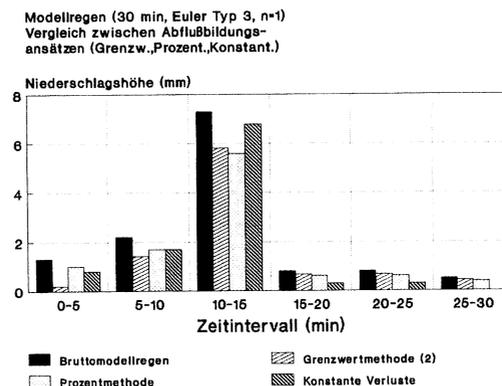


Abbildung 2: Darstellung der abflußwirksamen Niederschlagsintensitäten nach GWM2, PROM, KONM; Modellregen 2.

Die Deviationen zwischen den berechneten Abflußganglinien nach GWM2 [1], PROM [2] und KONM [3] sind in den folgenden Tabellen aufgezeigt.

| Vergl. | DEVS | DEVM | V ₁ | VOL | Z | YMAX ₁ | DY | S ₁ | DS |
|---------|------|-------|-------------------|------|------|---------------------|-------|----------------|-------|
| | (%) | (%) | (m ³) | (%) | | (m ³ /s) | (%) | (min) | (%) |
| [1]-[2] | .33 | 3.89 | 735.6 | -.10 | 1.18 | .79 | -.73 | 24.86 | -1.64 |
| [1]-[3] | 1.36 | 15.84 | 735.6 | -.07 | 2.84 | .79 | 14.52 | 24.86 | -6.40 |

Tab.6: Kanalnetz UDMCA01; Vergleich zwischen den Abflußganglinien nach GWM2 /PROM /KONM ; Modellregen 2

| Vergl. | DEVS | DEVM | V ₁ | VOL | Z | YMAX ₁ | DY | S ₁ | DS |
|---------|------|-------|-------------------|-----|------|---------------------|-------|----------------|-------|
| | (%) | (%) | (m ³) | (%) | | (m ³ /s) | (%) | (min) | (%) |
| [1]-[2] | 1.12 | 9.00 | 6201.6 | .66 | 2.25 | 4.59 | -9.55 | 32.13 | 3.85 |
| [1]-[3] | 1.81 | 14.58 | 6201.6 | .83 | 3.07 | 4.59 | 12.64 | 32.13 | -5.23 |

Tab.7: Kanalnetz UDMCA02; Vergleich zwischen den Abflußganglinien nach GWM2 /PROM /KONM ; Modellregen 2

| Vergl. | DEVS | DEVM | V ₁ | VOL | Z | YMAX ₁ | DY | S ₁ | DS |
|---------|------|-------|-------------------|------|------|---------------------|-------|----------------|-------|
| | (%) | (%) | (m ³) | (%) | | (m ³ /s) | (%) | (min) | (%) |
| [1]-[2] | .12 | 2.11 | 133.2 | .01 | .64 | .22 | -1.63 | 16.34 | -.96 |
| [1]-[3] | .65 | 11.78 | 133.2 | -.01 | 2.02 | .22 | 11.32 | 16.34 | -5.24 |

Tab.8: Kanalnetz UDMIT01; Vergleich zwischen den Abflußganglinien nach GWM2 / PROM / KONM ; Modellregen 2

Entsprechende Darstellungen der Abflußganglinien sind der Anlage 5 zu entnehmen.

Für eine mittlere Regenbelastung (Modreg2) liegen die Deviationen DEVS und DEVM zwischen GWM2 und PROM in den drei untersuchten Netzen (CA01, CA02, IT01) im Bereich der sehr guten Übereinstimmung.

Zwischen GWM2 und KONM wird auch in zwei Fällen eine sehr gute Übereinstimmung erreicht (Im Netz CA01 liegt DEVM nur im Bereich der guten Übereinstimmung). Die entsprechenden DEVS- und DEVM-Werte liegen aber deutlich höher als im ersten Fall. Dieser Trend wird deutlicher bei der Ermittlung der Parameter DY und DS. Dabei wird nach KONM eine Überschätzung der Spitzenabflüsse von mehr als 10% und eine Unterschätzung der

zeitlichen Schwerpunkte der Abflußganglinie von mehr als 5% gegenüber GWM2 festgestellt.

Wegen dieser relativen Schwäche der Methode KONM werden für die folgende systematische Vergleichsuntersuchung (über alle 20 UDC-Entwässerungssysteme) nur die Abflußbildungsansätze GWM2 und PROM behalten.

Es werden jeweils zwei Konfigurationen des Entwässerungssystems betrachtet. In der einen wird die detaillierte Beschreibung des Kanals, wie sie in der Datenbank vorliegt (Kanalbezeichnung: UDM_XXX), in der anderen eine vereinfachte Beschreibung des Kanals (Kanalbezeichnung: SIM_XXX) verwendet. Das vereinfachte Netz enthält eine einzige Haltung, deren Gebietscharakteristiken denen des gesamten Einzugsgebiets äquivalent sind. Insbesondere wurde der Wert der Schwerpunktlaufzeit t_L zur Berechnung der Abflußkonzentration im vereinfachten Netz so ermittelt, daß die Abweichungen gegenüber den Simulationen mit dem detaillierten Netz minimiert sind (vgl. III.4.4.1 und IV.4.2).

Bemerkung:

Im Unterschied zu der Voruntersuchung wird Modellregen 1 verwendet.

Die Deviationswerte zwischen den Abflußganglinien nach GWM2 (1) und PROM (2) sind den folgenden Tabellen zu entnehmen.

| Netz | DEVS | DEVM | V ₁ | VOL | Z | YMAX ₁ | DY | S ₁ | DS |
|----------|------|------|----------------|------|------|---------------------|-------|----------------|-------|
| | (%) | (%) | (m3) | (%) | | (m ³ /s) | (%) | (min) | (%) |
| AU01 | 1.05 | 5.19 | 1933.20 | -.42 | 3.79 | 1.31 | 1.22 | 30.18 | -2.79 |
| CA01 | .83 | 6.00 | 733.80 | -.02 | 3.77 | .72 | -.56 | 22.97 | -2.52 |
| CA02 | .98 | 4.79 | 6177.60 | .01 | 3.69 | 4.15 | .89 | 29.87 | -2.14 |
| CH01 | .68 | 5.91 | 606.60 | -.20 | 3.73 | .72 | -.14 | 19.09 | -2.89 |
| DK01 | .61 | 5.26 | 187.20 | .06 | 3.79 | .22 | -.91 | 20.87 | -2.85 |
| FR01 | .70 | 3.51 | 7353.60 | .04 | 2.44 | 3.37 | .15 | 42.30 | -1.39 |
| GB01 | .62 | 4.72 | 392.40 | -.21 | 3.51 | .41 | .00 | 18.93 | -2.95 |
| GB02 | 1.01 | 4.76 | 455.40 | .05 | 3.67 | .29 | 2.04 | 28.25 | -2.06 |
| HU01 | .97 | 4.79 | 364.20 | -.03 | 3.74 | .25 | 2.44 | 25.56 | -2.63 |
| IT01 | .26 | 3.12 | 133.20 | -.09 | 2.08 | .22 | -2.28 | 13.60 | -2.14 |
| NO01 | .59 | 4.78 | 864.60 | .15 | 3.42 | .96 | .73 | 19.44 | -3.14 |
| SE01 | .76 | 5.80 | 466.20 | .15 | 3.75 | .49 | .82 | 19.33 | -3.35 |
| SE02 | .77 | 4.38 | 639.60 | -.21 | 3.45 | .50 | .40 | 22.63 | -2.38 |
| US01 | .91 | 5.09 | 87.60 | .41 | 3.68 | .07 | 1.49 | 24.18 | -2.32 |
| US02 | 1.03 | 5.20 | 382.20 | -.13 | 3.80 | .26 | 2.28 | 30.28 | -2.23 |
| US03 | .98 | 6.76 | 733.80 | .07 | 4.18 | .69 | 2.17 | 22.18 | -3.04 |
| US04 | .86 | 5.07 | 378.00 | .10 | 3.85 | .31 | 2.95 | 23.96 | -2.80 |
| US05 | .74 | 5.29 | 348.00 | .03 | 3.54 | .34 | -.59 | 20.67 | -2.69 |
| YU01 | .57 | 4.86 | 452.40 | .11 | 3.38 | .52 | .57 | 19.60 | -2.73 |
| μ | .78 | 5.01 | | | | | 0.72 | | -2.58 |
| σ | .20 | 0.80 | | | | | 1.29 | | 0.45 |

Tab.9: Systematische Untersuchung: Deviationen zwischen den Abflußganglinien nach GWM2 [1] und PROM [2]; Originalnetze, Modellregen 1

In Anlage 6 finden sich die entsprechenden Gegenüberstellungen.

| Netz | DEVS | DEVM | V ₁ | VOL | Z | YMAX ₁ | DY | S ₁ | DS |
|----------|------|------|----------------|-----|------|---------------------|-------|----------------|-------|
| | (%) | (%) | (m3) | (%) | | (m ³ /s) | (%) | (min) | (%) |
| AU01 | 1.06 | 4.03 | 1989.60 | .01 | 2.59 | 1.25 | 1.17 | 27.03 | -2.35 |
| CA01 | 1.21 | 5.11 | 714.60 | .01 | 4.20 | .85 | .14 | 16.14 | -3.94 |
| CA02 | 1.06 | 4.03 | 6157.80 | .01 | 2.59 | 3.87 | 1.17 | 27.03 | -2.35 |
| CH01 | 1.22 | 5.07 | 597.00 | .01 | 4.06 | .66 | .08 | 17.17 | -3.70 |
| DK01 | 1.21 | 5.15 | 181.20 | .01 | 4.26 | .22 | .01 | 15.98 | -3.98 |
| FR01 | .88 | 3.33 | 7449.60 | .01 | 1.85 | 3.43 | .90 | 35.82 | -1.77 |
| GB01 | 1.23 | 5.19 | 388.80 | .01 | 4.12 | .45 | -.14 | 16.85 | -3.77 |
| GB02 | 1.07 | 4.11 | 461.40 | .01 | 2.72 | .31 | 1.22 | 25.65 | -2.48 |
| HU01 | 1.13 | 4.44 | 361.80 | .01 | 3.10 | .28 | .89 | 22.68 | -2.80 |
| IT01 | 1.32 | 5.96 | 117.60 | .01 | 4.97 | .18 | -1.20 | 13.73 | -4.63 |
| NO01 | 1.20 | 5.01 | 858.60 | .01 | 3.94 | .93 | .26 | 17.44 | -3.65 |
| SE01 | 1.20 | 4.91 | 470.40 | .01 | 3.88 | .49 | .47 | 17.83 | -3.57 |
| SE02 | 1.16 | 4.62 | 633.00 | .01 | 3.47 | .57 | .90 | 19.99 | -3.18 |
| US01 | 1.15 | 4.52 | 90.60 | .01 | 3.28 | .07 | .92 | 21.39 | -2.97 |
| US02 | 1.07 | 4.13 | 388.80 | .01 | 2.72 | .26 | 1.20 | 25.51 | -2.49 |
| US03 | 1.21 | 5.08 | 733.20 | .01 | 4.20 | .87 | .21 | 16.25 | -3.91 |
| US04 | 1.14 | 4.47 | 379.80 | .01 | 3.24 | .31 | 1.00 | 21.65 | -2.94 |
| US05 | 1.17 | 4.69 | 379.80 | .01 | 3.51 | .35 | .78 | 19.67 | -3.23 |
| YU01 | 1.23 | 5.23 | 443.40 | .01 | 4.33 | .55 | -.14 | 15.81 | -4.02 |
| μ | 1.15 | 4.69 | | | | | 0.52 | | -3.25 |
| σ | 0.09 | 0.59 | | | | | 0.62 | | 0.73 |

Tab.10: Systematische Untersuchung: Deviationen zwischen den Abflußganglinien nach GWM2 [1] und PROM [2]; vereinfachte Netze, Modellregen 1

- Anlage 7 zeigt die entsprechenden Gegenüberstellungen.
- Eine graphische Gegenüberstellung der wichtigsten Ergebnisse aus den Tabellen 9 und 10 befindet sich in den Abbildungen 3a, 3b, 3c, 3d.

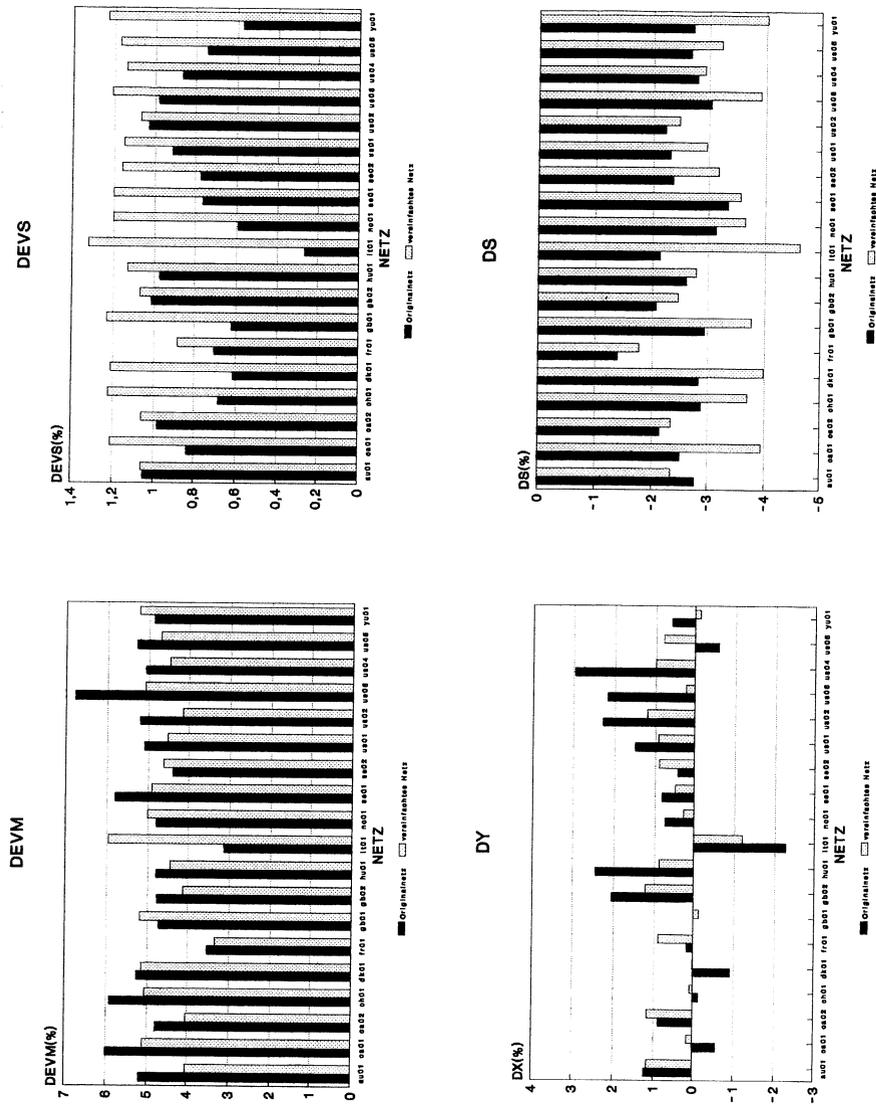


Abb. 3a-d: Gegenüberstellung der wichtigsten Ergebnisse (DEVM, DEVS, DY und DS) Simulation mit Modellregen 1; 19 UDC-Netze

Eine letzte Untersuchung wurde über 4 UDC-Kanalnetze mit Blockregen 1 durchgeführt (Tab. 11).

| Netz | DEVS (%) | DEVM (%) | V ₁ (m ³) | VOL (%) | Z | YMAX ₁ (m ³ /s) | DY (%) | S ₁ (min) | DS (%) |
|------|----------|----------|----------------------------------|---------|------|---------------------------------------|--------|----------------------|--------|
| AU01 | 2.16 | 9.41 | 1246.80 | -0.25 | 5.80 | 0.74 | -4.72 | 39.26 | -3.29 |
| FR01 | 1.28 | 6.19 | 4736.40 | 0.13 | 3.48 | 2.10 | -2.91 | 52.67 | -2.01 |
| GB01 | 2.78 | 13.49 | 258.00 | 0.00 | 7.22 | 0.17 | -9.36 | 26.28 | -4.42 |
| IT01 | 1.74 | 7.99 | 88.80 | -0.94 | 5.04 | 0.06 | -3.57 | 20.38 | -2.24 |

Tab.11 Deviationen zwischen den Abflußganglinien nach GWM2 [1] und PROM [2]; Originalnetze, Blockregen 1

Die entsprechenden Gegenüberstellungen sind Anlage 8 zu entnehmen.

Für eine mittlere Regenbelastung (Modreg1) liegen die Deviationen DEVS und DEVM zwischen GWM2 und PROM für alle Netze im Bereich "sehr gut".

Für die Simulationen mit detaillierter Netzbeschreibung ist in allen 19 Netzen DEVS niedriger als DEVS mit vereinfachter Netzbeschreibung.

Im Gegensatz dazu ist der mittlere Wert von DEVM für die Simulationen mit detaillierter Netzbeschreibung höher. In 14 UDC-Netzen ist DEVM mit Originalnetz höher als DEVM mit vereinfachtem Netz.

Die Streuung der Deviationswerte DEVS und DEVM ist bei detaillierter Simulation deutlich höher als bei Simulation mit vereinfachtem Netz.

Die Spitzenabflüsse nach GWM2 und PRON stimmen in allen Fällen sehr gut überein (-2,5 % < DY < 2,5 % für die Simulationen mit Originalnetzen und -1,2 % < DY < 1,2 % für die Simulationen mit vereinfachten Netzen).

Die zeitlichen Schwerpunkte sind in PROM systematisch unterschätzt (-3 % < DS < -1,4 % für die Simulationen mit Originalnetzen und -4,6 % < DS < -1,77% für die Simulationen mit vereinfachten Netzen).

Gegenüber den anderen Parametern ist die Streuung der Werte in der vereinfachten Netzbeschreibung größer als in der detaillierten Netzbeschreibung.

3.2 Schlußfolgerungen

1. Für die gewählten Regenbelastungen spielt die unterschiedliche Verteilung der Verluste nach GWM2, PROM oder KONM keine wichtige Rolle. Folgendes ist weiterhin festzustellen:

- KONM weist gegenüber den anderen Verlustverteilungen deutliche Abweichungen insbesondere bei der Ermittlung der Spitzenabflüsse (10% Überschätzung) auf.
- PROM und KONM bewirken im Vergleich zu GWM2 eine systematische Reduzierung der Schwerpunktlaufzeit.

2. Es ist mitentscheidend, ob die Netzbeschreibung detailliert oder grob ist, insbesondere bei der Streuung der Deviationswerte.

Bei DEVS, DEVM, DY ist die Streuung der Werte über alle UDC-Netze größer, wenn eine detaillierte Netzbeschreibung verwendet wird. Im Gegensatz dazu ist die Streuung der Deviationswerte DS über alle UDC-Netze bei der groben Netzbeschreibung ausgeprägter.

3. Bei den Blockregen ist die Auswirkung einer unterschiedlichen Verlustverteilung größer als bei den Modellregen.

4. Die zwischen GWM1 und GWM2 relativ großen Werte der Deviationen (im Vergleich zu den Deviationen GWM2/PROM/KOM) sind darauf zurückzuführen, daß die Volumenbilanz in diesem Fall nicht übereinstimmt.

Dies unterstreicht wiederum die Wichtigkeit einer guten Abschätzung der gesamten Verlusthöhe. Wenn keine weiteren Daten vorliegen, stellt sicherlich die Grenzwertmethode den besseren Weg dar, weil der Verlauf des Abflußbeiwerts realistischer ist. Allerdings sollte bei der Angabe der Modellparameter auf die mathematische Formulierung des Ansatzes geachtet werden.

4. Abfluvvorgänge an der Oberfläche und im Kanal; die Ergebnisse

4.1 Untersuchung mit einem hydrodynamischen Transport-Modell

4.1.1 Kalibrierung des Modells durch detaillierte Simulationen

Für 3 UDC-Netze - CA01, CA02, IT01 - wird der Vergleich zwischen Meßdaten und Berechnungsergebnissen mit HYSTEM-EXTRAN durchgeführt. Mehrere Ereignisse werden herangezogen, damit eine Kalibrierung bestimmter Modellparameter jeweils erfolgt (Zinn, 1990).

Diese Kalibrierung betrifft ausschließlich 5 HYSTEM-Modellparameter zur Berechnung der Abflußbildung - V_b , V_m , ψ_o , ψ_e - (vgl. III.1.2) und -konzentration - α_u - (vgl. III.4.3.4) für die undurchlässigen Flächen.

Bei dieser Vorgehensweise erfolgt weder eine Kalibrierung der Abflußbildung (bzw. -konzentration) der durchlässigen Flächen noch eine Kalibrierung der Transportvorgänge im Kanal (bzw. der Modellparameter des Modells EXTRAN). Für diese Modellparameter werden Standardwerte festgelegt.

Streng genommen ist der einzige Modellparameter von EXTRAN die äquivalente Rauigkeit k (mm). In diesem Transportmodell (wie in den meisten anderen hydrodynamischen Transportmodellen der Stadthydrologie) wird in jeder Haltung der kontinuierliche Reibungsverlust nach dem Ansatz von Darcy-Weisbach (Gl. III.45) berücksichtigt. Der entsprechende Reibungsbeiwert λ (-) wird nach der Formel von Colebrook-White (Gl. III.46) aus k (mm) und der Reynoldszahl Re (-) berechnet.

Es werden jedoch im Gegensatz zu anderen Modellen z.B. MOUSE keine örtlich konzentrierten Verluste (z.B. Umlenkverluste, Verzweigungsverluste, Querschnittsänderungsverluste) in Betracht gezogen. Diese müssen dementsprechend in die Einschätzung von k (durch Erhöhung des Wertes) pauschal eingeschlossen werden. Berechnungsergebnisse haben

allerdings gezeigt, daß die resultierenden Ganglinien auf k relativ unempfindlich⁸ reagieren.

Im Fall einer unzumutbaren Diskrepanz zwischen Meß- und Simulationsdaten sollten statt einer Kalibrierung von k vielmehr die theoretischen Voraussetzungen der Anwendbarkeit des Modells überprüft werden. Eine Modifizierung der Kanalnetzbeschreibung (z.B. die künstliche Unterteilung einer langen Haltung in mehrere kleinere oder das künstliche zusammenfügen von mehreren kleinen Haltungen) kann dabei durchaus gerechtfertigt sein. Dies ist ein zusätzlicher Beleg dafür, daß eine konsequente Trennung zwischen hydrologisch-hydrodynamischen und morphometrisch-strukturellen Parametern kaum möglich ist (siehe Teil I).

Tabelle 12⁹ faßt die wichtigsten Ergebnisse zusammen, ihre graphischen Darstellungen sind Anlage 9 zu entnehmen.

⁸ Damit eine Auswirkung spürbar wird, müssen möglicherweise Werte von k eingesetzt werden, die sich außerhalb des in der Literatur angegebenen Wertebereiches befinden.

⁹ $A_o = \psi_o$ $A_e = \psi_e$ (vgl. III.1.2)

| UDM - NETZ | REGEN (CODE) | REGEN-HÖHE [mm] | REGEN-DAUER [min] | VORREGEN-EREIGNIS | B _v [mm] | M _v [mm] | A _o [%] | A _e [%] | α _u [min] | DEVS [%] | DEVM [%] | STAN [-] |
|------------|--------------|-----------------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|----------------------|----------|----------|----------|
| UDMCA01 | R02 | 9,14 | 126 | ja | 0,00 | 0,00 | 25 | 100 | 6,00 | 0,85 | 14,02 | 0,91 |
| UDMCA01 | R16 | 5,84 | 17 | k. Angabe | 0,00 | 0,00 | 25 | 96 | 6,00 | 1,58 | 15,98 | 0,95 |
| UDMCA01 | R23 | 4,57 | 56 | k. Angabe | 0,00 | 0,00 | 25 | 93 | 9,00 | 4,84 | 30,70 | 0,76 |
| UDMCA02 | R09 | 5,58 | 20 | k. Angabe | 0,50 | 1,80 | 25 | 100 | 6,00 | 3,49 | 25,48 | 0,93 |
| UDMUS03 | R05 | 22,13 | 152 | k. Angabe | 0,00 | 0,00 | 25 | 97 | 11,00 | 1,99 | 13,48 | 0,95 |
| UDMIT01 | R13 | 1,40 | 15 | k. Angabe | 0,00 | 0,00 | 25 | 78 | 11,00 | 1,00 | 3,83 | 0,99 |
| UDMIT01 | R20 | 3,60 | 35 | ja | 0,00 | 0,00 | 25 | 95 | 11,00 | 1,58 | 10,67 | 0,98 |
| UDMIT01 | R29 | 10,20 | 40 | k. Angabe | 0,70 | 1,80 | 25 | 85 | 17,00 | 2,98 | 11,43 | 0,96 |

Tab.12: Hydrodynamische detaillierte Simulation mit Naturereignissen; Ergebnisse der Kalibrierung der Modellparameter (B_v, M_v, A_o, A_e, α_u) (vgl. Zinn, 1990)

Die Anpassung der Simulationsergebnisse an die Meßdaten sind nach Tab. 1 bewertet und ergeben sich zu:

| Anpassung | Netz-Niederschlag |
|-------------------|---|
| sehr gut | CA01-R02, US03-R05, IT01-R13, IT01-R20, IT01-R29. |
| gut bis sehr gut | CA01-R16 |
| gut | CA02-R09 |
| brauchbar bis gut | CA01-R23. |

Tab 13: Bewertung der Simulationsergebnisse mit HYSTEM-EXTRAN nach Kalibrierung der Abflußbildung und -konzentration; 3 UDC-Netze, Naturereignisse

In 5 der 8 Simulationen ergibt sich ein Wert von $\psi_e > 0,95$. Sofern während eines einzelnen Ereignisses die Verdunstung vernachlässigt werden kann, charakterisiert ψ_e den Anschließungsgrad der angegebenen Gebietsfläche. Dieser scheint, aufgrund der vorliegenden Daten, in allen UDC-Netzen sehr hoch zu sein. Gleichzeitig ergeben sich in 6 der 8 Simulationen Nullwerte für die Benetzungs- und Muldenverluste ($V_b = 0$, $V_m = 0$).

| UDC-Netz | CA01 | | | CA02 | IT01 | | |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Niederschlag | R16 | R02 | R23 | R09 | R13 | R20 | R29 |
| V ₀ (m ³) | 451 | 737 | 341 | 2723 | 14,5 | 45,1 | 103 |
| V ₁ (m ³) | 442 | 729 | 334 | 2440 | 14,3 | 44,8 | 101 |
| V ₀ /V ₁ (-) | 1,02 | 1,01 | 1,02 | 1,11 | 1,01 | 1,00 | 1,02 |

Tab.14: Volumenfehler des Modells HYSTEM-EXTRAN nach Kalibrierung der Abflußbildung und -konzentration; 3 UDC-Netze, Naturereignisse

V₀ : Volumen der gemessenen Ganglinie
 V₁ : Volumen der nach Kalibrierung berechneten Ganglinie

4.1.2 Vergleich der Simulationsergebnisse mit kalibrierten und Standardparametern

Die berechneten Abweichungen sind Tab. 15 zu entnehmen.
Die entsprechenden Gegenüberstellungen befinden sich in Anlage 10.

Daß die Werte der Verluste in den UDC-Netzen so niedrig sind, steht im Widerspruch zu anderen in der Literatur zitierten Werten (vgl. III.1). Man könnte sie durch das Vorhandensein eines Vorereignisses erklären (Ist es wahrscheinlich, daß für alle aufgenommenen N-A-Ereignisse ein Vorereignis stattgefunden hat?).

Tabelle 15: Vergleich zwischen HYSTEM-EXTRAN-Simulationen mit kalibrierten (1) und Standardparametern (2); 3 UDC-Netze, Naturereignisse

| Ereignis | DEVS (%) | DEVN (%) | STAN (-) | V ₁ (m ³) | VOL (%) | Z | YMAX ₁ (m ³ /s) | DY (%) | S ₁ (min) | DS (%) |
|----------|----------|----------|----------|----------------------------------|---------|-------|---------------------------------------|--------|----------------------|--------|
| CA01-023 | 15.74 | 70.00 | .21 | 334.20 | -50.83 | 20.92 | .17 | -63.37 | .59 | 34.18 |
| CA01-002 | 4.73 | 43.65 | .55 | 727.86 | -37.41 | 6.28 | .57 | -42.88 | 127.74 | 15.24 |
| CA01-016 | 12.00 | 85.71 | .24 | 443.71 | -45.31 | 18.02 | .63 | -63.84 | 44.10 | 18.52 |
| CA02-009 | 8.80 | 52.18 | .68 | 2435.43 | -23.12 | 11.12 | 2.01 | -41.50 | .57 | 20.71 |
| IT01-013 | 34.32 | 109.46 | -.26 | 14.22 | -70.04 | 46.46 | .02 | -66.67 | .16 | 45.70 |
| IT01-020 | 9.42 | 53.28 | .46 | 44.82 | -40.56 | 17.94 | .06 | -51.56 | .23 | 28.46 |
| IT01-029 | 5.60 | 17.78 | .95 | 101.04 | .00 | 9.11 | .08 | 12.35 | .42 | -9.22 |
| μ | 12.9 | 61.7 | .40 | | -44.6 | | | -45.4 | | 21.9 |
| σ | 9.4 | 27.6 | .4 | | 14.2 | | | 25.4 | | 16.0 |

Auf jeden Fall ist es für die Beurteilung der Kalibrierungsergebnisse unabdingbar, daß die Randbedingungen der Daten-Akquisition schärfer beleuchtet werden. Wichtig dabei sind folgende Informationen:

- Informationen über die Meßbedingungen (z.B. Angabe über Unsicherheiten beim Messen der Niederschlagsintensitäten und Abflüsse, Auftreten von besonderen Schwierigkeiten bei der Aufnahme; Vorhandensein eines Vorregens)
- Informationen über die Vorgehensweise zur Aufnahme der Gebiets- und Kanalnetzdaten (z.B. Abgrenzung der Einzugsgebiete, Bestimmung der undurchlässigen Fläche, Bestimmung der angeschlossenen Fläche).

Diese Informationen sind teilweise dem Buch von Maksimovic zu entnehmen.

- Man erfährt z.B., daß bei starken Ereignissen die Niederschlagsintensitäten möglicherweise unterschätzt werden. Dies ist durch das Meßprinzip ("tipping bucket rainauges") bedingt und trifft insbesondere auf CA02 zu (siehe Anlage 9 und vgl. Teil II).
- Die Messung der Abflüsse ist auch mit Unsicherheiten behaftet. Es wurden z.B. in den drei Kanalnetzen CA01 (Auslaß = Wehr), CA02 (Auslaß = Wehr), IT01 eigentlich nur Wasserstände gemessen und die Durchflüsse durch theoretisch/empirische Q-h-Beziehungen ermittelt.
- Die undurchlässigen Flächen wurden in CA02 durch Kataster und Flugbilder ermittelt. Für die beiden anderen Einzugsgebieten liegen keine Angaben hierüber vor.

Aufgrund der Unvollständigkeit der Informationen ist es jedoch kaum möglich, die Ergebnisse der Kalibrierung (Diskrepanz zwischen kalibrierten Berechnungsergebnisse und Meßdaten sowie Werte der Modellparameter) eindeutig zuzuordnen.

4.2 Vergleich hydrodynamischer/hydrologischer Transport-Simulation (detaillierte Simulation)

4.2.1 Ergebnisse

Die Modelle HYSTEM-EXTRAN (hydrologisch-hydrodynamisch) und HYSTEM-KMROUT (hydrologisch-hydrologisch) werden verglichen.

Die erste Untersuchung bezieht sich auf die gleichen Netze und Naturereignisse¹⁰ wie in IV.4.1. Die kalibrierten Parameter von HYSTEM (Abflußbildung und Konzentration) werden ohne weiteres für die HYSTEM-KMROUT Simulationen übernommen. In Tabelle 16 sind die entsprechenden Deviationen¹¹ zusammengestellt.

| Ereignis | DEVS (%) | DEVM (%) | V ₁ (m ³) | VOL (%) | YMAX ₁ (m ³ /s) | DY (%) | S ₁ (min) | DS (%) |
|----------|----------|----------|----------------------------------|---------|---------------------------------------|--------|----------------------|--------|
| CA01-R02 | .78 | 7.24 | 729. | -4.89 | .57 | -1.45 | 98.24 | -3.31 |
| CA01-R16 | 1.39 | 9.96 | 442. | -7.05 | .63 | -4.23 | 14.60 | -12.69 |
| CA01-R23 | 2.34 | 10.42 | 334. | -2.20 | .17 | .03 | 35.08 | -12.12 |
| CA02-R09 | 3.62 | 22.34 | 2440. | -6.76 | 2.00 | 10.31 | 34.30 | -15.16 |
| DK01-R03 | 0.87 | 6.15 | | -4.67 | | -10.28 | | |
| DK01-R08 | 0.77 | 5.02 | | -5.48 | | -5.06 | | |
| GB01-R18 | 1.87 | 15.05 | | -8.52 | | -17.90 | | |
| IT01-R13 | 1.98 | 6.27 | 14.3 | -.37 | .02 | -2.84 | 9.99 | -7.11 |
| IT01-R20 | 1.14 | 6.43 | 44.8 | -1.40 | .06 | -4.77 | 13.97 | -1.98 |
| IT01-R29 | 1.00 | 3.19 | 101. | -.38 | .08 | -1.75 | 25.07 | -.17 |
| SE01-R06 | 1.28 | 5.00 | | -4.42 | | 0.58 | | |
| SE01-R05 | 0.30 | 1.71 | | -1.49 | | -1.24 | | |

Tabelle 16: Deviationen der Abflußganglinien HYSTEM-EXTRAN (1) und HYSTEM-KMROUT (2); 5 UDC-Netze, Naturereignisse

Die entsprechenden Gegenüberstellungen der Abflußganglinien sind in Anlage 9 gezeigt.

¹⁰ Die Naturereignisse sind durch den Suffix -Ri gekennzeichnet. Die Nummerierung der Ereignisse ist kanalnetzbezogen und dem Buch von Maksimovic entnommen.

¹¹ Die Ergebnisse der Simulationen mit den Kanalnetzen DK01 und SE01 sind Grothmann (1991) entnommen.

Bemerkung:

In dieser Untersuchung sind keinerlei Überlastungen der Netze aufgetreten. Lediglich für CA02-R09 hat EXTRAN einen Einstau von 5 Minuten Dauer prognostiziert. Für DK01 und SE01 liegen keine Angaben vor.

Weitere Untersuchungen sind mit den Blockregen durchgeführt worden. Da es sich hauptsächlich um den Vergleich zwischen EXTRAN und KMROUT handelt, sind für die Simulationen vereinfachend die Standardparameter angesetzt worden.

Tabelle 17 zeigt für jeden Blockregen und jedes Kanalnetz folgende abflußspezifische Daten:

- $\frac{Vol_{ges}}{Vol_{und}}$; Vol_{ges} : gesamtes Abflußvolumen (m³) am Systemauslaß, Vol_{und} : Abflußvolumen (m³) der undurchlässigen Flächen
- die Schwerpunktszeiten der entsprechenden Abflußganglinien (min)
- die prozentualen Anteile der einstauenden (bzw. überstauenden) Schächte (%)

Tab. 17: Abflußspezifische Werte der UDC-Kanalnetze (berechnet für die drei Blockregen)

| UDC-Netze | Abfluß der Teilflächen | | | | | | Abflußverhältnis Vol_{ges}/Vol_{und} | | | | | | Schwerpunktszeit | | | Ein-/Überstau in % der Schächte | | |
|-----------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--|------|---------------|------|---------------|------|------------------|----------------|----------------|---------------------------------|----|----|
| | Volblockreg1 | | Volblockreg2 | | Volblockreg3 | | Blockregen R1 | | Blockregen R2 | | Blockregen R3 | | t_{p1} [min] | t_{p2} [min] | t_{p3} [min] | R1 | R2 | R3 |
| | A_{und} [m ³] | A_{durch} [m ³] | A_{und} [m ³] | A_{durch} [m ³] | A_{und} [m ³] | A_{durch} [m ³] | [-] | [-] | [-] | [-] | [-] | [-] | | | | | | |
| AU01 | 1293,7 | 0 | 1834,2 | 631,8 | 2381,5 | 2073,4 | 1 | 1,34 | 1,87 | 37,9 | 44,9 | 48,2 | 2 | 4 | 17 | | | |
| CA01 | 478,5 | 0 | 675,9 | 201,6 | 875,5 | 661,6 | 1 | 1,30 | 1,76 | 29,0 | 32,2 | 33,7 | | | | | | |
| CA02 | 4035,6 | 0 | 5710,9 | 1154,0 | 7405,6 | 3787,1 | 1 | 1,20 | 1,51 | 36,9 | 41,1 | 44,1 | 2 | 4 | | | | |
| CH01 | 386,9 | 0 | 548,6 | 78,1 | 712,3 | 256,4 | 1 | 1,14 | 1,36 | 26,1 | 28,1 | 29,8 | | | | | | |
| DK01 | 122,1 | 0 | 172,5 | 57,6 | 232,4 | 189,0 | 1 | 1,33 | 1,85 | 28,0 | 30,5 | 31,1 | 49 | | | | | |
| FR01 | 4864,1 | 0 | 6889,6 | 2249,4 | 8939,1 | 7381,1 | 1 | 1,33 | 1,83 | 48,8 | 52,5 | 58,9 | 13 | 22 | 44 | | | |
| GB01 | 258,0 | 0 | 363,8 | 83,8 | 470,5 | 273,2 | 1 | 1,23 | 1,58 | 25,6 | 27,9 | 29,8 | 5 | 67 | | | | |
| GB02 | 298,3 | 0 | 423,0 | 69,0 | 549,2 | 262,4 | 1 | 1,16 | 1,41 | 34,7 | 36,1 | 38,3 | 15 | 39 | 80 | | | |
| HU01 | 238,7 | 0 | 337,1 | 279,6 | 436,4 | 917,4 | 1 | 1,83 | 3,10 | 32,2 | 37,2 | 37,3 | | | | | | |
| IT01 | 89,0 | 0 | 122,8 | 1,6 | 156,6 | 5,3 | 1 | 1,01 | 1,03 | 20,2 | 19,7 | 19,5 | | | | | | |
| NO01 | 564,6 | 0 | 798,0 | 4,5 | 1033,9 | 147,7 | 1 | 1,01 | 1,01 | 26,3 | 25,6 | 25,2 | | | | | | |
| SE01 | 302,0 | 0 | 428,2 | 107,3 | 555,9 | 352,0 | 1 | 1,25 | 1,63 | 26,1 | 29,5 | 32,0 | 3 | 24 | | | | |
| SE02 | 419,6 | 0 | 593,1 | 93,9 | 768,4 | 306,2 | 1 | 1,16 | 1,40 | 28,7 | 30,2 | 33,2 | 2 | 45 | 76 | | | |
| US01 | 57,0 | 0 | 80,8 | 204,9 | 104,9 | 669,7 | 1 | 3,54 | 7,38 | 30,9 | 75,8 | 80,5 | | | | | | |
| US02 | 250,0 | 0 | 354,5 | 245,9 | 460,3 | 806,8 | 1 | 1,69 | 2,75 | 35,9 | 48,7 | 51,7 | | | | | | |
| US03 | 476,3 | 0 | 675,3 | 2,3 | 876,9 | 7,6 | 1 | 1,00 | 1,01 | 29,3 | 28,4 | 27,7 | 27 | 54 | | | | |
| US04 | 246,5 | 0 | 349,5 | 23,3 | 459,8 | 76,3 | 1 | 1,07 | 1,17 | 30,9 | 31,1 | 32,1 | | | | | | |
| US05 | 251,4 | 0 | 355,2 | 68,7 | 460,1 | 225,6 | 1 | 1,19 | 1,49 | 27,8 | 29,7 | 30,8 | | | | | | |
| YU01 | 295,8 | 0 | 416,5 | 271,2 | 583,3 | 890,1 | 1 | 1,65 | 2,65 | 26,4 | 31,0 | 32,2 | | | | | | |

In den Tabellen 18 bis 20 sind die Deviationen aufgeführt. Die entsprechenden Gegenüberstellungen befinden sich in Anlage 11.

| Netz | DEVS (%) | DEVM (%) | STAN (-) | V ₁ (m ³) | VOL (%) | Z | YMAX ₁ (m ³ /s) | DY (%) | S ₁ (min) | DS (%) |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------------------------------|------------|------|--|-----------|-------------------------|-----------|
| HU01 | 2.60 | 17.45 | 94 | 237.84 | -2.08 | 3.62 | .15 | 0.48 | 64.72 | 9.86 |
| US03 | 7.52 | 52.62 | .79 | 476.4 | -2.97 | 7.16 | .31 | -37.58 | 30.48 | 54.49 |

Tab. 18: Deviationen zwischen HYSTEM-EXTRAN und HYSTEM-KMROUT mit Blockregen 1 (9mm/30min)

| Netz | DEVS (%) | DEVM (%) | STAN (-) | V ₁ (m ³) | VOL (%) | Z | YMAX ₁ (m ³ /s) | DY (%) | S ₁ (min) | DS (%) |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------------------------------|------------|------|--|-----------|-------------------------|-----------|
| CA01 | 0.60 | 3.06 | 1.00 | | -2.51 | | | -0.14 | | -3.35 |
| DK01 | 0.47 | 3.16 | .99 | | -3.08 | | | -4.70 | | -2.76 |
| HU01 | 0.65 | 6.22 | .99 | 617.27 | -1.86 | 1.34 | .41 | -4.21 | 68.72 | -5.31 |
| IT01 | 0.47 | 1.61 | 1.00 | | -1.28 | | | -.16 | | -0.73 |
| NO01 | 0.35 | 2.06 | 1.00 | | -2.23 | | | -.48 | | -2.53 |
| SE01 | 0.33 | 1.61 | 1.00 | | -2.00 | | | -.59 | | -2.08 |
| US01 | 0.81 | 2.86 | 1.00 | | -1.56 | | | 0.05 | | 2.24 |
| US03 | 5.79 | 52.37 | .80 | 678.0 | -1.83 | 5.39 | .42 | -36.54 | 29.45 | 61.46 |

Tab. 19: Deviationen zwischen HYSTEM-EXTRAN und HYSTEM-KMROUT mit Blockregen 2 (12mm/30min)

| Netz | DEVS (%) | DEVM (%) | STAN (-) | V ₁ (m ³) | VOL (%) | Z | YMAX ₁ (m ³ /s) | DY (%) | S ₁ (min) | DS (%) |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------------------------------|------------|------|--|-----------|-------------------------|-----------|
| HU01 | 0.29 | 2.96 | 1.00 | 1354.2 | -1.26 | 0.84 | .96 | -1.01 | 67.87 | -2.77 |
| US02 | 0.47 | 2.90 | 1.00 | | -1.70 | | | -2.89 | | -1.79 |
| US03 | 5.84 | 52.95 | .79 | 885.0 | -1.51 | 5.46 | .55 | -37.69 | 28.66 | 65.86 |

Tab. 20: Deviationen zwischen HYSTEM-EXTRAN und HYSTEM-KMROUT mit Blockregen 3 (15mm/30min)

Die Deviationen zwischen HYSTEM-EXTRAN und HYSTEM-KMROUT liegen für alle Netze mit Ausnahme des Netzes US03 im Bereich "sehr gut".

Das Netz US03 weist viel größere Deviationswerte als die anderen Netze auf. Offensichtlich ist die hydrologische Modellierung in diesem Fall ungeeignet. Eine genauere Betrachtung der Kanalnetzbeschreibung (vgl. IV.2.3, Anlage 1 und 2) zeigt, daß eine Haltung des Netzes (Haltung 13) ein Sohlgefälle null aufweist, während die sonstigen angeschlossenen Haltungen ein Gefälle von mehreren Promille (bzw. 0,37% ; 0,2% ; 0,2%) aufweisen. KMROUT berechnet für Haltung 13 eine unrealistisch hohe Retentionskonstante k (min). Durch Änderung der Haltungscharakteristik können allerdings die Ergebnisse der hydrologischen Simulation deutlich verbessert werden (vgl. Tabelle 21; Anlage 11).

| | DEVS (%) | DEVM (%) | STAN (-) | V ₁ (m ³) | VOL (%) | Z | YMAX ₁ (m ³ /s) | DY (%) | S ₁ (min) | DS (%) |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------------------------------|------------|------|--|-----------|-------------------------|-----------|
| Blockreg1 | .37 | 2.58 | 1.00 | 476.4 | -1.77 | 1.13 | .31 | .04 | 30.48 | -5.76 |
| Blockreg2 | .24 | 2.13 | 1.00 | 678.0 | -1.56 | .73 | .42 | -.07 | 29.45 | -4.76 |
| Blockreg3 | .56 | 5.10 | 1.00 | 885.0 | -1.19 | 1.24 | .55 | -2.67 | 28.66 | -3.18 |

Tab. 21: Deviationen HYSTEM-EXTRAN und HYSTEM-KMROUT für Netz US03 nach Änderung¹² der Kanalnetzdaten

4.2.2 Schlußfolgerungen

Die hydrologische detaillierte Simulation der Transportvorgänge ergibt für alle Netze (mit Ausnahme von US03) eine sehr gute Übereinstimmung mit der hydrodynamischen detaillierten Simulation, ohne daß (Netz-)Daten dafür modifiziert werden müssen. Eine detailliertere Betrachtung läßt folgende weitere Erkenntnisse zu:

¹² Die modifizierte Kanalbeschreibung US03* unterscheidet sich von der ursprünglichen US03 in einer um 1 cm veränderten Sohlhöhe der Haltung 13. Das neue Sohlgefälle beträgt 0,019%.

1. Die Übereinstimmung ist optimal, wenn die Transportkapazität im Netz weitgehend ausgenutzt wird, ohne sie jedoch zu erschöpfen¹³ (vgl. HU01).
2. Die Deviationen (DEVs, DEVM, VOL, DY, DS) sind in der Regel bei Naturereignissen größer als bei Blockregen.
3. Man stellt eine systematische Unterschätzung der Abflussvolumina bei KMROUT gegenüber EXTRAN fest, obwohl die Oberflächenzuflussvolumina in beiden Fällen gleich sind (In KMROUT geht Wasser beim Transport verloren!). Bei Naturereignissen ist die relative Abweichung deutlich höher als bei Blockregen und beträgt in dem ungünstigsten Fall mehr als 8%.

In jedem einzelnen Fall besteht die Notwendigkeit einer Überprüfung des hydrologischen Ansatzes auf seine theoretischen Einschränkungen (vgl. IV.1 und III.4). Dies trifft insbesondere in zwei Fällen zu:

- 1. Wenn das Haltungsgefälle sehr klein ist, wobei die Dynamik in einer Haltung nicht einzig vom entsprechenden Sohlgefälle abhängt (vgl. Netz US03).
- 2. Wenn die zeitliche Variabilität des Niederschlags hoch ist, wobei es erhebliche Schwankungen der Durchflußraten in den Haltungen geben kann (vgl. Naturereignisse).

¹³ Außer dem Netze US03 wurde von den Modellregen kein Netz überlastet.

4.3 Untersuchung der vereinfachten hydrologischen Simulation

4.3.1 Einführung

Es werden in dieser Untersuchung verschiedene vereinfachte hydrologische Simulationen durchgeführt und jeweils mit einer hydrologisch-hydrodynamischen detaillierten Simulation (HYSTEM-EXTRAN) verglichen.

Die Vereinfachung bezieht sich in diesem Abschnitt auf eine Vergrößerung der Kanalnetzbeschreibung. In der vereinfachten Simulation wird das gesamte Entwässerungssystem (angeschlossene Teileinzugsgebiete + Kanalnetz) als eine Einheit ("lumped" system = Grobnetz) betrachtet (vgl. III.4.4.1). Praktisch bedeutet dies, daß das Entwässerungssystem durch eine einzige Haltung beschrieben wird, deren Charakteristiken einem repräsentativen (bzw. mittleren) Systemverhalten (vgl. IV.2.3.2) entsprechen:

- Die Berechnung der Zuflußmenge (m^3) erfolgt einfach durch Angabe der entsprechenden gesamten undurchlässigen (bzw. durchlässigen) Flächen des Einzugsgebiets, wenn die Verlustparameter einen mittleren (bzw. konstanten) Wert über das Gebiet erhalten.
- Die Konzentration an der Gebietsoberfläche sowie der Transport im Kanal sind durch die Vereinfachung in demselben Schritt erfaßt. Die Schwierigkeit dabei liegt in der Ermittlung von äquivalenten Modellparametern.

Die untersuchten hydrologischen Ansätze sind folgende:

1. Ansatz der Einheitsganglinie (vgl. III.4.1, III.4.3.1), der in HYSTEM bzw. HYSRAD (vgl. IV.1.2, IV.1.3) implementiert ist.
2. Ansatz der linearen Speicherkaskade (vgl. III.4.2, III.4.3.2), der in KOSIM (vgl. IV.1.3) implementiert ist.
3. In der dritten Untersuchung erfolgt die Simulation der Konzentration-Transport-Vorgänge durch Anwendung einer Übertragungsfunktion (UH-Funktion), die sich aus der Ver-

teilung der Fließzeiten im Kanal bis zum Auslaß (gewichtet durch die undurchlässigen Flächen) ergibt.

Wichtige Randbedingung der Simulation:

Simulationen, für die das Bezugsmodell EXTRAN herangezogen worden ist, werden mit seinen Standardparametern durchgeführt.

4.3.2 Vereinfachte Simulation mit HYSTEM (Rahlf, 1989)

Das gesamte 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 Feinnetzes bis zum Gebietsauslaß.

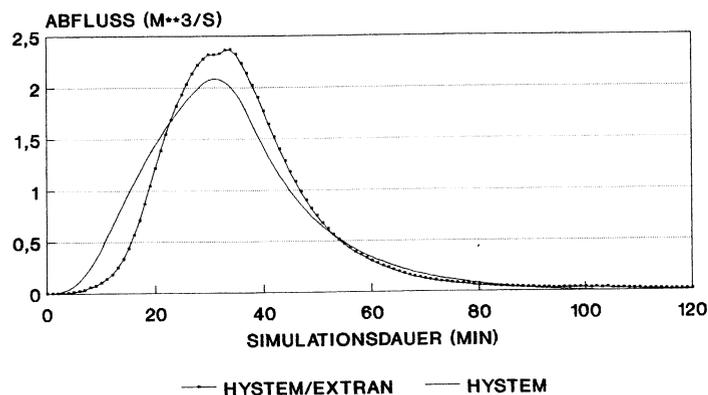
Einziges gebietsbezogener Modellparameter der Konzentration in HYSTEM ist die Schwerpunktlaufzeit t_L (min). Sie wird durch eine Regressionsformel in Abhängigkeit der Gebietscharakteristik ermittelt. Es gilt:

- für die undurchlässigen Flächen¹⁴ Gleichung III.75,
- für die durchlässigen Flächen Gleichung III.76.

Hierdurch wird eine getrennte Kalibrierung des Modellparameters für durchlässige und undurchlässige Flächen möglich. Zur Kalibrierung des Modells werden die drei Blockregen herangezogen (vgl. Tab. 17).

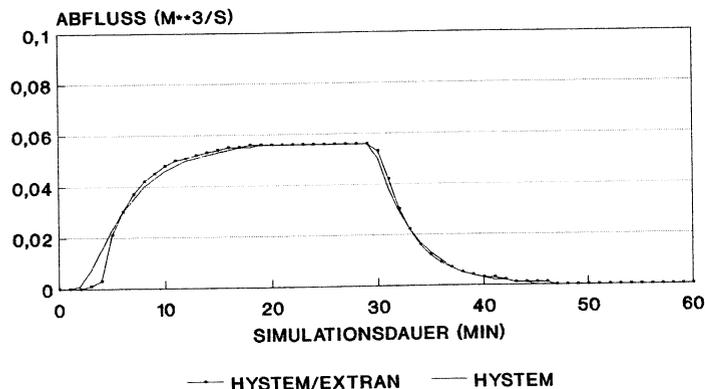
¹⁴ Für größere (undurchlässige) Einzugsgebiete liefert Gl.III.75 nach letzten Erkenntnissen zu kleine Werte für die Schwerpunktlaufzeit. Dadurch wird der Filter-Effekt des Gebietes nicht ausreichend berücksichtigt. In HYSRAD gilt Gl. III.75 nur, wenn die Einzugsgebietsfläche kleiner als 0,25 ha ist. Für größere Flächen (A_E) gilt folgende Regressionsformel:

$$(Gl.1) \quad t_L = \alpha_u + 7,33 \cdot A_E^{0,306} - 6,0 - 3 \cdot \frac{L}{l_f}$$



DEVIATION DEVS = 4.49

Abb. 4: Gegenüberstellung der Abflußganglinien nach HYSTEM-EXTRAN und HYSTEM allein; Netz CA02, Blockregen 1.



DEVIATION DEVS = 1.35

Abb. 5: Gegenüberstellung der Abflußganglinien nach HYSTEM-EXTRAN und HYSTEM allein; Netz IT01, Blockregen 1.

Mit Hilfe des Blockregens 1 wird durch Variation der Fließzeitkonstante α_u (min) die Schwerpunktlaufzeit der undurchlässigen Flächen ermittelt. Anhand der Blockregen 2 und 3 und der Variation der Rauigkeit k_{st} ergibt sich die Schwerpunktlaufzeit der durchlässigen Flächen.

Die Ergebnisse dieses Kalibrierungsprozesses sind in Tabelle 22 zusammengefaßt.

Anmerkungen zu Tab. 22:

1. Der Standardwert (keine Berücksichtigung des Transports) von α_u ist auf 11 min gesetzt. Bis auf das italienische Kanalnetz IT01 sind die kalibrierten Werte von α_u logischerweise größer, weil der Transport im Kanal mitberücksichtigt wird. IT01 bildet eine Ausnahme, weil der Kanal und die angeschlossenen Flächen (und damit die entsprechenden Schwerpunktlaufzeiten) sehr klein sind (Tab. 2 bis Tab. 4).

- im Kalibrierungsfall [1] wird DEVS minimiert
- im Fall [2] wird DY minimiert
- im Fall [3] wird DS minimiert

2. Der Standardwert von k_{st} liegt bei $4 \cdot \frac{1}{m_3/s}$.

Zur Veranschaulichung der Ergebnisse der α_u -Kalibrierung werden die zwei Abflußganglinien dargestellt (Abb. 4 und Abb. 5). Es handelt sich um die Simulation CA02-Blockregen1 (DEVS=4,49) und um die Simulation IT01-Blockregen1 (DEVS=1,35).

| UDM-NETZ | Blockregen 1 | | | Blockregen 2 | | | Blockregen 3 | | | | | |
|----------|--------------|----------------|----------------|----------------|------|--------------|--------------|--------------|------|--------------|--------------|--------------|
| | DEVS | α_u [1] | α_u [2] | α_u [3] | DEVS | k_{st} [1] | k_{st} [2] | k_{st} [3] | DEVS | k_{st} [1] | k_{st} [2] | k_{st} [3] |
| AU01 | 3 | 21 | 16 | 25 | 2 | 15 | 21 | 8 | 2 | 15 | 14 | 11 |
| CA01 | / | / | / | / | 2 | 12 | 12 | 7 | 1 | 12 | 14 | 9 |
| CA02 | 4 | 20 | k.Ü. | 23 | 2 | 55 | 58 | 12 | 1 | 35 | 32 | 19 |
| CH01 | 2 | 12 | 12 | k.Ü. | / | k.Min. | k.Ü. | k.Ü. | 1 | 23 | 27 | 18 |
| DK01 | 3 | 12 | 9 | 15 | 2 | 8 | 10 | 4 | 2 | 8 | k.Ü. | 6 |
| FR01 | 4 | 29 | 24 | k.Ü. | 2 | 30 | 37 | 12 | 2 | 20 | k.Ü. | k.Ü. |
| GB01 | 3 | 12 | 11 | k.Ü. | 2 | 12 | 12 | 5 | 2 | 7 | 6 | 6 |
| GB02 | 3 | 21 | 17 | 23 | / | k.Min. | k.Ü. | 8 | / | k.Min. | 16 | 9 |
| HU01 | 2 | 18 | 12 | 20 | 1 | 15 | 14 | 12 | <1 | 17 | 17 | 16 |
| IT01 | 1 | 10 | 10 | 10 | / | k.Min. | 6 | 5 | / | k.Min. | 8 | 5 |
| NO01 | 2 | 12 | 10 | 13 | / | k.Min. | k.Ü. | k.Ü. | / | k.Min. | k.Ü. | 6 |
| SE01 | 2 | 13 | 11 | k.Ü. | / | k.Min. | k.Ü. | k.Ü. | / | k.Min. | k.Ü. | k.Ü. |
| SE02 | 2 | 15 | 13 | 17 | / | k.Min. | k.Ü. | k.Ü. | / | k.Min. | 10 | 10 |
| US01 | 2 | 18 | 15 | 19 | 2 | k.Min. | k.Ü. | k.Ü. | / | k.Min. | k.Ü. | k.Ü. |
| US02 | 4 | 21 | k.Ü. | 24 | 2 | 8 | 10 | k.Ü. | 1 | 9 | 9 | 8 |
| US03 | / | k.Min. | 13 | k.Ü. | / | k.Min. | k.Ü. | k.Ü. | / | k.Min. | k.Ü. | k.Ü. |
| US04 | 2 | 17 | 15 | 20 | / | k.Min. | k.Ü. | 2 | / | k.Min. | 12 | 5 |
| US05 | 2 | 15 | 14 | 17 | 2 | 9 | 10 | 4 | 1 | 8 | 14 | 11 |
| YU01 | / | / | / | / | / | k.Min. | / | 7 | / | k.Min. | / | 10 |

Tab. 22: Vereinfachte hydrologische Simulation mit der Einheitsganglinie; Ergebnisse der Kalibrierung der Modellparameter α_u und k_{st} (3 Blockregen); (k.Min. : Minimum von DEVS wurde nicht erreicht; k.Ü. : keine Übereinstimmung)

Eine systematische Untersuchung ist anhand von Modellregen 1 durchgeführt worden, wobei nur die undurchlässigen Flächen Berücksichtigung ($A_{und} = A_{ges}$) finden, damit keine Verzerrung der Ergebnisse durch den Einfluß der durchlässigen Flächen erfolgen kann. Die Deviationen zwischen der hydrologisch-hydrodynamischen und der kalibrierten (α_u -Werte nach Tab. 22) hydrologischen Simulation sind in Tabelle 23 aufgeführt.

| Netz | DEVS (%) | DEVM (%) | STAN (-) | V_1 (m ³) | VOL (%) | Z | $YMAX_1$ (m ³ /s) | DY (%) | S_1 (min) | DS (%) |
|-----------|----------|----------|----------|-------------------------|---------|-------|------------------------------|--------|-------------|--------|
| AU01 | 4.73 | 23.46 | .88 | 1933.20 | 2.87 | 11.00 | 1.31 | -4.43 | 30.18 | -10.42 |
| CA01 | 6.34 | 45.53 | .44 | 733.80 | -2.84 | 14.44 | .72 | 18.74 | 22.97 | -29.65 |
| CA02 | 5.14 | 25.25 | .88 | 6177.60 | -.35 | 11.03 | 4.15 | -6.60 | 29.87 | -9.49 |
| CH01 | 1.89 | 16.42 | .94 | 606.60 | -1.51 | 7.11 | .72 | -10.07 | 19.09 | -10.04 |
| DK01 | 4.09 | 35.05 | .63 | 187.20 | -3.51 | 11.59 | .22 | .66 | 20.87 | -23.34 |
| IT01 | 1.47 | 17.62 | .97 | 133.20 | -11.67 | 6.74 | .22 | -19.50 | 13.60 | .99 |
| FR01 | 4.58 | 22.93 | .84 | 7353.60 | 1.29 | 8.30 | 3.37 | 1.38 | 42.30 | -15.31 |
| GB01 | 3.96 | 30.11 | .89 | 392.40 | -.92 | 10.97 | .41 | 6.21 | 18.93 | -11.02 |
| GB02 | 3.73 | 17.64 | .94 | 455.40 | 1.33 | 9.01 | .29 | 3.92 | 28.25 | -9.19 |
| HU01 | 2.84 | 14.01 | .97 | 364.20 | -.82 | 7.44 | .25 | 14.20 | 25.56 | -11.23 |
| NO01 | 2.07 | 16.79 | .93 | 864.60 | -.68 | 7.36 | .96 | -4.90 | 19.44 | -10.31 |
| SE01 | 2.99 | 22.83 | .92 | 466.20 | .94 | 9.14 | .49 | -.27 | 19.33 | -7.77 |
| SE02 | 4.09 | 23.26 | .92 | 639.60 | -1.11 | 9.91 | .50 | 14.14 | 22.63 | -11.60 |
| US01 | 3.94 | 22.11 | .90 | 87.60 | 3.53 | 10.53 | .07 | 10.91 | 24.18 | -11.56 |
| US02 | 5.47 | 27.55 | .80 | 382.20 | 1.76 | 12.16 | .26 | -1.44 | 30.28 | -15.75 |
| US03 | 5.46 | 37.55 | .61 | 733.80 | -.36 | 13.57 | .69 | 25.82 | 22.18 | -26.68 |
| US04 | 2.66 | 15.70 | .95 | 378.00 | .46 | 7.93 | .31 | .69 | 23.96 | -9.65 |
| US05 | 1.43 | 10.22 | .96 | 348.00 | 9.03 | 6.18 | .34 | 2.55 | 20.67 | -4.81 |
| YU01 | 3.55 | 30.15 | .79 | 452.40 | -2.25 | 10.49 | .52 | 4.91 | 19.60 | -19.26 |
| \bar{n} | 3.71 | 23.90 | .85 | | | | | 3.00 | | -12.95 |
| \bar{q} | 1.38 | 8.62 | .14 | | | | | 10.33 | | 7.20 |

Tab. 23: Deviationen zwischen den Abflußganglinien nach HYSTEM-EXTRAN und nach HYSTEM (kalibriert); alle UDC-Netze, Modellregen Nr.1

Die entsprechenden graphischen Gegenüberstellungen der Abflußganglinien befinden sich in Anlage 12.

4.3.3 Vereinfachte Simulation mit der linearen Speicher-Kaskade (Modell KOSIM)

Wie im Abschnitt 4.3.2 ist das Ziel der Untersuchung, die globale hydrologische Simulation eines Entwässerungssystems mit der detaillierten hydrologisch-hydrodynamischen Simulation von HYSTEM-EXTRAN zu vergleichen. Das auf der linearen Speicher-Kaskade basierende Modell KOSIM (vgl. IV.1) wird hierfür herangezogen, deren zwei Parameter n (-) (Anzahl der Speicher) und k (min) (Speicherkonstante) bestimmt werden müssen.

Dies erfolgt durch eine Optimierungsmethode, der sogenannten Newton'schen Gradient-Methode (Paulsen, 1987). Die zu bestimmenden Werte der Modellparameter sind diejenigen, die die beste Übereinstimmung (im Sinne der Summe der kleinsten Fehlerquadrate) zwischen den Abflußganglinien erzielen.

Die wichtigsten Ergebnisse der Kalibrierung sind Tab. 24 (Simulation mit Blockregen 1) und Tab. 25 (Simulation mit Blockregen 2) zu entnehmen, wobei die einzelnen Abkürzungen folgende Bedeutung haben:

t_L : Laufzeit¹⁵ zwischen dem Schwerpunkt des abflußwirksamen Niederschlags und dem Schwerpunkt der Abflußganglinie aus HYSTEM-EXTRAN

FG : Fehlergrösse $(= [Q(i) * dQ(i)^2]^{1/3}$, die durch die Optimierung minimiert werden soll

VGL : Erhöhung dieser Fehlergrösse (%) gegenüber der minimalen, wenn die Anzahl der Speicherkaskaden von vornherein auf $n=3$ gesetzt wird (d.h. nur der Parameter K wird minimiert)

¹⁵ Bei der hydrologischen Simulation mit KOSIM ist die entsprechende Schwerpunktlaufzeit $t_L(KOSIM) = n \cdot k$ (vgl. III.4.2 und III.4.3).

Die für beide Blockregen ermittelten Übertragungsfunktionen SK1 und SK2 sind in Anlage 14 für alle UDC-Netze graphisch dargestellt.

| UDM-Netz | Abfluß-Volumen | t_{L1} | Optimierung | | Fehler-Größe FG | DEVS | dY | Vergl. FG |
|----------|-------------------|----------|-------------|-------|-----------------|------|------|-----------|
| | | | n_1 | k_1 | | | | |
| | [m ³] | [min] | [-] | [min] | [l/s] | [-] | [%] | [%] |
| AU01 | 1266 | 21.45 | 6 | 3.42 | 185 | 1.9 | -4.2 | 81 |
| CA02 | 4022 | 21.85 | 6 | 3.55 | 507 | 1.5 | -1.3 | 97 |
| CH01 | 395 | 11.49 | 6 | 2.09 | 38 | 0.7 | 0.1 | 115 |
| DK01 | 122 | 13.35 | 8 | 1.71 | 15 | 1.1 | -1.9 | 108 |
| FR01 | 4707 | 31.17 | 5 | 5.63 | 688 | 2.8 | -2.3 | 53 |
| GB01 | 258 | 11.08 | 8 | 1.52 | 22 | 0.4 | 0.0 | 173 |
| GB02 | 294 | 19.81 | 5 | 3.90 | 41 | 1.8 | -3.4 | 64 |
| HU01 | 238 | 16.93 | 5 | 3.38 | 30 | 1.5 | -1.7 | 46 |
| IT01 | 89 | 6.44 | 9 | 0.93 | 7 | 0.7 | 0.7 | 115 |
| NO01 | 565 | 11.37 | 6 | 2.12 | 47 | 0.5 | 0.5 | 146 |
| SE01 | 300 | 11.43 | 7 | 1.79 | 27 | 0.6 | -0.4 | 149 |
| SE02 | 414 | 14.04 | 6 | 2.48 | 42 | 0.8 | -0.4 | 109 |
| US01 | 57 | 15.85 | 5 | 3.34 | 6 | 1.1 | -0.5 | 82 |
| US02 | 249 | 21.82 | 6 | 3.41 | 39 | 2.1 | -4.5 | 72 |
| US04 | 246 | 16.07 | 5 | 3.28 | 27 | 1.3 | -2.1 | 82 |

Tab.24: Vereinfachte hydrologische Simulation mit der linearen Speicherkaskade; Ergebnisse der Kalibrierung der Modellparameter n_1 und k_1 (Blockregen 1).

| UDM-Netz | Abfluß-Volumen | t_{L2} | Optimierung | | Fehler-Größe FG | DEVS | dYmax | Vergl. FG |
|----------|-------------------|----------|-------------|-------|-----------------|------|-------|-----------|
| | | | n_2 | k_2 | | | | |
| | [m ³] | [min] | [-] | [min] | [l/s] | [-] | [%] | [%] |
| AU01 | 1801 | 20.33 | 6 | 3.29 | 241 | 1.6 | -2.3 | 85 |
| CA02 | 5699 | 20.78 | 6 | 3.42 | 678 | 1.4 | -0.3 | 98 |
| CH01 | 558 | 11.04 | 6 | 2.04 | 53 | 0.5 | 0.4 | 110 |
| DK01 | 173 | 12.67 | 8 | 1.66 | 16 | 0.7 | -0.4 | 154 |
| FR01 | 6704 | 29.11 | 5 | 5.20 | 1020 | 2.9 | -2.9 | 42 |
| GB01 | 364 | 10.68 | 7 | 1.71 | 35 | 0.6 | -0.2 | 127 |
| GB02 | 418 | 18.46 | 5 | 3.57 | 76 | 2.8 | -6.8 | 32 |
| HU01 | 336 | 15.92 | 5 | 3.24 | 38 | 1.3 | -2.3 | 62 |
| IT01 | 123 | 6.36 | 9 | 0.92 | 12 | 0.8 | 0.5 | 217 |
| NO01 | 798 | 11.05 | 6 | 2.08 | 67 | 0.6 | 0.7 | 131 |
| SE01 | 425 | 10.99 | 7 | 1.75 | 38 | 0.5 | -0.2 | 142 |
| SE02 | 587 | 13.55 | 5 | 2.91 | 66 | 1.2 | -0.7 | 64 |
| US01 | 81 | 15.41 | 5 | 3.28 | 7 | 0.8 | 0.0 | 106 |
| US02 | 353 | 20.46 | 6 | 3.27 | 51 | 1.8 | -2.7 | 76 |
| US04 | 349 | 15.34 | 5 | 3.19 | 35 | 1.0 | -1.2 | 94 |

Tab. 25: Vereinfachte hydrologische Simulation mit der linearen Speicherkaskade; Ergebnisse der Kalibrierung der Modellparameter n_2 und k_2 (Blockregen 2).

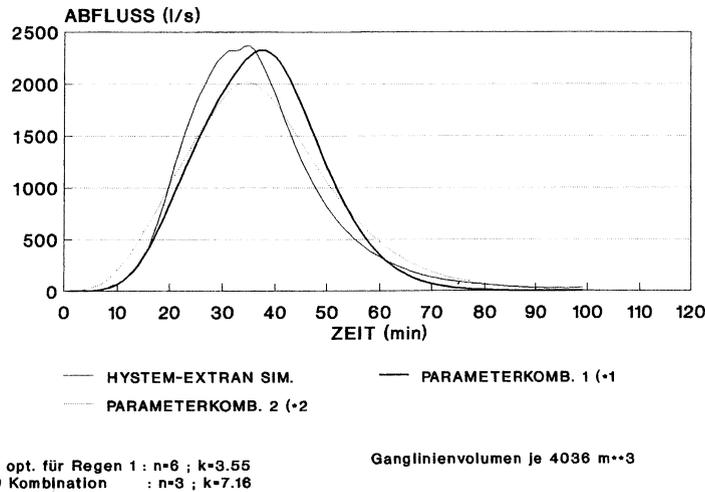


Abb. 6: Gegenüberstellung der Abflußganglinien nach HYSTEM-EXTRAN und nach KOSIM; Netz CA02, Blockregen 1.

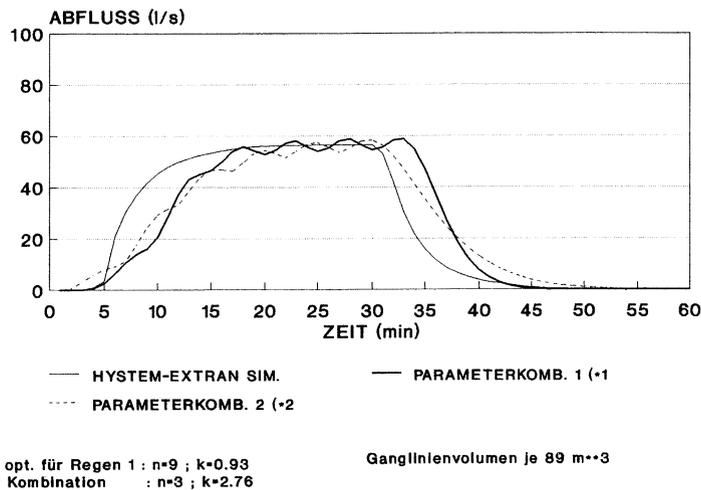


Abb. 7: Gegenüberstellung der Abflußganglinien nach HYSTEM-EXTRAN und nach KOSIM; Netz IT01, Blockregen 1.

Abbildung 6 und 7 zeigen die für CA02 und IT01 mit Blockregen 1 berechneten Abflußganglinien aus HYSTEM-EXTRAN und KOSIM (vgl. Abb.4 und 5).

Im Gegensatz zu den von Paulsen (1987) aufgeführten Ergebnissen (vgl. III.4) stellt man fest, daß die optimierte Anzahl der Speicher zwischen 5 und 9 ($\mu=6,2$ und $\sigma=1,22$) liegt (vgl. Tab. 24).

Kalibrierungen der linearen Speicherkaskade an die Abflußganglinien von HYSTEM-EXTRAN wurden erneut unter der einschränkenden Bedingung $n=3$ durchgeführt (vgl. Tab. 24). In solchen Fällen werden die zu minimierenden Fehlergrößen (vgl. 2.1) gegenüber denen einer vollständigen Optimierung deutlich erhöht. Je größer n_{opt} und je kleiner t_L ist, desto stärker tritt die Fehlerdiskrepanz in Erscheinung. Die relative Fehlererhöhung liegt zwischen 46% und 173% ($\mu=99\%$, $\sigma=35\%$). Durch Festhalten von n auf dem niedrigen Wert von 3 wird zudem der Spitzenabfluß möglicherweise in der gleichen Größenordnung wie in der kalibrierten HYSTEM-Simulation unterschätzt.

Trotz dieser Restriktionen bleiben die Ergebnisse der vereinfachten hydrologischen Simulation mit $n=3$ (k kalibriert) für alle UDC-Netze im Bereich "gut bis sehr gut" (z.B. vgl. Abb.6 und 7). Die Ergebnisse sind also leicht besser als mit dem kalibrierten Ansatz der Einheitsganglinie (HYSTEM).

Die Ergebnisse der Modellkalibrierung mit Blockregen 2 weisen gegenüber denen mit Blockregen 1 keinen systematischen Unterschied auf:

- die Deviationen DEVS liegen im gleichen Bereich
- die systematische Verschlechterung der Ergebnisse durch Fixierung des n -Wertes auf n bleibt in der gleichen Größenordnung.

Ein Entwässerungssystem zeigt in der Realität keine rein lineare Transformation der Zuflüsse. Demzufolge stellt sich die Frage, wie stabil ein für eine bestimmte Regenbelastung

aufgelegter Parametersatz auf andere Belastungsfälle reagiert. Erste Vergleiche zwischen den Kalibrierungsergebnissen (n_1 , k_1) für Blockregen 1 und denen (n_2 , k_2) für Blockregen 2 zeigen nur kleine Änderungen. Die entsprechenden Übertragungsfunktionen sind fast deckungsgleich (vgl. Anlage 14). 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. In diesem Belastungsbereich (Blockregen 1 und 2) reagiert das System also 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 $\sigma = 1,7$ %¹⁶.

4.3.4 Anwendung einer aufgrund der Kanalnetzkenndaten hergestellten Übertragungsfunktion

Wie in 4.3.2 und 4.3.3 geht es darum, die Genauigkeit einer vereinfachten hydrologischen Simulation mit einem Grobnetz gegenüber einer hydrologisch-hydrodynamischen detaillierten Simulation mit einem Feinnetz zu beurteilen. Im Gegensatz zu den vorherigen Untersuchungen wird allerdings versucht, die charakteristische Übertragungsfunktion direkt aus den Kanalnetzkenndaten herzuleiten (vgl. III.4.5.1).

Das Konstruktionsprinzip hierbei beruht auf einer gebietsmorphologischen Interpretation der Systemfunktion bzw. "Unit Hy-

drograph" (vgl. 4.5)¹⁷. Die UH-Funktion ist demnach durch die Verteilung der Einzugsgebietsflächen im Bezug auf die Fließzeiten bis zum betrachteten Auslaß in der Kanalisation charakterisiert. Daher ist sie, streng genommen, nur für den Kanal (Transport) repräsentativ und schließt die Wellentransformation an der Oberfläche (Konzentration) aus. Um letzteres zu berücksichtigen, wird gegebenenfalls eine Simulation mit HYSTEM vorgeschaltet. Die berechnete Schwerpunktlaufzeit wird in jenem Fall durch Gl. III.75 bestimmt, wobei die eingesetzte undurchlässige Fläche dem mittleren Wert aller Kanalhaltungsflächen entspricht.

Wichtige Bemerkung:

Zur Berechnung der Fließzeiten wurde das Abflußverhältnis "Normal Abfluß bei Vollfüllung des Rohres" angenommen.

Die UH-Funktionen sind in Anlage 13 für alle UDC-Netze graphisch dargestellt. Anlage 14 zeigt eine Gegenüberstellung mit den ermittelten linearen Speicherkaskaden.

Eine Simulation wurde mit dem größten Kanalnetz FR01 und Blockregen 1 durchgeführt¹⁸. Die Deviationen zwischen den Abflußganglinien sind aus Tabelle 26 ersichtlich.

¹⁶ Eine statistische Auswertung der Werte von t_{L1} (Blockregen 1) und t_{L2} (Blockregen 2) über alle Netze liefert folgende Regressionsformel:

$$t_{L2} = 0,92 \cdot t_{L1} + 0,52 \text{ (min)} \text{ mit Korrelationskoeffizient } r = 0,999$$

¹⁷ Aus diesem Grund werden im folgenden die berechneten Systemfunktionen als UH-Funktionen gekennzeichnet.

¹⁸ Dies entspricht deshalb einem günstigen Fall, weil die Fließzeit im Kanal möglicherweise diejenige an der Gebietsoberfläche deutlich überschreitet (vgl. Anlage 14 und Tab. 27).

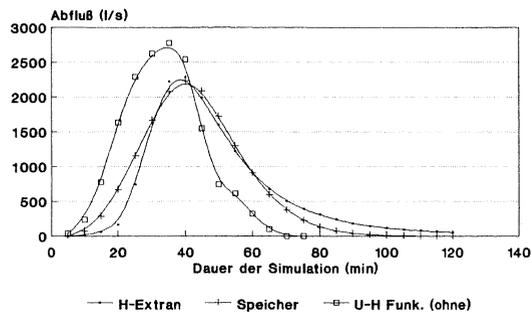
| | DEVS | DEVM | STAN | V ₁ | VOL | Z | YMAX ₁ | DY | S1 | DS |
|---------|-------|-------|------|-------------------|------|-------|---------------------|-------|-------|--------|
| | (%) | (%) | (-) | (m ³) | (%) | | (m ³ /s) | (%) | (min) | (%) |
| [1]-[2] | 14.98 | 52.47 | .30 | 4698.6 | 3.37 | 35.46 | 2.29 | 21.18 | 43.32 | -33.59 |
| [1]-[3] | 6.79 | 23.77 | .89 | 4698.6 | 3.01 | 22.16 | 2.29 | 15.16 | 43.32 | -12.79 |
| [2]-[3] | 17.38 | 56.50 | .53 | 4857.0 | -.35 | 44.60 | 2.77 | -4.97 | 28.77 | 31.32 |

Tab. 26: Deviationen der Ganglinien von HYSTEM-EXTRAN und UH-Funktion; FR01, Blockregen 1.

- [1]: Abflußganglinien HYSTEM-EXTRAN
- [2]: Abflußganglinien UH-Funktion ohne Berücksichtigung der Oberflächenkonzentration
- [3]: Abflußganglinien UH-Funktion mit Berücksichtigung der Oberflächenkonzentration

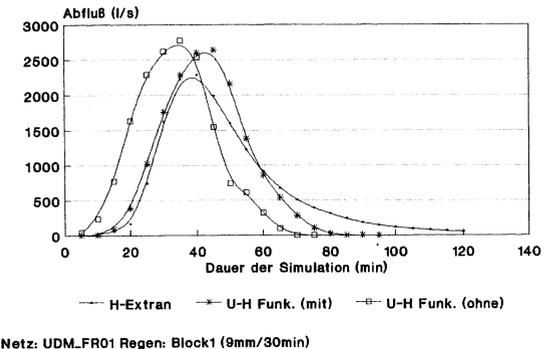
In Abbildung 8 ist die mit der UH-Funktion berechnete Abflußganglinie (ohne Berücksichtigung der Oberflächenkonzentration) der Bezugsganglinie nach HYSTEM-EXTRAN und der Ganglinie nach KOSIM graphisch gegenübergestellt.

Die Verbesserung der Simulationsergebnisse durch Berücksichtigung der Oberflächenkonzentration wird in Abbildung 9 verdeutlicht.



Netz: UDM_FR01 Regen: Block1 (9mm/30min)

Abb. 8: Gegenüberstellung der Abflußganglinien, Kanalnetz IT01, Blockregen 1



Netz: UDM_FR01 Regen: Block1 (9mm/30min)

Abb. 9: Gegenüberstellung der Abflußganglinien, Kanalnetz IT01, Blockregen 1

Trotz dieser Verbesserung muß festgestellt werden, daß die Deviationen [1]-[3] immer noch deutlich höher liegen, 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).

Zur Erklärung der Diskrepanzen werden folgende Gründe erwähnt:

- die Wellengeschwindigkeit wird überschätzt (Annahme vom Normalabfluß bei Vollfüllung),
- der Speichereffekt in der Kanalisation wird nicht berücksichtigt (Normalabfluß).

Weitere Vergleiche zwischen den Schwerpunktlaufzeiten nach Kalibrierung der jeweiligen Simulationsansätze werden in Tab. 27 gezeigt.

4.3.5 Schlußfolgerungen

Im Vergleich zu der detaillierten hydrologischen Simulation vergrößern sich bei der vereinfachten hydrologischen Simulation die Deviationen (vgl. 4.2). Die ausdrückliche Nichtbeachtung der Transportvorgänge in der Kanalisation zugunsten eines erweiterten Konzentrationsvorganges bringt eine Verschlechterung der Berechnungsergebnisse mit sich.

Zwischen den drei Ansätzen HYSTEM, KOSIM und UH-Funktion bestehen jedoch deutliche Unterschiede.

Gegenüber HYSTEM erreicht KOSIM die bessere Anpassung an die von HYSTEM-EXTRAN berechneten Abflußganglinien. Die Deviationen DEVS liegen für KOSIM in allen Berechnungsfällen im Bereich "sehr gut" (vgl. Tab. 24 und Tab. 25). Die Anpassung von HYSTEM (vgl. Tab. 23) liegt in den meisten Fällen im Bereich "gut", in wenigen Fällen im Bereich "sehr gut".

Dies erklärt sich dadurch, daß die Anpassung der linearen Speicherkaskade durch Kalibrierung von 2 Parametern n und k vorgenommen wird, während diejenige der Standardeinheitganglinie durch die einzige Kalibrierung der Schwerpunktlaufzeit t_L (bzw. durch Bestimmung des optimierten α_U) erfolgt. Wenn n auf 3 fixiert wird, verringert sich die Diskrepanz zwischen HYSTEM und KOSIM. Jedoch bleibt der Ansatz nach der Speicherkaskade dem Ansatz nach der Standardeinheitganglinie überlegen.

Die Güte einer vereinfachten hydrologischen Simulation hängt logischerweise entscheidend von der richtigen Einschätzung der Schwerpunktlaufzeit ab. Dieser Satz kann umgekehrt als Maß für die Verwertbarkeit eines bestimmten Ansatzes gedeutet werden. In Tabelle 27 werden dementsprechend die (gegebenfalls nach Kalibrierung des Ansatzes) berechneten

Schwerpunktlaufzeiten¹⁹ für alle 3 Ansätze aufgeführt. Der Belastungsfall ist Blockregen 1.

| | t_L [1] (min) | t_L [2] (min) | t_L [3] (min) | t_L [4] (min) | t_L [5] (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 27: Vereinfachte hydrologische Simulation; Vergleich zwischen den "optimalen" 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 UH-Funktion ohne Oberflächen-Konzentration
- [5] : Simulation mit der UH-Funktion mit Oberflächen-Konzentration

Die nach Kalibrierung von α_U erhaltenen Schwerpunktlaufzeiten in HYSTEM $t_L[2]$ sind gegenüber den tatsächlichen $t_L[1]$ (HYSTEM-EXTRAN) systematisch unterschätzt.

¹⁹ Die in HYSTEM bzw. in der UH-Funktion eingesetzten Schwerpunktlaufzeiten wurden jeweils aus den Daten in Tab. 2 (A_{und}), Tab. 4 (L, l_f) und Tab. 22 (a_U) nach Gl. III.75 errechnet. Die in KOSIM eingesetzten Schwerpunktlaufzeiten errechnen sich aus Gl. III.72.

Die statistische Auswertung der Daten ergibt folgende Regressionsformel:

$$(Gl.1) \quad t_L[1] = 2,09 + 1,08 \cdot t_L[2] \quad (\text{min})^{20}$$

Bei der Kalibrierung der linearen Speicherkaskade ergibt sich eine bessere Anpassung der Laufzeitwerte. Zudem gibt es keine systematische Über- bzw. Unterschätzung dieser Werte. Dies hängt möglicherweise mit der Form der Übertragungsfunktion zusammen und ist ein zusätzlicher Beweis dafür, daß die Form der Standardeinheitganglinie nicht so gut geeignet ist wie diejenige der Speicherkaskade, wenn Konzentration- und Transport-Vorgänge in einem Schritt zusammengefaßt werden.

Bei dem letzten Ansatz (UH-Funktion) erfolgt, wie erwartet, eine systematische Unterschätzung der Schwerpunktlaufzeiten, auch wenn die Oberflächenkonzentration berücksichtigt wird.

Im letzteren Fall beträgt die relative Fehler $\frac{t_L[5] - t_L[1]}{t_L[1]}$ im

Durchschnitt -41%. Die relativ geringe Streuung ($\sigma=10\%$) dieses Fehlers ist dabei besonders interessant.

²⁰ Der Korrelationskoeffizient $r = 0.98$

4.4 Einfluß der Niederschlagsvariabilität

Die Modellunsicherheit bzgl. des Teilmodells 'Gebietsniederschlag' einer Niederschlags-Abflußberechnung besteht im Grunde in der Nichterfassung der Belastungsgröße Niederschlag bzw. der Auswertung der Belastungsgröße Niederschlag mit ihren teilweise unbekanntem und oft großen Meßfehlern. Allgemein kann zunächst einmal zur Niederschlagsvariabilität festgestellt werden, daß

* eine örtliche Auflösung der Niederschlags-Meßdaten, also wie klein die Flächenrepräsentanz sein muß, für die ein Meßwert gilt, abhängig ist von der Auflösung in modelltechnische Teilgebiete für die Anwendung von Simulationsmodellen. Je größer die modelltechnische Unterteilung, je größer kann auch die Auflösung der Regendaten sein.

* eine zeitliche Auflösung im wesentlichen von der Reaktionszeit des Einzugsgebietes, aber auch seiner betrachteten Teilgebiete abhängt, d.h. wie schnell oder direkt führen Regenintensitäts-Änderungen auch zu Abflußveränderungen.

Insbesondere für die Bewirtschaftung von Kanalisationen ermöglicht die Kenntnis der Variabilität der Überregnung (z.B. Lage der Niederschlagszentren, ihre Hauptzugrichtung und evtl. ihre Zuggeschwindigkeit), im Zusammenspiel mit N-A-Modellen, eine bessere Nutzung vorhandener Kanalspeichervolumina. Die Erfassung von Niederschlagsereignissen erfolgt in der Urbanhydrologie im allgemeinen aber nur auf der Basis von Regenschreibern, deren Aufstellungs-Dichte meist zu gering ist, um genauere Aussagen über die Niederschlagsvariabilität zuzulassen. Um dem Leser einen Eindruck von der dargelegten Problematik zu vermitteln, wird anhand der folgenden Abbildung 10 die Abfolge einer Schauerlinie innerhalb einer Kaltfront mit Hilfe von 8 Radarbildern (5-Minuten Abstand) demonstriert. Gemessen wurde dieses Ereignis im Rahmen des am Institut laufenden BMFT-'RADAR'-Forschungsprojektes 'RADAR' (1990).

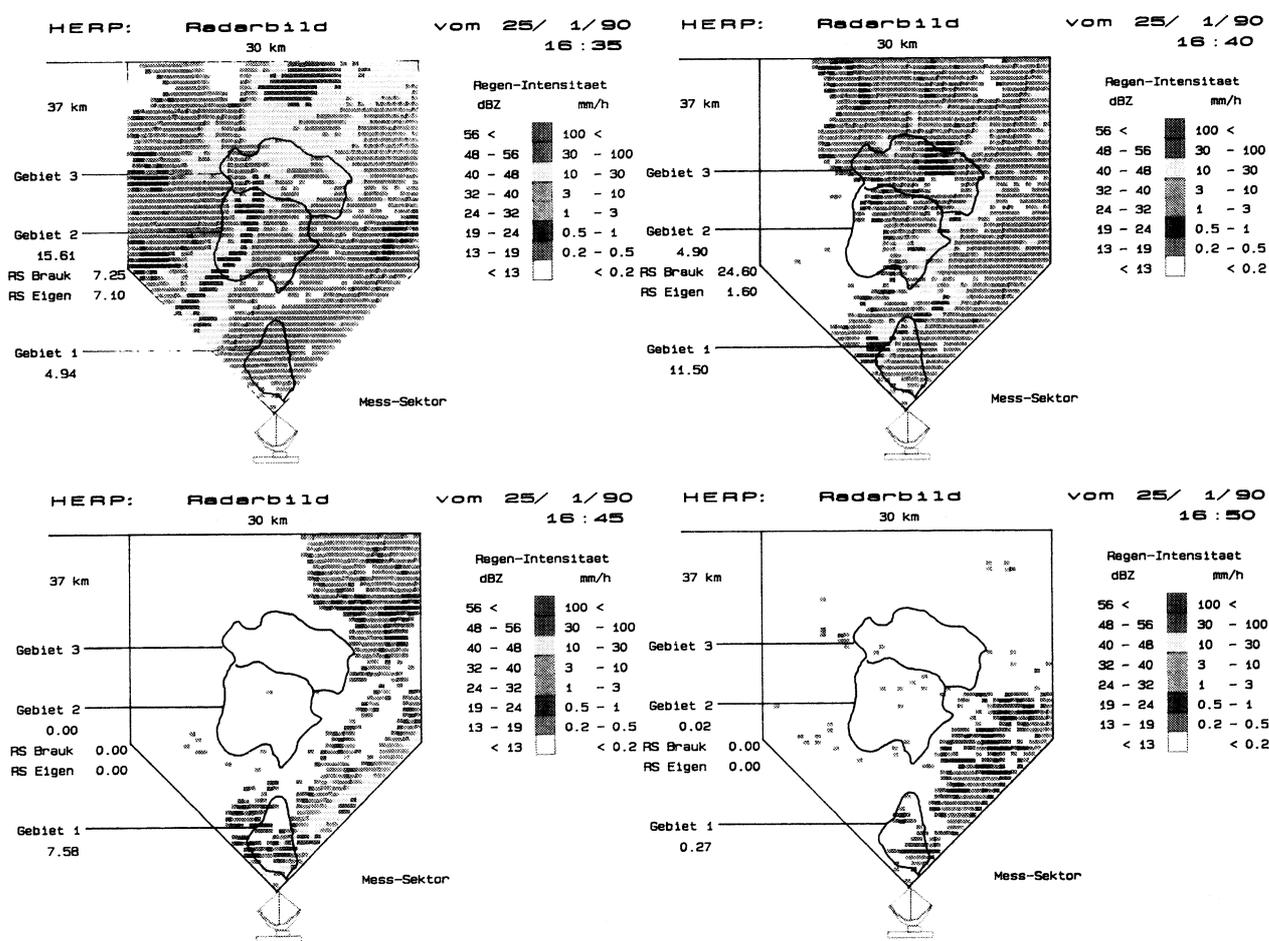
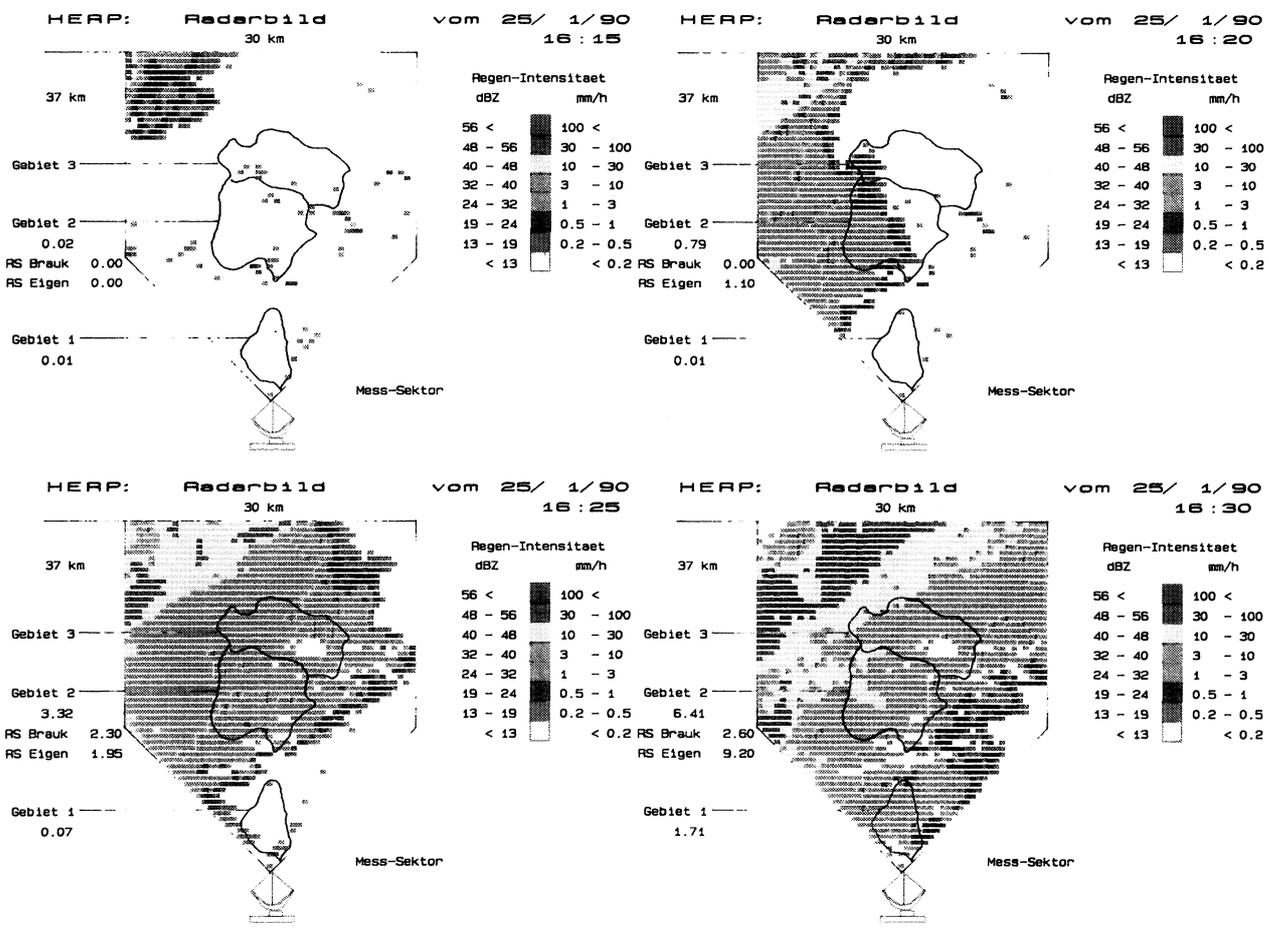


Abb. 10a: Radarmessung einer Schauerlinie
Institut für Wasserwirtschaft, Universität Hannover

Abb. 10b: Radarmessung einer Schauerlinie
Institut für Wasserwirtschaft, Universität Hannover

Die Niederschlagssumme betrug für den gezeigten Zeitraum durchschnittlich sowohl beim Radar als auch bei den Regenschreibern ca. 2 mm. Zu beachten sind vor allem die zusätzlich aufgeführten Niederschlagsdaten für Gebiet 2 (links vom Meßsektor). Hierbei handelt es sich zum einen um den mittleren Niederschlag des Gebietes 2 (mm/min) und die Niederschlagsintensität zweier ausgewählter Radarmeßfelder, die Regenschreibern zugeordnet sind (mm/min).

Bevor anhand verschiedener Untersuchungen auf die eigentliche Darstellung der Niederschlagsvariabilität eingegangen wird, soll zunächst ein kurzer Abriß zur Problematik der Ungenauigkeiten von Niederschlagsdaten gegeben werden.

4.4.1 Ungenauigkeit von Niederschlagsdaten

Systembedingte Fehler (Ungenauigkeiten) verschiedener Geräte zur Niederschlagsmessung wurden in Abschnitt 2 behandelt. Hier wird versucht Vergleichsuntersuchungen zwischen den einzelnen Gerätetypen darzustellen, wobei es sich zum einen um den Vergleich von Regenschreiber und Tropfenspektrograph und zum anderen um Radar und Regenschreiber handelt.

4.4.1.1. Vergleich Tropfenspektrograph - Regenmesser

Der Tropfenspektrograph wird zur Messung von Anzahl und Durchmesser der Regentropfen eingesetzt. Aus diesen Daten lassen sich sowohl Regenintensität und -menge, wie auch die Radar-Reflektivität ermitteln. Letzteres ist bisher auch das Haupteinsatzkriterium für dieses Meßgerät. Vergleichende Untersuchungen beider Gerätetypen sind daher nur von untergeordneter Bedeutung und dienen lediglich zur besseren Einschätzung der systemspezifischen Fehler von Regenschreibern (Abschnitt 2.2.2; Kreuels, 1988). Die Zuverlässigkeit der Regenmengenmessung soll aber nicht unerwähnt bleiben. Im Rahmen des BMFT-Forschungsprojektes 'RADAR' (1986-1991) steht ein

konventionelles Regenmeßgerät nach dem Wippenprinzip ca. 30 m entfernt von einem Tropfenspektrographen. Die Daten beider Systeme werden minütlich registriert und in digitaler Form aufgezeichnet. Vergleiche täglicher Niederschlagssummen seit Januar 1991 ergaben keine nennenswerten Unterschiede, außer zu Zeiten von Schneefall (der Tropfenspektrograph ist systembedingt nicht zur Schneemessung einsetzbar) und falls der Regenmesser verstopft ist oder sonstige Defekte aufweist. Abbildung 11 zeigt den Verlauf der Regensummenlinien zweier Ereignisse, erfaßt vom Tropfenspektrographen und Regenschreiber. Auffällig ist, daß die Regensummen des Tropfenspektrographen etwas höher liegen und die Erfassungen früher beginnen. Ursache hierfür sind zum einen die Benetzungsverluste und andererseits die Verzögerung des Meßimpulses beim Wippengerät (beim Wippengerät muß zunächst eine Wippenhälfte gefüllt sein). Auftretende Zeitdifferenzen (19.3.91) sind aber auch durch nicht synchronisierte Uhren der beiden Erfassungssysteme bedingt.

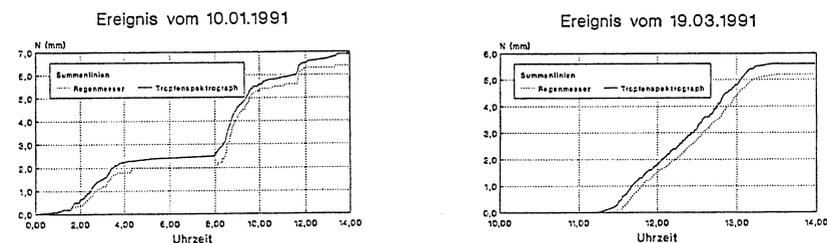


Abb. 11: Vergleich der Niederschlagssummenlinie von Tropfenspektrograph und Wippengerät

4.4.1.2 Vergleich Radar - Regenmesser

Ein absolutes Maß für die Genauigkeit von Radar- und Regenschreiber-gemessenen Niederschlägen gibt es nicht, da die 'Wahrheit' nicht bekannt ist. Da im allgemeinen bodengemessene Regendaten die Bezugsgröße bilden, muß gewährleistet sein, daß die mit Radar erfaßten Daten für bestimmte Flächenelemente im Mittel die gleichen Werte ergeben, wie die innerhalb dieser Fläche punktuell am Boden gemessenen. Bevor auf einige Untersuchungen bzgl. eines Vergleichs beider Meßsysteme eingegangen wird, soll zum besseren Verständnis zunächst noch einmal kurz die 'Kalibrierung' eines Radargerätes vorgestellt werden.

Das Radar liefert als Meßgröße den Reflektivitätsfaktor Z aller im Pulsvolumen enthaltenen Regentropfen. Der Zusammenhang zwischen Niederschlagsintensität R und Z läßt sich empirisch beschreiben, variiert jedoch von Regen(-typ) zu Regen(-typ). In der Regel ist die jeweils gültige R-Z-Beziehung nicht bekannt, so daß eine bestimmte (mittlere) Beziehung (z.B. Marshall-Palmer, Gl. II.9a) benutzt wird, deren Fehler bei der Umrechnung von Z in R bewußt in Kauf genommen werden. Üblicherweise erfolgt dann ein Vergleich zwischen Radar- und Regenmesser-Niederschlagssummen. Die sich ergebenden Korrekturfaktoren werden zur Multiplikation aller Radarwerte herangezogen. Bei genügend großer Anzahl von 'Stützstellen' am Boden können aus einfachen Faktoren zweidimensionale Korrekturfunktionen werden. Diese sogenannte Aneichmethode der Radar-'Kalibrierung' ist nicht unproblematisch, zumal, wenn sie während des Messbetriebes (also on-line) erfolgen soll (ähnelt sie doch dem Versuch Äpfel mit Birnen zu vergleichen). Mehr zu dieser weltweit gebräuchlichen Methode findet man in den Proceedings des International Symposium on Hydrological Applications on Weather Radar, 1989.

Für die Radar-Niederschlagsmessung mit hoher zeitlicher Auflösung fällt dieses Verfahren aus. Wie schon erläutert, hängt

die Güte der quantitativen Messung (wie sie für die Stadthydrologie notwendig ist) in erster Linie von der Verwendung der richtigen R-Z-Beziehung ab. Diese läßt sich unmittelbar und direkt aus den Meßdaten eines Tropfenspektographen bestimmen (Abschnitt 2.5.2). Obwohl die R-Z-Beziehung aus punktuell am Boden gemessenen Tropfenspektren ermittelt wird, ist sie (als 'Fingerabdruck' des Regentyps') entsprechend der meteorologischen Situation repräsentativ für ein größeres Gebiet (Kreuels, 1989).

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 81, Teilprojekt A4 der Universität München wurden in den Jahren 1977-1981 für das Einzugsgebiet München-Harlachingen Niederschlagsmessungen mit 5 Boden-Meßgeräten durchgeführt. Zusätzlich standen für die Jahre 1978/79 radargemessene Niederschläge zur Verfügung, die zu einem Vergleich von Punkt- und Radarmessungen herangezogen wurden (Becker u. Geiger, 1983). Beim Radar handelt es sich um ein ca. 22 km vom Untersuchungsgebiet entferntes C-Band-Gerät der DFVLR, Oberpfaffenhofen. Die Eichung des Gerätes wurde nur anhand einer Punktmeßstelle des Gebietes München-Harlachingen durchgeführt. Der direkte Vergleich von Punkt- und Radarmessung (Abb. 12) und die Gegenüberstellung von Radargebietsniederschlag und dem aus den Punktmessungen ermittelten Gebietsniederschlag (Abb. 13) ergaben erhebliche Differenzen, sowohl bei den Regenintensitäten, als auch bei den Regen volumina und dem Zeitpunkt des Auftretens von Extrema.

Mögliche Erklärungsmöglichkeiten (fehlende Zeitsynchronisation, zu große räumliche Variabilität) erwiesen sich als nicht nachvollziehbar, so daß als Schlußfolgerung für diese erheblichen Diskrepanzen nur die Aneichung der Radarmessung mittels eines Regenschreiber anzusehen war.

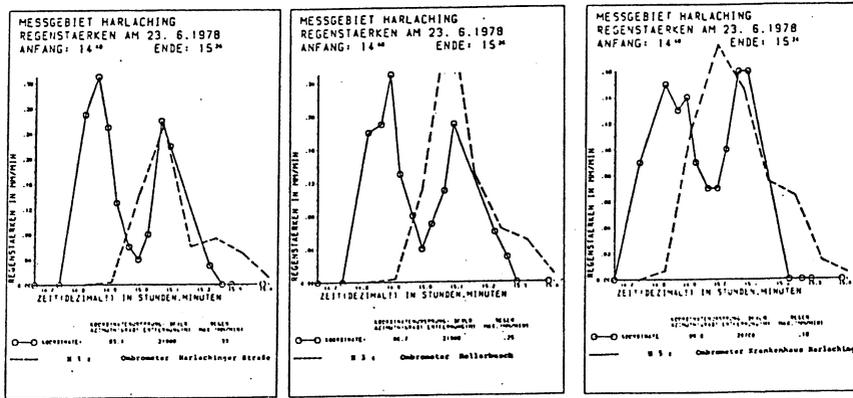


Abb. 12: Vergleich von Punkt- und Radarmessungen (aus Becker, Geiger 1983)

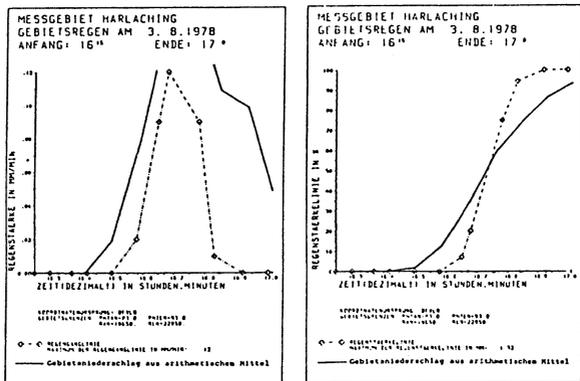


Abb. 13: Vergleich des Gebietsniederschlages ermittelt aus Punkt- und Radarmessung (aus Becker, Geiger 1983)

Breuer (1983), der auf jahrelange Messungen mit einem X-Band Radargerät, das ausschließlich durch Datenmaterial eines Tropfenspektrographen geeicht wurde, zurückgreifen kann, gibt

für die Gebietsniederschlagsmessung je nach Ereignistyp eine Genauigkeit von $\pm 10...30\%$ an. Radar-Datenmaterial, das Schilling u. Harms (1983) für eine Untersuchung der räumlichen Variabilität von Niederschlägen vom Meteorologischen Institut der Universität Bonn zur Verfügung gestellt wurde, wird von Breuer sogar mit einer Ungenauigkeit von $\pm 5\%$ beurteilt.

Die z.Zt. kontinuierlichste Untersuchung bzgl. eines Vergleichs von Radar- und Regenschreiber-gemessenen Niederschlägen findet im Rahmen des BMFT-Forschungsprojektes 'RADAR' (1986-1991) statt. Die Radardaten stammen von einem X-Band-Gerät und werden mit einer mittleren gebietspezifischen R-Z-Beziehung berechnet. Als Referenz dienen 32 schreibende Bodenmeßgeräte innerhalb des Radar-Meßsektors (Abb. 14). Jedem dieser Regenmesser wird ein Radar-Meßfeld (kartesische Koordinaten) zugeordnet.

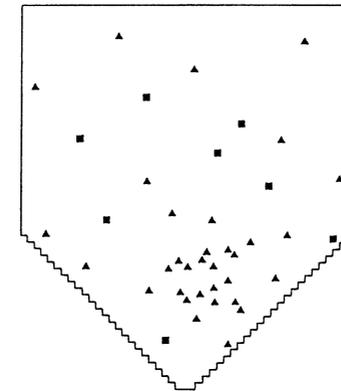


Abb. 14: Standorte der Regenschreiber im Radar-Meßgebiet

Für jeden der 32 Vergleichspunkte wird der Quotient aus der Regenmenge der Radarwerte (N_R) und der Regenmesserwerte (N_B) gebildet. Anschließend wird über alle 32 Quotienten gemittelt. Das Ergebnis X ist ein Maß für die Übereinstimmung der Resultate beider Meßsysteme. Auswertungen von 88 Niederschlagsereignissen des Jahres 1989 mit einer Gesamt-Niederschlagsmenge von 171 mm ergaben, daß die Radarwerte viel zu niedrig liegen, wobei dies

für ergiebigeren Niederschläge noch stärker zutrifft (Tabelle 27, Spalte \bar{X}). Aus der Vielzahl von möglichen Ursachen ergab die Nichtberücksichtigung bestimmter physikalischer Abläufe in der Radargleichung den entscheidenden Hinweis zur Korrektur der Z-Werte (Tabelle 28, Spalte \bar{X}_K). Intensive Regen (also die hydrologisch relevanteren Ereignisse) werden bedeutend besser erfaßt.

| RS-N-Summe | \bar{X} | \bar{X}_K |
|----------------|-----------|-------------|
| $N_B > 0.1$ mm | .853 | 1.603 |
| $N_B > 0.5$ mm | .802 | 1.476 |
| $N_B > 1$ mm | .779 | 1.446 |
| $N_B > 2$ mm | .731 | 1.358 |
| $N_B > 5$ mm | .500 | .931 |

Tab. 28: Mittlere Quotienten \bar{X} u. \bar{X}_K aus 88 Radar- und Regenschreiber-gemessenen Niederschlägen für verschieden ergiebige Niederschläge

Anhand des zusätzlichen Datenmaterials von 1990 und unter Berücksichtigung, daß systembedingt Regenschreiber (Abschnitt 2.2.2) ebenfalls nicht die 'Wahrheit' repräsentieren, liegen die Radarwerte jetzt im Mittel um 15 % höher als die Bodenwerte (BMFT, 1990,1991). Beispielhaft zeigt Abbildung 15 die Ergebnisse für zwei Regenmessstationen, die im Gebiet der Boye (Abb. II.17) liegen. Die Radarwerte liegen im Mittel etwas zu hoch, die absoluten Abweichungen betragen aber überwiegend weniger als 2 mm (Verworn, 1991).

Zur Erinnerung sei nochmals festgestellt:

Bei den oben aufgeführten Untersuchungen, handelt es sich im einen Fall um eine Punktmessung, im anderen Fall um eine Volumenmessung, weshalb die Ergebnisse eines Vergleiches -auch bei längeren Integrationszeiten- nie völlig übereinstimmen können.

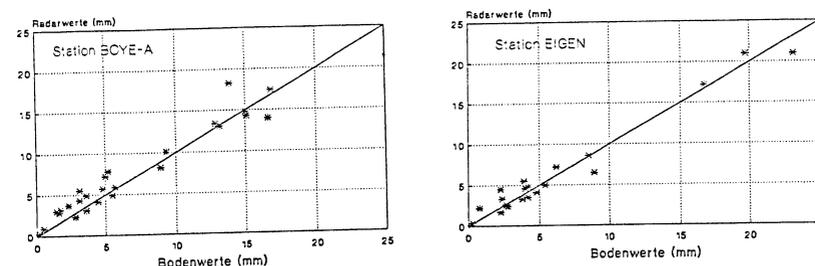


Abb. 15: Vergleich täglicher Niederschlagshöhen aus Radar- und Punkt-Messungen für zwei Stationen

4.4.2 Untersuchungen zur Niederschlagsvariabilität

Im folgenden wird für Niederschlags-Abfluß-Simulationen von Kanalisationssystemen untersucht, inwieweit sich Fehler bei der Nichtberücksichtigung der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Belastungsgröße 'Niederschlag' auf die Abflußberechnung auswirken. Da es im Rahmen dieses Berichtes nicht möglich war, diesbezüglich neue Untersuchungen vorzunehmen, wird, wie schon im vorangegangenen Abschnitt auf unterschiedliche in der Literatur zu findende Auswertungen zurückgegriffen.

Untersuchungen bzgl. des Einflusses der Niederschlagsvariabilität bei N-A-Simulationen können anhand des zur Verfügung stehenden Datenmaterials grob in drei Bereiche untergliedert werden - Untersuchungen auf der Grundlage von:

- * ausschließlich Regenmesser-Daten
- * Regenschreiber- und Radar-Daten
- * ausschließlich Radar-Daten

Anhand eines 2 km² großen städtischen Einzugsgebietes und fünf Regenschreibern (am Rande bzw. außerhalb des Gebietes) untersuchte Schilling (1983) die Fragen, welche Fehler sich insbesondere bei der Verwendung von (z.B. Thiessen-gemittelten) Gebietsniederschlägen ergeben und welche Rolle Zueffekte des Niederschlages hinsichtlich des Abflusses spielen. Hierzu lagen 30 kurze Starkregenereignisse auf 5-Minuten-Basis vor, die aber nicht über dem Testgebiet erfaßt wurden. Die Niederschlags-Abfluß-Simulation basierte auf einem hydrologischen Modell (HYSTEM, Harms, Verworn 1983). Die Vergleichsberechnungen mit den Gebietsniederschlags-Varianten

- ein Regenschreiber für das gesamte Einzugsgebiet
- fünf Regenschreiber (Thiessen-gemittelt) für das gesamte Einzugsgebiet und
- ein Regenschreiber für das jeweilige Teileinzugsgebiet

führten zu folgenden Schlußfolgerungen :

- der Fehler bei der räumlichen Niederschlagsauflösung beträgt im Mittel 20 % - trotz der ungewöhnlichen hohen Meßnetzdicke von fünf Niederschlagsstationen-, wobei der aus fünf Geräten ermittelte jeweilige Wert als 'wahr' angenommen wurde. Da der 'wahre' Niederschlag keineswegs von den fünf Geräten erfaßt wurde, erscheint die angegebene Fehlermarge eher zu niedrig

- die Fehler bei der Erfassung der räumlichen Niederschlagsvariabilität werden bei der N-A-Simulation des Einzugsgebiet nicht gedämpft, sondern teilweise erheblich-verstärkt und

- die Verwendung von räumlich homogenen Regen bei der Abflußberechnung führen zu systematischen Fehlern, infolge räumlich als gleichmäßig angesetztter Anfangsverluste und vorherrschender Zugrichtung.

Becker u. Geiger (1983) ermittelten für zwei etwa 3 km voneinander entfernte Regenmesser für 90 % aller gemessenen Ereignisse über zwei Jahre nur eine Abweichung von 16 % in der

Niederschlagssumme pro Ereignis, während die Untersuchung von drei räumlich weiter auseinanderliegender Regenschreiber große Differenzen im Intensitätsverlauf aufwies (Abb. 16), wobei die räumliche Varianz sich als unabhängig von der Ereignisdauer erwies.

Deutlicher zeigt sich die räumliche Variabilität des Niederschlags bei der Betrachtung einer Radarrasterkarte, wie sie von Becker u. Geiger (1983) beispielhaft angegeben wurde (Abb. 17). Deutlich sind die Intensitätsschwankungen benachbarter Raderfelder zu erkennen, die in Größenordnungen von 20-30 % liegen.

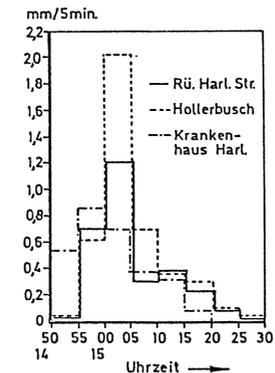


Abb. 16: Vergleich punktuell gemessenen Niederschlages dreier Meßstationen (aus Becker, Geiger 1983)

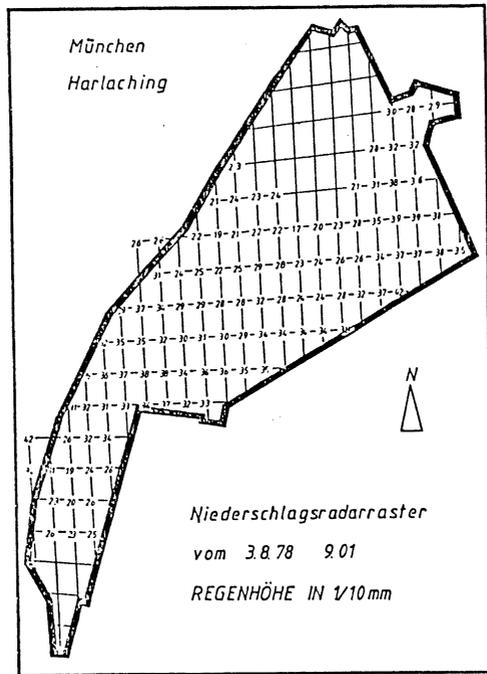


Abb. 17: Räumliche Variabilität eines Ereignis-Zeitpunktes anhand der Angaben der Regenhöhen (aus Becker, Geiger 1983)

Für Untersuchungen mit der Fragestellung, welche Vorteile die flächenhafte Regennmessung gegenüber der Messung an einzelnen Punkten hat, sind größere Ereignisse mit starker örtlicher und zeitlicher Variabilität erforderlich. Eine gleichmäßige Überregnung eines Einzugsgebietes, gemessen mit verschiedenen Meßsystemen sollte in etwa gleiche Ergebnisse liefern. Da diese Ereignisse im Rahmen des BMFT-Projektes 'RADAR' noch nicht vorlagen, verwendete Verworn (1989) drei verschiedene künstliche Niederschlagsdatensätze, die auf der Basis des Boye-Radarrasternetzes (Abb. II.17) erstellt wurden. Die Intensitätsverteilung der drei 'Ereignisse' zeigt Abbildung 18.

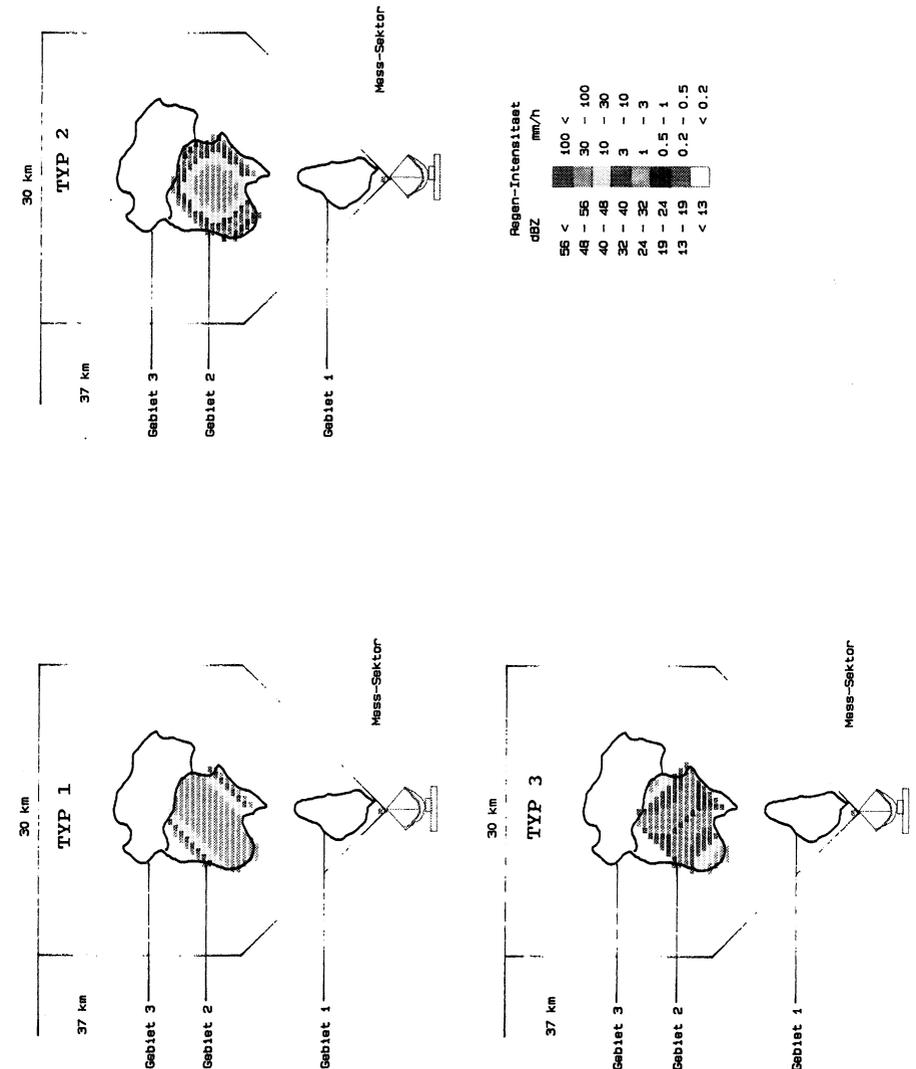


Abb. 18: Intensitätsverteilung künstlicher Niederschlags-Daten

Die untersuchten Varianten bezogen sich auf die unterschiedliche Diskretisierung bei der Ermittlung des Gebietsniederschlags

- für jedes der 54 Teileinzugsgebiete (wie in Abschnitt II.2.5.2 beschrieben). Dies entspricht der größtmöglichen Niederschlags-Diskretisierung. Die ermittelten Abflußdaten dienen als Bezugsgrößen für die folgenden Varianten (EN54).
- für vier Rasterpunkte des Radarnetzes, die den tatsächlichen Standorten der vier Regenschreiber im Einzugsgebiet Boye entsprechen (EG 2, EG 21, EG 45 und EG 52, Abb. II.17). Die Zuordnung zu den Teileinzugsgebieten erfolgt durch das Thiessen-Polygon (GN4).
- für alle Teilgebiete. Es wird der Niederschlag des arithmetischen Mittels der vier Datensätze der vorgehenden Variante (mittlerer Gebietsniederschlag - MGM) angenommen.

Die Simulationen sind mit dem N-A-Modell HYSRAD-EXTRAN durchgeführt worden.

Für den Regentyp 1 (Abb. 18) sind die Unterschiede zwischen den verschiedenen Differenzierungsstufen klein, zumal der Gebietsniederschlag für alle drei Varianten gleich ist. Die Niederschlagsfront durchzieht das gesamte Einzugsgebiet, produziert dadurch überall den gleichen Niederschlag - nur zu unterschiedlichen Zeiten. MGM ergibt nur für die Abflußvolumina und -spitzen zu geringe Werte, da durch den glättenden Effekt der Mittelung die hohen Intensitäten nicht berücksichtigt werden. Es ergeben sich zudem keine Abflüsse von den durchlässigen Flächen, wie bei EN54 und NG4 und der Zeitpunkt des Spitzenabflusses ist um 8 bis 14 Minuten verschoben.

Der Gebietsniederschlagsfehler ist bei Regentyp 2 (Abb. 18) mit 66 % für GN4 und 62 % für MGM beträchtlich hoch und führt beim Abflußvolumen zu Fehlern von 127 % (GN4) bzw. 99 % (MGM); bei den Spitzenabflüssen beträgt der Fehler -12 % (GN4) und 154 % (MGM). Diese Bandbreite ergibt sich aus dem Zusammenwirken der verschiedenen Teilgebiets-Abflüsse und dem Transportprozeß in den Gerinnen.

Der Regentyp 3 (Abb. 18) produziert ausschließlich negative Fehler, d.h. es wird im Vergleich zu EN54 zu wenig (Gebiets-) Niederschlag ermittelt (6.03 mm f. EN54; 1.44 mm f. GN4 und 1.55 mm f. MGM). Auch hier findet die gleiche Verstärkung der Fehler, wie schon bei Typ 2 vom Niederschlag zum Abflußgeschehen hin statt.

Die sich in dieser Untersuchung ergebenden Fehler sind allein auf die unterschiedliche örtliche Auflösung des Niederschlags zurückzuführen, da in allen Fällen mit den gleichen Systemdaten und -parametern gerechnet wurde. Es gibt keine allgemeine Tendenz, ob die Fehler positiv oder negativ werden, d.h. ob mit zunehmender Diskretisierung der tatsächliche Niederschlag unter- bzw. überschätzt wird. Wiederum wird deutlich, daß sich Ungenauigkeiten bei der Niederschlagsermittlung in der Abflußberechnung fortpflanzen und in fast allen Fällen noch verstärkend wirken, besonders wenn Abflüsse von durchlässigen Flächen auftreten.

Ergänzt wird diese Untersuchung durch die Anwendung von tatsächlich gemessenen Ereignissen von 1989 für das Einzugsgebiet der Boye (9 Ereignisse zwischen 4.2 u. 17.2 mm). Wie schon zuvor werden die Daten von ausgewählten Radargitter-Quadraten als Punktwerte verwendet. Es werden drei verschiedene Auflösungen untersucht:

- vier Punkte, identisch mit Variante GN4
- zwei Punkte, entsprechend den zwei Regenschreiber Standorten innerhalb der Teilgebiete EG 21 und EG 45 (Abb. II.17)
- ein Punkt (EG 21) gültig für das gesamte Einzugsgebiet

Die sich ergebenden Abweichungen der N-A-Simulationen (Tab. 29) gegenüber den Ergebnissen mit maximaler Auflösung (entsprechend EN54) sind nicht zu vernachlässigen. Je nach Über- oder Unterschätzung des Niederschlags durch die Datenvergrößerung sind die Abfluß-Diskrepanzen wiederum positiv oder negativ. Selbst geringfügige Abweichungen in der Regensumme und die

daraus resultierenden wesentlich höheren Abweichungen bei den Abflußsummen zeigen die Bedeutung der richtigen Erfassung der Niederschlagsvariabilität. Bei dem einzigen örtlich sehr ungleichmäßigen Ereignis vom 27.08.1989 liegen die Ungenauigkeiten des Gebietsniederschlags bei bis zu 30 % und bis zu 50 % bei den Abflußvolumina. Diese Werte liegen in einer Größenordnung, die allgemein für variable Starkregen-Ereignisse gelten dürfte (BMFT-Projekt 'RADAR', 1990).

| Ereignis Datum | 4 Punkte | | 2 Punkte | | 1 Punkt | |
|-------------------|----------|--------|----------|--------|---------|--------|
| | Geb-N | Abfluß | Geb-N | Abfluß | Geb-N | Abfluß |
| 30.07. | -1.9 | +0.2 | +3.6 | +6.7 | +6.7 | +13.3 |
| 27.08. | -26.1 | -47.1 | -30.5 | -48.4 | -30.5 | -49.8 |
| 06.10. | +0.2 | +5.5 | +6.5 | +7.5 | +6.6 | +7.7 |
| 20.10. | +0.3 | +1.9 | +3.0 | +7.3 | -12.4 | -13.8 |
| 28.10. | -3.6 | -4.3 | -3.1 | -3.7 | -3.6 | -4.6 |
| 04.11. | +0.7 | +3.9 | +7.3 | +7.7 | +6.1 | +8.7 |
| 16.12. | -1.9 | -1.5 | +3.9 | +0.9 | +6.1 | +3.4 |
| 20.12. | -2.3 | -2.0 | -1.5 | -1.7 | -2.1 | -2.3 |
| 22.12. | -1.5 | +0.4 | +4.7 | +1.9 | +8.8 | +6.8 |

Tab. 29: Relative Abweichung bei Verwendung punktueller Meßwerte gegenüber flächenmäßiger Werte

Eine dritte Untersuchung im Rahmen des BMFT-Projektes 'RADAR' bzgl. der Berücksichtigung der Niederschlagsvariabilität ist anhand von Radar-gemessenen Ereignissen von 1990 (13 Ereignisse zwischen 5.7 u. 38.8 mm) durchgeführt worden. In diesem Fall wurde ein rein städtisches Kanalnetz (Bremen, Linkes Weserufer) verwendet und mit dem Radar-Meßsektor überlagert, was zwar bezüglich des Gebietsniederschlags keine wesentliche neuen Erkenntnisse erwarten ließ. Bezüglich der Auswirkungen auf die Abflußberechnung wurden Unterschiede gegenüber dem eher als Mischgebiet anzusehenden Boye Einzugsgebiet vermutet. Als Niederschlagsauflösungs-Varianten wurden ein Radar-Quadrat und drei Radar-Quadrate, entsprechend einem und drei Regenschreibern gewählt. Tabelle 30 zeigt die absoluten Werte für Gebietsniederschlag und Gesamtabfluß für undurchlässige und durchlässige Flächen, sowie die prozentuale Abweichung gegenüber den Ergebnissen der N-A-Simulation (HYSRAD-EXTRAN) auf Grund von

hochaufgelösten Radar-Daten (gebildet nach II.2.5.2). Die Abweichungen betragen beim Niederschlag ± 32 %, beim Abfluß der undurchlässigen Flächen sind es -34 % bis +38 %.

| Vergleich: | RADAR | | | Reduzierung auf 3 Regenschreiber | | | | | | Reduzierung auf 1 Regenschreiber | | | | | |
|------------|---------|----------|----------|----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | IN [mm] | IQu [m³] | IQd [m³] | IN [mm] | Abw. [%] | IQu [m³] | Abw. [%] | IQd [m³] | Abw. [%] | IN [mm] | Abw. [%] | IQu [m³] | Abw. [%] | IQd [m³] | Abw. [%] |
| 02.02.90 | 11,80 | 38021 | 26 | 11,4 | -3,4 | 36574 | -3,8 | 36 | 36,5 | 13,8 | 16,9 | 44474 | 16,9 | 0 | -100,0 |
| 02.02.90 * | 13,10 | 42125 | 5 | | | | | | | 16,6 | 26,7 | 55384 | 31,5 | 206 | 4370,0 |
| 26/28.2.90 | 38,80 | 139622 | 6105 | 38,0 | -2,0 | 140296 | 0,5 | 8785 | 8,4 | 44,8 | 15,5 | 162637 | 16,5 | 15991 | 97,3 |
| 28.02.90 | 12,64 | 39276 | 1 | 13,2 | 4,7 | 42259 | 7,6 | 2 | 55,2 | 13,2 | 4,0 | 42094 | 7,2 | 0 | -100,0 |
| 28.02.90 * | 14,34 | 46754 | 1 | | | | | | | 15,3 | 6,8 | 50345 | 7,7 | 0 | -100,0 |
| 15.04.90 | 14,39 | 45819 | 1094 | 14,7 | 1,9 | 46698 | 1,9 | 1591 | 45,4 | 12,1 | -15,8 | 38178 | -16,7 | 1 | -99,9 |
| 15.04.90 * | 13,11 | 42136 | 111 | | | | | | | 9,4 | -28,2 | 27980 | -33,6 | 0 | -100,0 |
| 07.05.90 | 26,20 | 86845 | 25662 | 29,3 | 11,8 | 98542 | 13,5 | 33270 | 29,5 | 18,1 | -30,9 | 60802 | -30,0 | 5642 | -78,0 |
| 07.05.90 * | 16,40 | 50944 | 5402 | | | | | | | 11,1 | -32,3 | 34261 | -32,7 | 603 | -68,8 |
| 06.06.90 | 5,65 | 14514 | 0 | 5,4 | -4,2 | 13540 | -4,0 | 0 | 0,0 | 7,0 | 7,4 | 15727 | 8,4 | 0 | 0,0 |
| 20.06.90 | 9,10 | 26601 | 28 | 9,0 | -1,1 | 27653 | 3,1 | 3 | -89,2 | 10,9 | 19,8 | 33751 | 25,9 | 0 | -100,0 |
| 27.06.90 | 12,02 | 38401 | 64 | 12,2 | 1,7 | 38906 | 1,3 | 262 | 211,9 | 12,9 | 7,2 | 51085 | 7,0 | 696 | 728,6 |
| 27.06.90 | 7,50 | 21893 | 0 | 8,4 | 6,3 | 24914 | 13,8 | 0 | 0,0 | 9,6 | 21,5 | 26617 | 30,7 | 0 | 0,0 |
| 27.06.90 * | 8,28 | 23656 | 0 | | | | | | | 7,5 | -9,7 | 20844 | -11,9 | 0 | 0,0 |
| 29.06.90 | 7,23 | 19557 | 0 | 7,2 | -0,6 | 19552 | 1,9 | 0 | 0,0 | 7,8 | 7,1 | 21772 | 11,2 | 0 | 0,0 |
| 29.06.90 * | 6,30 | 16500 | 0 | | | | | | | 5,8 | -8,4 | 14632 | -11,3 | 0 | 0,0 |
| 05.07.90 | 6,91 | 18585 | 0 | 6,9 | 0,0 | 19545 | 5,2 | 0 | 0,0 | 8,8 | 27,4 | 25699 | 38,3 | 0 | 0,0 |
| 06.07.90 | 5,99 | 15619 | 0 | 5,3 | -11,5 | 13692 | -13,5 | 0 | 0,0 | 6,4 | 6,9 | 16679 | 7,0 | 0 | 0,0 |
| 06.08.90 | 11,86 | 38474 | 649 | 12,1 | 2,3 | 40670 | 5,7 | 960 | 47,9 | 15,7 | 32,2 | 51080 | 32,8 | 2566 | 395,4 |
| 06.08.90 * | 11,59 | 36843 | 413 | | | | | | | 11,2 | -3,5 | 34631 | -6,0 | 1179 | 285,4 |

Tab. 30: Abweichungen bei Verwendung punktueller Meßwerte gegenüber flächenmäßigen Werten für ein städtisches Einzugsgebiet

Die Werte der Tabelle 30 stellen mittlere Ergebnisse über das gesamte Einzugsgebiet dar. Aussagen zur Niederschlagsvariabilität lassen sich aber nur präzisieren, wenn auch einzelne (besonders interessierende) Teilgebiete betrachtet werden. Hier können sich die fehlenden Niederschlagsinformationen wesentlich dramatischer auswirken. So wird z.B. für das Ereignis vom 07.05.1990 für die Variante '3 RS' (= 29.3 mm) eine Abweichung der Niederschläge von 11.8 % berechnet. Tatsächlich schwanken aber die Summen zwischen 3.5 mm und 46.7 mm. Die Gebietsniederschlags-Berechnung für die drei

'Regenschreiber' für 6.5 mm, 18,1 mm und 45.5 mm führte immerhin zu Abweichungen zwischen -30 % und +418 %. Für die Variante '1 RS' wird das gesamte Einzugsgebiet mit dem gleichen Niederschlag von 18.1 mm belastet, wodurch sich eine Abweichung von -30.9 % im Mittel ergibt, während sich für die einzelnen Teileinzugsgebiete Differenzen zwischen -61 % und +418 % einstellen. Die Fehler bei den Abflüssen sind wie erwartet noch größer und werden immer dort überproportional verstärkt, wo sich die Nicht-Linearität zwischen Niederschlag und Abfluß wegen der Anfangs- und Infiltrationsverluste am deutlichsten bemerkbar macht.

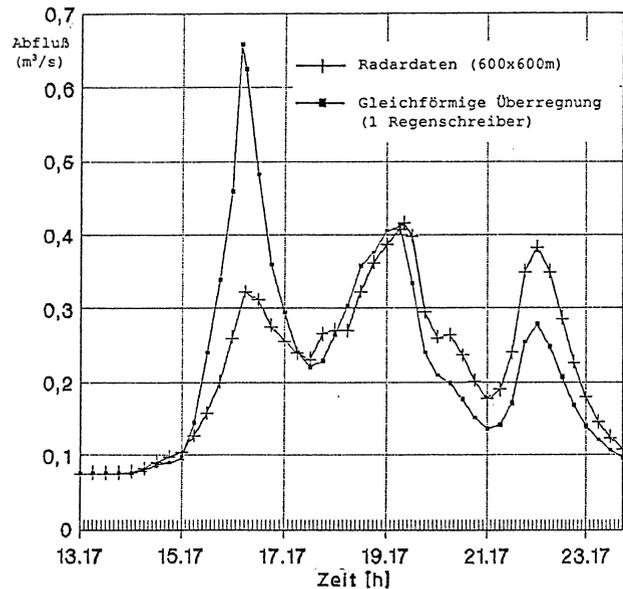


Abb. 19: Vergleich zweier Abflußganglinien auf der Basis von flächenhafter (Radar) und gleichförmiger (1 RS) Überregnung

Die Auswirkungen auf die einzelnen Haltungs-Abflußganglinien sind ebenfalls beträchtlich höher, als es die mittleren Differenzen in Tabelle 30 erscheinen lassen. Abbildung 19 zeigt beispielhaft die Ganglinien für ein Teileinzugsgebiet und verdeutlicht, wie Abweichungen auch innerhalb eines Ereignisses sehr unterschiedlich ausgeprägt sein können. Werden solche Ergebnisse z. Bsp. als Grundlage zur Bewirtschaftung von Stauräumen innerhalb einer Kanalisation herangezogen, so wird deutlich, daß eine unzureichende Niederschlagsinformation zu schlechten, ja sogar falschen Steuerungsentscheidungen führen kann (Verworn, 1991).

Als letzte Untersuchung bzgl. der örtlichen Variabilität der Belastungsgröße 'Niederschlag' wird noch auf die Arbeit von Fuchs, Okroy (1989) eingegangen. Hier wurden ebenfalls Radar-Niederschlagswerte verwendet, und zwar 27 Ereignisse aus dem Jahr 1978, gemessen mit dem C-Band-Gerät der DFVLR, Oberpfaffenhofen über München. Über die 'Kalibrierung' des Radars liegen keine Informationen vor. Da die Daten einem synthetischen Einzugsgebiet überlagert worden sind, spielt dies für die gemachten Aussagen keine entscheidene Rolle. Die ursprünglich in Polar-Koordinaten vorliegenden Daten wurden in kartesische Koordinaten $a \ 300 \times 300 \text{ m}$ umgewandelt, so daß ein quadratisches Radargitternetz von $9 \times 9 = 81$ Radar-Elementen entstand. Die zeitliche Auflösung beträgt bis auf vier Ereignisse eine Minute. Erste N-A-Simulationen ergaben, daß die meisten Ereignisse einen zu geringen Niederschlag aufwiesen, um einen signifikanten Abfluß zu erzeugen. Anhand von zusätzlichem Datenmaterial von fünf Punkt-Meßstationen wurde die mittlere räumliche Variabilität V (Abschnitt II.1.3, II.1.4) der einzelnen Ereignisse wie folgt bestimmt (Schilling, Fuchs 1984) :

$$V = \frac{1}{n} \cdot \sum_{t=1}^n \left[\sqrt{\frac{1}{5} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (N_{i,t} - \bar{N}_t)^2}{\bar{N}_t}} \right]$$

mit :

- n : Anzahl der Niederschlagsintervalle pro Ereignis
- 5 : Anzahl der verwendeten Meßwerte (bzw. Regenschreiber)

$N_{i,t}$: Niederschlagshöhe des i-ten Meßwertes im Niederschlagsintervall t

\bar{N}_t : mittlere Niederschlagshöhe der i Meßwerte im Niederschlagsintervall t

$$\bar{N}_t = \frac{1}{5} \cdot \sum_{j=1}^5 N_{j,t}$$

Die fünf ausgewählten Radar-Meßwerte bzw. Gitterpunkte entsprechen hierbei den Standorten der Regenschreiber. Anhand von Abbildung 20, die die Variabilität der Ereignisse durch zwei unterschiedliche Meßsysteme erfaßt, wird zweierlei deutlich:

* Die Variabilität der Ereignisse wird von beiden Meßsystemen annähernd gleich erfaßt. Dagegen stimmen die Niederschlagshöhen bei weitem nicht überein, da das Radar offensichtlich zu wenig mißt (Falsche R-Z-Beziehung, 'Kalibrierung' !!!).

* Die vorgenommene Verstärkung der Niederschläge durch Multiplikation jedes Zeitintervalls mit einem für ein Ereignis konstanten Faktor verändert die Variabilitätsgröße natürlich nicht, aber die Größenordnung der Regenschreiber-Daten werden besser angeglichen.

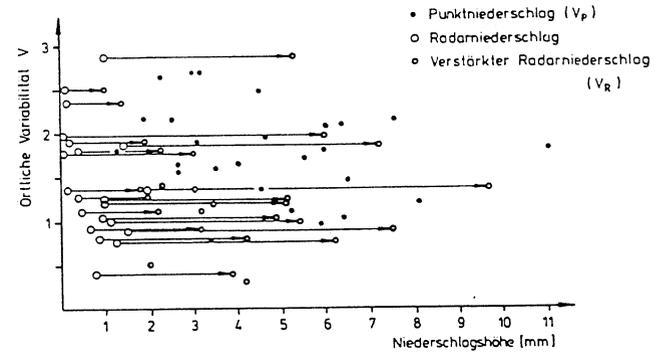


Abb. 20: Vergleich der Variabilität von Punkt-Niederschlägen V_p (5 Regenschreiber) und gemessenen/verstärkten Radarniederschlägen V_R (identische Meßpunkte wie Punkt-Meßgeräte)

Einen Überblick über die Niederschlags-Daten gibt Anlage 15. Die verstärkten Niederschlagsdaten wurden, wie schon angesprochen, einem künstlichen quadratischen Einzugsgebiet überlagert. Für Untersuchungen von Modell-Ansätzen zur N-A-Simulation sind eine Bandbreite von Oberflächencharakteristiken entworfen worden, auf die in diesem Zusammenhang nicht weiter eingegangen wird. Die Ungenauigkeiten bzgl. verschiedener Modell-Komponenten sind in diesem Bericht an anderer Stelle schon ausführlich behandelt worden.

Die Wahl eines quadratischen Einzugsgebietes mit quadratischen Teilgebieten stellt für die Verwendung von Radar-gemessenen Niederschlägen keine Verletzung der Datengenauigkeit dar. Die Zuordnung der ermittelten Radar-Intensitäten kann entweder auf Polar- oder kartesischen Koordinaten erfolgen, wodurch die tatsächliche Einzugsgebiets-Begrenzung immer idealisiert werden muß (Abschnitt II.2.5.2, Abb. II.17). Zudem ist für Berechnungen mit Fein- (und auch Grob-) netzen die Überlagerung einer Radargitterfläche auf ein Teileinzugsgebiet durchaus möglich.

Die Variation der Belastungsgröße 'Niederschlag' wird auch bei dieser Untersuchung durch eine Vergrößerung der räumlichen Diskretisierung erreicht. Ausgehend von 81 'Regenmessern' für 81 Teilgebiete, wird das Gesamt-Einzugsgebiet in 9-, 5-, 3-, 2- und 1-Teileinzugsgebiete unterteilt. In der mittleren Kanalnetzhaltung jeder dieser Teilflächen wird das entsprechende überlagerte Radargitter-Feld als Punkt-Meßgerät interpretiert und zur Gebietsniederschlagsermittlung herangezogen. Tabelle 31 zeigt die sich rechnerisch ergebene Meßnetzdichte für die verschiedenen räumlichen Niederschlagsauflösungen bezogen auf die Gesamt-Einzugsgebietsfläche von 7.29 km² :

| Anzahl d. Meßpunkte | Meßnetzdichte (1/km ²) |
|---------------------|------------------------------------|
| 81 | 11.1 |
| 9 | 1.2 |
| 5 | 0.7 |
| 3 | 0.4 |
| 2 | 0.3 |
| 1 | 0.1 |

Tab. 31: Meßnetzdichte unterschiedlicher Niederschlagsauflösung

Tabelle 32 faßt die Niederschlagssummen der einzelnen Ereignisse für die fünf Niederschlagsdiskretisierungen zusammen :

| Lfd. Nr. | Dateiname | Räumliche Auflösung des Niederschlags | | | | | | Dauer |
|----------|-----------|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | | 81-fach | 9-fach | 5-fach | 3-fach | 2-fach | 1-fach | |
| (-) | (-) | (mm) | (mm) | (mm) | (mm) | (mm) | (mm) | (min) |
| 1 | REG02 | 3.49 | 3.51 | 3.52 | 3.52 | 3.50 | 3.99 | 29 |
| 2 | REG03 | 3.08 | 3.00 | 3.10 | 3.05 | 3.74 | 2.61 | 55 |
| 3 | REG04 | 3.01 | 3.44 | 3.95 | 6.00 | 5.68 | 0.00 | 5 |
| 4 | REG05 | 3.27 | 3.26 | 3.40 | 3.76 | 3.70 | 2.77 | 15 |
| 5 | REG06 | 1.35 | 1.36 | 1.95 | 2.88 | 1.13 | 0.70 | 29 |
| 6 | REG07 | 7.26 | 7.14 | 7.07 | 7.02 | 7.76 | 5.47 | 28 |
| 7 | REG09 | 9.64 | 9.94 | 9.13 | 10.05 | 10.33 | 6.28 | 162 |
| 8 | REG10 | 4.14 | 4.17 | 4.26 | 4.49 | 4.01 | 3.71 | 71 |
| 9 | REG11 | 3.21 | 3.21 | 3.27 | 3.40 | 3.22 | 2.76 | 168 |
| 10 | REG12 | 3.91 | 3.75 | 3.77 | 3.98 | 4.58 | 2.02 | 16 |
| 11 | REG13 | 6.21 | 6.01 | 6.04 | 6.20 | 5.86 | 5.94 | 31 |
| 12 | REG14 | 7.55 | 7.57 | 7.53 | 8.21 | 8.23 | 4.42 | 24 |
| 13 | REG15 | 2.05 | 2.05 | 2.09 | 2.18 | 2.10 | 1.98 | 44 |
| 14 | REG16 | 4.91 | 4.98 | 4.98 | 5.43 | 5.14 | 3.72 | 30 |
| 15 | REG17 | 5.02 | 5.06 | 4.99 | 5.50 | 5.16 | 3.71 | 49 |
| 16 | REG18 | 2.43 | 2.53 | 2.97 | 3.11 | 2.65 | 1.56 | 31 |
| 17 | REG19 | 5.40 | 5.22 | 5.42 | 6.69 | 6.61 | 3.79 | 48 |
| 18 | REG21 | 5.19 | 5.79 | 4.35 | 5.10 | 5.93 | 0.21 | 62 |
| 19 | REG23 | 2.27 | 2.10 | 1.68 | 1.21 | 2.05 | 2.70 | 9 |
| 20 | REG24 | 2.30 | 2.28 | 2.21 | 2.46 | 2.14 | 1.64 | 128 |
| 21 | REG25A | 1.96 | 2.05 | 1.94 | 1.62 | 1.02 | 2.58 | 16 |
| 22 | REG25B | 1.81 | 1.83 | 2.22 | 2.48 | 1.74 | 1.13 | 35 |
| 23 | REG26 | 5.47 | 5.21 | 5.70 | 6.51 | 6.05 | 3.59 | 29 |
| 24 | REG27 | 5.81 | 5.72 | 1.68 | 4.00 | 5.43 | 0.00 | 38 |
| 25 | REG28 | 4.23 | 4.21 | 4.10 | 4.64 | 4.91 | 3.67 | 25 |
| 26 | REG29 | 1.01 | 0.93 | 0.89 | 1.17 | 1.32 | 0.00 | 45 |
| 27 | REG30 | 1.67 | 1.99 | 1.75 | 2.36 | 1.71 | 0.67 | 8 |
| 28 | REG40 | 17.45 | 17.55 | 17.61 | 16.58 | 16.49 | 19.93 | 39 |
| 29 | REG41 | 20.68 | 20.64 | 21.31 | 22.31 | 20.07 | 18.55 | 71 |

Tab. 32: Niederschlagssummen bei unterschiedlicher räumlicher Auflösung

Deutlich zeigt sich die große Bandbreite an Abweichungen, bedingt durch die Reduzierung der Niederschlagsinformation, die soweit geht, daß ein Ereignis in seiner Summe nicht nur über- bzw. unterschätzt, sondern im Extremfall erst gar nicht erfaßt wird (REG04, REG27 u. REG29 1-fach). Dies ist erneut ein Indiz für den dominierenden Einfluß der räumlichen Niederschlagsvariabilität auf die Genauigkeit der berechneten Abflüsse. Die sich ergebenden mittleren relativen Fehler bei der N-A-Simulation mit einem hydrologischen Modell (ROUTE; Fuchs, Okroy 1989) bzgl. der Abflussummen V, den Spitzenabflüssen P und der Zeit bis zum Spitzenabfluß T sind der Tabelle 33 zu entnehmen.

| Anz. d. Meßpkte. | V | P | T |
|------------------|------|------|------|
| 9 | 0.04 | 0.06 | 0.09 |
| 5 | 0.17 | 0.22 | 0.11 |
| 3 | 0.30 | 0.36 | 0.11 |
| 2 | 0.20 | 0.22 | 0.19 |
| 1 | 0.47 | 0.45 | 0.37 |

Tab. 33: Mittlere relative Fehler bei der N-A-Simulation mit unterschiedlicher räumlicher Niederschlagsauflösung

Bei der Variante '9 Regenmesser' führen die Abweichungen in der Niederschlagssumme zu keinen großen Fehlern, wogegen bei abnehmender Niederschlagsauflösung die Streuung der Einzel-Ergebnisse zunimmt, und damit auch der mittlere relative Fehler. Besonders die Variante '1 Regenmesser' zeigt bei der detaillierten Betrachtung der Ergebnisse einen wichtigen Effekt: bei vier Ereignissen wird kein abflußwirksamer Niederschlag ermittelt. Schon zwei Meßgeräte in diesem Einzugsgebiet -dies entspricht den Empfehlungen der ATV (Schilling, Harms 1983)- bewirken bereits eine wesentliche Verbesserung der Ergebnissenauigkeit gegenüber einem Meßgerät. Da zunächst einmal alle betrachteten Ereignisse auch erfaßt werden, verbessert sich der mittlere relative Fehler auf die Hälfte der Variante '1 Regenmesser'. Eine weitere signifikante Verbesserung der Ergebnisse ist dann erst wieder mit der Variante '9 Regenmesser' zu verzeichnen. Dies könnte einen Hinweis daraufhin geben, daß für das Radarmesetz eine gröbere Rasterung der Flächenelemente (900 x 900 m) möglich wäre. Eine gleichwertige Regenmesser-Netzdichte ist allerdings, wegen des hohen Betriebs- und Wartungsaufwandes, selbst bei fernübertragener, automatischer Registrierung unrealistisch. Zu weiteren, speziell die Einzel-Ergebnisse betreffenden Erläuterungen, sei auf den Bericht und die entsprechenden Anlagen von Fuchs und Okroy, 1989 verwiesen.

Bei den bisher aufgeführten Untersuchungen wurde ausschließlich über die Auswirkung einer fehlenden räumlichen

Niederschlagserfassung gesprochen. Es soll aber auch die Problematik der N-A-Simulation angesprochen werden, die aufgrund einer ungenauen zeitlichen Niederschlagserfassung auftritt. In der Regel werden Niederschlagsdaten analog aufgezeichnet und anschließend digitalisiert oder direkt digital (fernübertragen) gespeichert. Der zeitliche Abstand zwischen zwei Werten (Niederschlagsintervall) kann je nach Erfassungsart bzw. späterer Verwendung der Daten zwischen einer Minute bis hin zu mehreren Stunden liegen. Abbildung 21 zeigt auf welchen Informationsgehalt bei unterschiedlichen Intervallbreiten zurückgegriffen werden kann.

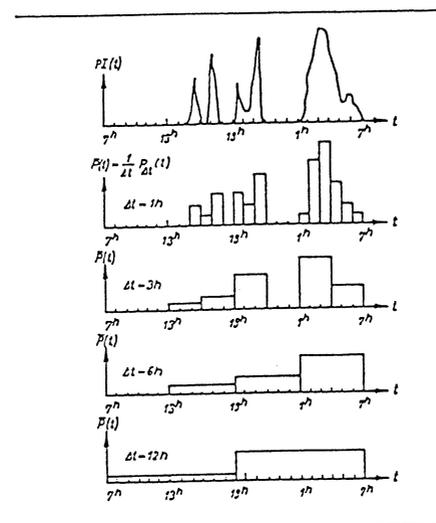


Abb. 21: Niederschlagsinformationen aufgrund unterschiedlicher Registrierungsintervalle

Allgemein wird für stadthydrologische Anwendungen eine Intervallbreite von 5 Minuten als ausreichend angesehen, obwohl ein Registrierungsabstand von einer Minute heute immer mehr gebräuchlich wird.

Das Erfassungsintervall der Radar-Niederschlagsdaten im BMFT-Projekt 'RADAR' beträgt eine Minute, so daß sich diese Daten auch für eine Untersuchung bzgl. der zeitlichen Variabilität von Ereignissen eignen. Innerhalb der oben erwähnten Untersuchung der 13 Ereignisse des Jahres 1990 wird die Vergrößerung der zeitlichen Datenauflösung anhand der Integration der minütlichen Niederschlagswerte zu 5 und 10 Minutenintervallen durchgeführt. Die Gesamt-Niederschlagsmenge wird hierdurch nicht beeinflusst, jedoch geht die zeitliche Variabilität innerhalb der neu gebildeten Intervalle verloren, was in Abweichungen der Oberflächenabflüsse resultiert. Tabelle 34 faßt die Ergebnisse für das Einzugsgebiet Bremen-Linkes Weserufer zusammen. Für die 5-Minuten Intervalle treten bei den undurchlässigen Flächen keine nennenswerten Abweichungen ($\pm 0.01\%$) auf, während sie für die 10-Minuten Intervalle zwischen -7.6 und 0% liegen.

| Vergleich: | RADAR | | | Reduzierung auf 5 Minuten-Intervalle | | | Reduzierung auf 10 Minuten-Intervalle | | | | |
|-------------------------|---------|----------|----------|--------------------------------------|----------|----------|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| | IN [mm] | IQv [m3] | IQd [m3] | IQv [m3] | Abw. [%] | IQd [m3] | Abw. [%] | IQv [m3] | Abw. [%] | IQd [m3] | Abw. [%] |
| 02.02.90 | 11,60 | 38021 | 26 | 38021 | 0,0 | 23 | -12,5 | 38021 | 0,0 | 20 | -25,5 |
| 02.02.90 * | 13,10 | 42125 | 5 | | | | | 42125 | 0,0 | 3 | -32,6 |
| 26/28.2.90 | 38,80 | 139622 | 8105 | 139619 | 0,0 | 5090 | -37,2 | 139619 | 0,0 | 4230 | -47,8 |
| 28.02.90 | 12,64 | 39276 | 1 | 39276 | 0,0 | 0 | -100,0 | 39276 | 0,0 | 0 | -100,0 |
| 28.02.90 * | 14,34 | 46754 | 1 | | | | | 46735 | 0,0 | 0 | -100,0 |
| 15.04.90 | 14,39 | 45819 | 1094 | 45795 | -0,1 | 1036 | -5,3 | 45792 | -0,1 | 970 | -11,3 |
| 15.04.90 * | 13,11 | 42136 | 111 | | | | | 42112 | -0,1 | 66 | -22,7 |
| 07.05.90 | 26,20 | 86845 | 25662 | 86841 | 0,0 | 25560 | -0,4 | 86836 | 0,0 | 25270 | -1,5 |
| 07.05.90 * | 16,40 | 50944 | 5402 | | | | | 50942 | 0,0 | 5072 | -6,1 |
| 06.06.90 | 5,65 | 14514 | 0 | 14514 | 0,0 | 0 | 0,0 | 14514 | 0,0 | 0 | 0,0 |
| 20.06.90 | 9,10 | 26801 | 28 | 26798 | 0,0 | 9 | -67,4 | 26795 | 0,0 | 1 | -97,9 |
| 27.06.90 (1) | 12,02 | 38401 | 64 | 38401 | 0,0 | 0 | -100,0 | 38401 | 0,0 | 0 | -100,0 |
| 27.06.90 (2) | 7,90 | 21893 | 0 | 21871 | -0,1 | 0 | 0,0 | 21855 | -0,2 | 0 | 0,0 |
| 27.06.90 * | 8,29 | 23656 | 0 | | | | | 21855 | -7,6 | 0 | 0,0 |
| 29.06.90 | 7,23 | 19587 | 0 | 19587 | 0,0 | 0 | 0,0 | 19587 | 0,0 | 0 | 0,0 |
| 29.06.90 * | 6,30 | 16500 | 0 | | | | | 16500 | 0,0 | 0 | 0,0 |
| 05.07.90 | 6,91 | 18585 | 0 | 18587 | 0,0 | 0 | 0,0 | 18586 | 0,0 | 0 | 0,0 |
| 06.07.90 | 5,99 | 15819 | 0 | 15819 | 0,0 | 0 | 0,0 | 15819 | 0,0 | 0 | 0,0 |
| 06.08.90 | 11,86 | 38474 | 649 | 38473 | 0,0 | 541 | -16,7 | 38473 | 0,0 | 353 | -45,6 |
| 06.08.90 * | 11,59 | 36843 | 413 | | | | | 36843 | 0,0 | 271 | -34,4 |
| mittlere Abweichung [%] | | | | | -0,02 | | -26,12 | | -0,40 | | -31,27 |

Tab. 34: Abweichungen bei der Verwendung von flächenmäßigen Niederschlags-Daten mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung

Die Werte der Tabelle 34 beziehen sich auf Abweichungen bzgl. des Gebietsniederschlags. Für einzelne Teileinzugsgebiete sind die Differenzen wesentlich größer und weichen vom mittleren Wert nach oben und unten ab (Verworn, 1991). Außerdem sollte nicht unerwähnt bleiben, daß es sich bei der N-A-Simulation um ein Grobnetz des Kanalisationssystems handelt. Wenn man sich nochmals die flächenmäßige Niederschlags erfassung der Abbildung 10 vor Auge hält und sieht, wie schnell ein Ereignis mit hoher zeitlicher und örtlicher Variabilität ein betrachtetes (städtisches) Einzugsgebiet überziehen kann, so können die bisher ermittelten Fehler nur als untere Marge betrachtet werden. Das Zeitintervall für die Messung sollte in jedem Fall so gering wie möglich gehalten werden, um keine für eine Berechnung relevanten Daten zu verlieren.

Fuchs und Okroy (1989) untersuchten die zeitliche Auflösung der Radar-Niederschlagsdaten anhand von 1-, 5- und 10 Minuten Intervallen unter Beibehaltung der größtmöglichen räumlichen Auflösung von einem 'Regenmesser' pro Teileinzugsgebiet (= 81). Die Simulationen erfolgten mit einem hydrologischen Modell (ROUTE, Fuchs, Okroy 1989). Tabelle 35 zeigt anhand der mittleren relativen Fehler, daß die Abweichungen des Abflussvolumens V und der Spitzenabflüsse P praktisch vernachlässigbar sind (4 - 7 %). Für die überwiegende Zahl von Ereignissen wird der Spitzenabfluß aber als zu gering ermittelt. Lediglich die Zeit bis zum Spitzenabfluß T weist einen höheren mittleren relativen Fehler von 11 % bzw. 12 % auf und führt bei der Einzel-Betrachtung der Ergebnisse für drei Ereignisse (REG27, REG40, REG41) zum Einstau des Kanalnetzes.

| Zeitliche N-Auflösung | V | P | T |
|-----------------------|------|------|------|
| 5 min | 0.04 | 0.05 | 0.11 |
| 10 min | 0.04 | 0.07 | 0.12 |

Tab. 35: Mittlerer relative Fehler bei der N-A-Simulation mit unterschiedlicher zeitlicher Niederschlagsauflösung

Die angegebene geringe Fehlermarge erweckt den Eindruck, als ob die zeitliche Variabilität keinen besonderen Einfluß auf die N-A-Simulation ausübt. Anhand der Variabilitätskoeffizienten (Anlage 15) erkennt man aber, daß es sich bei den ausgewählten Ereignissen überwiegend um homogen verlaufende Niederschläge handelt, so daß über mehrere Minuten annähernd die gleichen Intensitäten auftreten. Dies führt bei der Wahl von 5- und 10-Minuten Intervall-Dauern zu keinem entscheidenden Intensitäten-Glättungseffekt gegenüber den ursprünglichen ein-Minuten-Intervallen.

4.4.3 Schlußfolgerungen

Die aufgeführten empirischen Untersuchungen zum Einfluß der räumlichen und zeitlichen Niederschlagsvariabilität zeigten, daß der 'Niederschlag' als Belastungsgröße bei der Niederschlags-Abfluß-Modellierung einen nicht zu unterschätzenden Faktor bildet. Allgemein kann zu den Vorgehensweisen nochmals bemerkt werden, daß die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse bedeutend erhöht wird, wenn örtlich hochaufgelöste Regendaten (Radar) verwendet werden und nur diese Daten für vergleichende Untersuchungen benutzt werden. Hierdurch werden Ungenauigkeiten, bedingt durch die unterschiedlichen Erfassungssysteme (Volumen-gegen Punktmessung), eliminiert. Die Ergebnis-Interpretation ist damit unabhängig von diesem doch gravierenden Einfluß, der sonst zu Ergebnis-Verfälschung führt (damit werden die Schlußfolgerungen weniger angreifbar).

Zusammenfassend ergeben sich folgende Erkenntnisse:

- * Es existieren keine Hinweise, daß die räumliche und zeitliche Niederschlagsvariabilität über kleinen Einzugsgebieten geringer wird.
- * Das Zeitintervall für die Niederschlagserfassung sollte so kurz wie möglich sein, um keine relevanten Daten bzgl. der räumlichen und zeitlichen Intensitätsverteilungen zu verlieren.
- * Punkt-Messungen können Niederschlagsereignisse nur unzureichend oder im Extremfall gar nicht erfassen.
- * Fehler bei der Ermittlung der Niederschlagshöhen sind allgemein größer als 20 %, können aber auch 50 % und mehr Prozent betragen.
- * Je größer die Einzugsgebietsfläche ist, für die ein Punkt-gemessener Wert extrapoliert wird, desto größer sind im Mittel auch die Fehler.
- * Es gibt keine allgemeine Tendenz, ob mit abnehmender Diskretisierung der tatsächliche Niederschlag über- oder unterschätzt wird und sich diese Fehler innerhalb der N-A-Simulation positiv oder negativ auswirken.
- * Fehler beim Niederschlag in der N-A-Simulation pflanzen sich fort und wirken in fast allen Fällen verstärkend:
- *** Solange kein Abfluß von durchlässigen Flächen auftritt, bleibt der Fehler beim Abflußvolumen im vertretbaren Rahmen, da der Abfluß von durchlässigen Flächen eher von der Intensitätsverteilung als von der Niederschlagssumme abhängig ist. Undurchlässige Flächen zeigen dagegen eine Linearität zwischen Niederschlag und Abfluß, da die Verluste geringer, meist am Anfang abgedeckt werden und nicht intensitätsabhängig sind.
- *** Fehler bei den Abflußwerten tendieren mit kleiner werdenden Einzugsgebieten zu größeren Abweichungen. Für größere Gebiete können diese durch Überlagerung von Teilwellen ausgeglichen werden. Besonders wenn die räumliche Variabilität des Niederschlages groß ist, können sowohl positive als auch negative Fehler in den Teilgebieten auftreten, die aber insgesamt zu kleineren Fehlern für das Gesamt-Gebiet führen.

*** Der Wert der Abflußspitzen scheint besonders sensibel gegenüber den Fehlern beim Niederschlag zu sein, da seine Abweichungen oft mehr als 100 % betragen. In bestimmten Fällen kann dieser Fehler jedoch durch den Transportprozeß im Gerinne vermindert werden, falls z.B. Ein- und Überstau dämpfend auftreten.

Anhand der aufgeführten Gesichtspunkte lassen sich bzgl. der Niederschlagsvariabilität folgende Konsequenzen hinsichtlich der Planung, des Betriebs und der Steuerung von Kanalisationen formulieren.

Für Einzelsimulationen von N-A-Ereignissen reichen die meist üblichen Dichten der Niederschlagsmeßstellen nicht aus. Insbesondere dann, wenn es sich um Echtzeit-Anwendungen (Überwachung, Vorhersage, Steuerung) handelt. Punkt-gemessene Niederschlagsdaten mit all ihren Unzulänglichkeiten stehen erst zur Verfügung, wenn sie die Erdoberfläche erreicht haben, müssen zunächst einer Plausibilitäts-Überprüfung unterzogen werden, und können dann für weitere Aufgaben -z.B. als Belastungsgröße für eine N-A-Simulation verwendet werden. Größere städtische Einzugsgebiete sollten daher den Einsatz von Radar-gemessenen Niederschlagsdaten erwägen, um nicht zuletzt den zeitlichen Vorsprung, der sich aus der Messung in der Luft ergibt, zu nutzen. Die erforderliche zeitliche Auflösung der Regendaten ergibt sich aus der Reaktionszeit des Entwässerungssystems (Semke, 1989) und dem Berechnungs-Zeitschritt der N-A-Simulation. Für urbane Gebiete mit kurzen Reaktionszeiten und kleinen Teileinzugsgebieten sollte ein Meß-Intervall von einer Minute auch für fernübertragene Meßgeräte angestrebt werden. Gebietsniederschlagsberechnungen für Punkt-Messungen bedeuten einen erheblichen Informationsverlust, so daß N-A-Modelle verwendet werden sollten, die sowohl räumlich als auch zeitlich hochaufgelöste Daten verarbeiten können. Als weitere Konsequenz hieraus, sollte in den üblichen Bemessungs- bzw. Simulationsverfahren der systematische Fehler, infolge des räumlich-homogenen Niederschlagsansatzes eliminiert werden, da in der Natur auftretenden Verluste nicht gleichmäßig abgedeckt

werden. Schließlich sei noch das Problem vorherrschender Zugrichtungen der Niederschläge erwähnt. Bekannt ist, daß Regen, der mit der Fließrichtung zieht, Abflüsse verschärft und umgekehrt. Falls bestimmte Zugrichtungen eindeutig dominieren, ist es angebracht, diesen Effekt zu quantifizieren und etwa bei der Bemessung mit zu berücksichtigen. Zudem kann die Zugrichtung ein Kriterium für die Übertragbarkeit von Datenmaterial auf andere Gebiete liefern.

LITERATUR-ANGABEN

- Abraham, Ch. et al.; "Grundlegende Untersuchungen zur Ermittlung von Bemessungsregen für die Stadtentwässerung Hamburg", Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover, Heft 37, 1976.
- ATV-Arbeitsblatt A118, 1977.
- ATV-Arbeitsblatt A119, 1984.
- ATV-Arbeitsgruppe 1.2.6. "Hydrologie der Stadtentwässerung, die Berechnung des Oberflächenabflusses in Kanalnetzmodellen", Teil 1 -Abflußbildung, Arbeitsbericht, Korrespondenz Abwasser 2, 1986, S. 157-162.
- ATV-Arbeitsblatt A110, 1988.
- Becker, Geiger, W.; "Vergleich von Punkt- und Radarmessungen des Niederschlags im Einzugsgebiet München-Harlaching", Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover, Heft 52, 1983.
- Becker, Glos; "Grundlagen der Systemhydrologie"; Mitteilung des Instituts für Wasserwirtschaft Berlin, Heft 32; VEB Verlag für Bauwesen-Berlin; 1969.
- BMFT-Forschungsvorhaben 02-WA-85282 "Steuerung von Rückhaltebecken und Pumpwerken zum Zwecke der Abflußregulierung und des Gewässerschutzes mittels Nahbereichs-Radarmessung der Niederschläge", Zwischenberichte 1986 - 1991.
- Bouvier C.; "Analyse et Modelisation des Ecoulements en Milieu Urbain Africain"; Editions de l'ORSTOM, Collection Etudes et Theses; Paris (France); 1990.
- Breuer, L.J.; "Anmerkungen zur Erforschung von Niederschlagsstrukturen mit elektronischen Pulsmeßgeräten", Kleinheubacher Berichte 19, 1976, FTZ, Darmstadt.
- Breuer, L.J.; "X-Band Radar für Regenmessungen in kleinen Einzugsgebieten", Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover, Heft 52, 1983.
- Breuer, L.J.; "Grundlagen der Radarhydrometrie", Zeitschrift für Stadtentwässerung und Gewässerschutz 4, 1988, S. 5-37.
- Bronstein-Semendjajew; "Taschenbuch der Mathematik"; Verlag Harri Deutsch, Thun Frankfurt/Main, 1960.
- Chocat B.; "Un modèle de simulation des écoulements dans les réseaux d'assainissement pluvial"; Thèse de Doctorat, INSA Lyon (France); 304p; 1981.
- Chocat B. et al.; "UDS Design/ the Cedre System", Proceedings of the third Urban Storm Drainage conf., Göteborg (Sweden), June 1984.
- Collier, C.G.; "Accuracy of rainfall estimates by radar-part II : Comparision with raingauge network", Journ. of Hydrology 83, 1986, S. 225-235.
- Cunge, Mazaudou; "Mathematical Modelling of Complex Surcharge Systems: Difficulties in Computation and Simulation of Physical Situations"; p.363-373; Third ICUSD; Göteborg; June 1984.

Desbordes M.; "Réflexions sur les Méthodes de Calcul des Réseaux Urbains d'assainissement"; Thèse D.I; 224p; CNRS AO 9125; Université de Montpellier (France); 1974.

DHI "Danish Hydraulic Institut"; "Documentation for the MOUSE system", March 1989.

Dickmann R.; "Anwendungsbereiche und Grenzen eines detaillierten hydrologischen Kanalnetzrechnungsmodelles", Institut für Wasserwirtschaft, Universität Hannover, Diplomarbeit, 1990.

Diskin M.H; "A basic study of the linearity of the rainfall runoff process in watersheds", Ph.D Thesis, University of Illinois, Urbana (USA), 1964.

Dyck/Peschke; "Grundlagen der Hydrologie", VEB Verlag für Bauwesen, Berlin,p408, 1989.

EPA "Environmental Protection Agency"; "Storm Water Management Model SWMM", Volume I, Final Report, 1971.

Ertel H. (Hrsg. von); "Acta Hydrophysica", Band XIV; Akademie-Verlag, Berlin; 1969/70.

Euler G., Koussis A.; "Berechnung von Hochwasserabläufen mit Näherungsverfahren und ihre Anwendung", Wasserwirtschaft 63, 1973.

Euler G.; "Anwendung des Kalinin-Miljukov-Verfahrens", 5. Fortbildungslehrgang für Hydrologie (DWW), Barsinghausen, 1973.

Euler G.; "ein hydrologisches Näherungsverfahren für die Berechnung des Wellenablaufs in teilgefüllten Kreisrohren", Wasser und Boden, 2 1983.

- Fuchs L.; "Hydrologische Leistungsfähigkeit städtischer Kanalnetze", Mitteilung Heft 63, Institut für Wasserwirtschaft der Uni. Hannover, ISSN 0343-8090, 1987.
- Fuchs, Scheffer; "Lösungsmöglichkeiten des Saint-Venant'schen differential-Gleichungssystems"; SUG Heft 2, Hrsg. von Prof. Dr.-Ing. Sieker, Institut für Wasserwirtschaft, Hannover; Feb. 1988.
- Fuchs L., Okroy R.; "Quantifizierung der Unsicherheit von Abflußberechnungen in städtischen Entwässerungssystemen"; erster Abschlußbericht DFG Si 242/7-2, 1989.
- Fuchs L., Verworn H.-R.; "Mikrocomputer in der Stadtentwässerung-Kanalnetzrechnung, System-Extran Vers.IV.3", ITWH, Hannover, 1990.
- Giré A.; "Modèles mathématiques de systèmes évolutifs héréditaires"; Presses Universitaires de Lyon; 1987.
- Green W.H, Ampt G.A; "Studies on soil physics, part I, the flow of air and water through soils"; J. Agric. Sci., vol.4, no1, pp.1-24; 1911.
- Grotehusmann D., Semke M.; "KMROUT, ein hydrologisches detailliertes Kanalnetzrechnungsmodell"; SUG Heft 13, Nov.1990.
- Grotehusmann D.; "Erarbeitung und Entwicklung eines kombinierten hydrologisch hydrodynamischen Modells zur Langzeitsimulation des Abflußprozesses in städtischen Kanalnetzen unter quantitativen und qualitativen Aspekten"; Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben VW I/62 917; 1991.
- Grottker, M., Schilling, W.; "Urbanhydrologie". Vorlesungsbegleitmaterial, 1989, Gunn, R., Kinzer, G.O.; "The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air". Jou. of Meteorol. 6, 1948, S. 243-248.
- Gutknecht, D.; "Zur Ermittlung der zeitlichen und räumlichen Verteilung von Niederschlägen anhand von Standardbeobachtungen", Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover, Heft 52, 1983.
- Hall M.J.; "Urban Hydrology"; pp-300; Elsevier applied science publisher LTD; 1984.
- Harms, R.W., Verworn, H.-R.: "Hydrologisches Modell zur Berechnung des Abflusses in städtischen Gebieten", Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Universität Hannover, 1983, unveröffentlicht.
- Harms R.; "Grundlage der hydrologischen Berechnung: Abflußbildung Teil 3"; Sammelwerk Hydrologie der Stadtentwässerung; SUG Verlag.
- Horton R.E; "The role of infiltration in the hydrologic cycle", Trans. Am. Geophys. Union, vol.14, pp.446-460, 1933.
- Horton R.E; "Analysis of runoff plot experiments with varying infiltration capacity", Trans. Am. Geophys. Union, vol.20, pp.693-711, 1939.
- Huff, F.A.; "Time distribution of rainfall in heavy storms", Water Res. Res. 3, 1967, S. 1007-1019.
- Huff, F.A.; "Spatial distribution of heavy storm rainfall in Illinois", Water Res. Res 4, 1968, S. 47-54.
- Huff, F.A.; "Time distribution characteristics of rainfall rates", Water Res. Res. 6, 1970, S. 447-454.

- International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar, University of Salford, UK, August 1989, Proceedings.
- Jacquet, G. et al; "About radar rainfall measurement", Forth Int. Conf. on Urban Storm Drainage, Lausanne, 1987.
- Joss, J., Waldvogel, A.; "Ein Spektrograph für Niederschlagstropfen mit automatischer Auswertung", Pure and Appl. Geophys. 68, 1969, S. 240-246.
- Kammer, A.; "An integrated X-band radar system for short range measurements of rain rates in HERP", Proc. Int. Symp. on Hydrological Applications of Weather Radar, University of Salford, UK, Aug. 1989.
- Kammer, A.; "Quantitative Messung der Feinstrukturen von Gebietsniederschlägen mit Radar", Diplomarbeit am Meteorologischen Institut der Universität Bonn, 1982, unveröffentlicht.
- Kreuels, R.K.; "Strukturanalysen und Statistik des Niederschlages auf einminütiger Kurzzeitmeßbasis und das Problem der indirekten Niederschlagsbestimmung mittels Radar", Dissertation, Universität Bonn, 1977.
- Kreuels, R.K.; "Repräsentativität und Genauigkeit von Regenmess-Systemen", Zeitschrift für Stadtentwässerung und Gewässerschutz 4, 1988, S. 39-72.
- Kreuels, R.K.; "On.line Calibration in HERP", Proc. Int. Symp. on Hydrological Applications of Weather Radar, University of Salford, UK, Aug. 1989.
- Kuchling H., "Taschenbuch der Physik"; Verlag Harri Deutsch Thun und Frankfurt/Main, 1989.
- Lautrich R.; "Tabellen und Tafeln zur hydraulischen Berechnung von Druckrohrleitungen Abwasserkanälen und Rinnen", Paul Parey Verlag 2. Auflage.
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA); "Niederschlagsmeßstellennetze", Arbeitsbericht; 1989.
- Maniak u.; "Vergleich von Niederschlag-Abfluß-Modellen", 5. Fortbildungslehrgang für Hydrologie des DVWW Barsinghausen, 1973.
- Maksimovic, Radojkovic; "Urban Drainage Catchments, Selected Worldwide Rainfall-Runoff Data from Experimental Catchments"; Pergamon Press; 1986.
- Marshall, J.S.; Palmer, W.M.K.; "The distribution of rain drops with size", Journ. of Meteorology 5, 1948, S. 165-166.
- Mendel, H.G.; "Die Berechnung von Gebietsniederschlägen", Deutsche Gewässerkundl. Mitteilungen 6/21, 1977, S. 129-141.
- Mendel, H.G.; "Die Berechnung von Gebietsniederschlägen aus Punktmessungen", Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Gaziologie 41, 1979, ETH Zürich.
- Nash J.E; " A unit hydrograph study with particular reference to British catchments", Proc. Institution Civil Eng. 17, Nov. 1960, pp249-282.
- Neumann W.; "Der Oberflächenabfluß in städtischen Einzugsgebieten.- Ein Beitrag zur Kanalnetzberechnung."; Berichte aus Wassergütewirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, TU München, Nr.11; 1976.

- Neumann W.; "Kanalzufluß aus Teilflächen", DVWK 13. Fortbildungslehrgang für Stadthydrologie Oberflächenabfluß, 1981.
- Newsome, D.H.; Collier, C.G.; "COST 73: Weather radar in western Europe - possible hydrological applications", Proc. Int. Symp. on Hydrological Applications of Weather Radar, University of Salford, UK, Aug. 1989.
- Niemczynowicz Janusz; "Areal Rainfall -An improved Input for Modeling of Runoff"; Proceedings of the 3rd USD Conf.; Göteborg (Sweden); 1984.
- Paulsen O.; "Kontinuierliche Simulation von Abflüssen und Stofffrachten in der Trennentwässerung"; Mitteilung Heft 62; Institut für Wasserwirtschaft der Uni. Hannover, ISSN 0343-8090, 1987.
- Philip J.R.; "The theory of infiltration: 1. the Infiltration equation and its solution", Sil Sci., vol. 83, no.5, pp.345-357, 1957.
- Philip J.R.; "Theory of infiltration", in Advances in Hydroscience, ed. by V.T. Chow, vol.5, pp.215-296, 1969.
- Rahlf, H.; "Auswirkungen der Kanalnetzvereinfachung"; Diplomarbeit, Institut für Wasserwirtschaft, Universität Hannover, 1989 (unveröffentlicht).
- Raudkivi A.J.; "Hydrology", Pergamon Press, Oxford, 1979.
- Richards L.A.; "Capillary conduction of liquids through porous mediums", Physics, vol.1, pp.318-333, 1931.
- Riedl, J.; "RADAR - Flächenniederschlagsmessung", promet 2/3, 1986, S. 20-23.
- Ritscher U.; "Ein mathematisch physikalisches Abflußmodell zur Berechnung von Hochwasserabflüssen und Untersuchung des Betriebes von Rückhaltebecken", Dissertation an der Fakultät für Bauwesen der TU Braunschweig, 1971.
- Rosemann H.J. Vedral J.; " Das Kalinin-Miljukov-Verfahren zur Berechnung des Ablaufs von Hochwasserwellen"; Schriftenreihe der Bayerischen Landstelle für Gewässerkunde, Heft 6, München 1970.
- Sato, Mikawa; " A method of estimating runoff from rainfall" Flood control series WMO No9, 1956, pp.152-155.
- Scheffer C.; "Verfahren zur Lösung des Saint-Venant'schen Differentialgleichungssystems für den Wellenablauf in Kanalnetzen"; Diplomarbeit Institut für angewandte Mathematik/ Institut für Wasserwirtschaft, Hannover; 1986.
- Schilling, Fuchs; "A Quantitative Assessment of Uncertainties in Stormwater Modeling"; Proceedings of the 3rd USD Conf.; Göteborg (Sweden); 1984.
- Schilling W.; "Operationelle Stadtentwässerung"; Mitteilung des Institut für Wasserwirtschaft-Hannover, Heft 64; 1986.
- Schilling W. (Hrsg. von); "Anwendungsmöglichkeiten des Kalman-Filter-Verfahrens in der Wasserwirtschaft"; DFG Mitteilung VII der Senatskommission für Wasserforschung; VCH Verlag; 1987.
- Schilling, W., Harms, R.W.; "Räumliche Variabilität von Niederschlag und Abflußbildung - Auswirkungen auf den Abflußprozeß", Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 2, 1983, S. 52-62.

Schilling, W.; "Der Einfluß räumlich variabler Niederschläge auf Kanalisationsabflüsse", 13. Abwassertechnisches Seminar, Berichte des Institutes für Bauingenieurwesen V, TU München, Heft 44, 1983.

Schilling, W., Fuchs, L.; "Quantitative Abschätzung der Ungenauigkeiten bei der Niederschlag-Abfluß-Berechnung", Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover, Heft 56, 1985, S. 227-239.

Schmitt, P.; "Wege zur Automatisierung der Niederschlagsermittlung", Mitteilungen des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart, Heft 55, 1984.

Schultz G.A; "Bestimmung theoretischer Abflußganglinien durch elektronische Berechnung von Niederschlagskonzentration und Retention", Versuchsanstalt für Wasserbau der TH München, Bericht Nr.11, 1968.

Semke M.; "Mathematische Simulation einer zentralen Abflußregelung", Institut für Angewandte Mathematik/Institut für Wasserwirtschaft, Universität Hannover, Diplomarbeit, 1984.

Semke, M.: "From radar-rainfall to hydrological data", Proc. Int. Symp. on Hydrological Applications of Weather Radar, University of Salford, UK, Aug. 1989.

Seus G.J., Rösl G.; "Hydrologische Verfahren zur Berechnung des Hochwasserwellen-Ablaufes in Flüssen", aus "Elektronische Berechnung von Rohr- und Gerinneströmung", hrg. Zielke, Erich-Schmidt Verlag, 1974.

Sevruck, B.; "Methodische Untersuchungen des systematischen Meßfehlers der Hellmann-Regenmesser im Sommerhalbjahr in der Schweiz", Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Gaziologie 52, 1981, ETH Zürich.

Sevruck, B.; "Genauigkeit der konventionellen Regenmessung", Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover, Heft 52, 1983.

Sherman L.K.; " Streamflow from rainfall by the unit-graph method", Eng.News Rec.; vol.108, pp.501-505; 1932.

Sieker F.; "Grundlage der hydrologischen Berechnung: Abflußbildung Teil 1 und Teil 2"; Sammelwerk Hydrologie der Stadtentwässerung; SUG Verlag; 1987.

Sieker F.; "Grundlagen hydrologischer Berechnungen : Abflußkonzentration Teil 1 und Teil 2"; Sammelwerk Hydrologie der Stadtentwässerung; SUG Verlag.

Schwartz L.; "Théorie des Distributions"; Hermann; Paris; 1966.

Thibault S.; "Éléments pour une Phénoménologie en Hydrologie Urbaine"; Thèse Docteur-Ingenieur présentée à l'INSA de Lyon, No I D.I 1.7908; 1979.

Thibault S.; "Modélisation Morpho-Fonctionnelle des Réseaux d'Assainissement Urbain à l'aide du Concept de Dimension Fractale"; Thèse de Doctorat d'Etat présentée à l'INSA de Lyon; INSA; 1989.

- Treiber, B.; "Der Einfluß der Stationsdichte und der Berechnungsmethode auf die Bestimmung des Gebietsniederschlags für ausgewählte Starkregen im Sulmgebiet", Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover, Heft 52, 1983.
- Verworn H.R., Harms R.; "Die Standardeinheitganglinie - eine gebietsübergreifende Systemfunktion "; Wasserwirtschaft 70 (1980) 7+8.
- Verworn W.; "Hydrodynamische Kanalnetzrechnung und die Auswirkungen von Vereinfachungen der Berechnungsgleichungen"; Mitteilung des Institutes für Wasserwirtschaft Hannover, Heft 47; 1980.
- Verworn, H.-R., Flender, W.; "Niederschlagshöhen-Dauerflächenbeziehungen" promet 2/3, 1986, S. 40-45.
- Verworn, H.-R.; "Hydrological Relevance of radar rainfall data", Proc. Int. Symp. on Hydrological Applications of Weather Radar, University of Salford, UK, Aug. 1989.
- Verworn, H.-R.; "Digitalisierung und Regenstatistik", Kursus Begleitmaterial des Inst. für technisch-wissenschaftliche Hydrologie, 1990.
- Verworn, H.-R.; "Genauigkeit von Niederschlagsmessungen mit Radar", Zeitschrift für Stadtentwässerung und Gewässerschutz 14, 1991, S. 17-43.
- Walliser B.; " Systèmes et modèles, Introduction critique à l'analyse des systèmes"; Editions du Seuil, 1977.
- Wöhrle C., Brombach H.; "Probenahme im Abwasserkanal - Sampling in Sewers"; Wasserwirtschaft 81 (1991) 2; pp60-65; 1991.
- Yevjevitch, Barnes; "Flood routing through storm drains; Part I-IV"; hydrology papers, Colorado State University, Fort Collins, USA; 1970.
- Zaiß H.; "Linearspeicheransätze als hydrologische Verfahren zur Abflußberechnung in Kanalnetzen", DVWK 13. Fortbildungslehrgang für Hydrologie, 1981.
- Zemanian A.H; "Distribution theory and transform Analysis"; Mc Graw Hill Book Company; 1965.
- Zielke, Ratke; "Prozeßsimulation, numerische Berechnung von Strömungsvorgängen -ausgewählte Kapitel der Vorlesung, Stand: 10/90"; Institut für Strömungsmechanik Hannover; 1990.
- Zielke, Gärtner; "Strömungsmechanik für Bauingenieur, Vorlesung Teil I"; Institut für Strömungsmechanik Hannover; 1984.
- Zielke, Gärtner, Theunert, Urban; "Strömungsmechanik für Bauingenieur, Vorlesung Teil II"; Institut für Strömungsmechanik Hannover; 1988.
- Zinn H.; "Entwicklung eines Expertensystems zur Kalibrierung eines Niederschlag-Abfluß-Modells"; Institut für Wasserwirtschaft Universität Hannover, DA (nicht veröffentlicht), August 1990.
- Zior F; "Regenwasserabfluß auf Fahrbahnoberflächen - experimentelle und theoretische Untersuchungen", Technische Berichte über Ingenieurhydrologie und Hydraulik, Institut für Wasserbau der Technischen Hochschule Darmstadt, Heft 38, 1987.