

Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 1.2.6 „Hydrologie der Stadtentwässerung“ gemeinsam mit dem DVWK Die Berechnung des Oberflächen- abflusses in Kanalnetzmodellen

Mitglieder dieser Arbeitsgruppe sind:

- Prof. Dr.-Ing. Sieker, Hannover (Sprecher)
- Prof. Dr.-Ing. Billmeier, Köln
- Dipl.-Ing. Böttcher, Arnberg
- Prof. Dr.-Ing. Euler, Darmstadt
- Dipl.-Ing. Fuchs, Hannover
- Dr.-Ing. Gniosdorsch, Frankfurt
- Dipl.-Ing. Königer, München
- Dr.-Ing. Neumann, München
- Dr.-Ing. Pecher, Erkrath
- Dipl.-Ing. Rieger, Hamburg
- Dr.-Ing. Sauerbrey, Mainz
- Dipl.-Ing. Winter, Bremen

Einführung

Bei Kanalnetzmodellen unterscheidet man zwischen den Hauptbestandteilen

- Oberflächenabfluß und
- Kanalabfluß.

Der Oberflächenabfluß gliedert sich weiter in die Bereiche

- Abflußbildung und
- Abflußkonzentration.

Unter „Abflußbildung“ versteht man die Ermittlung der „abflußwirksamen Niederschläge“ oder „Effektivniederschläge“, d. h., vorgegebene (Brutto-)Niederschläge werden um die auftretenden „Verluste“ auf ihre dem Kanalnetz zufließenden Anteile reduziert.

Unter „Abflußkonzentration“ versteht man die Berechnung von Zuflußganglinien zum Kanalnetz unter Vorgabe der abflußwirksamen Niederschläge in bezug auf bestimmte Einzugsgebietsflächen. Letztere können unterschiedlich definiert sein:

- als ein- oder beidseitige Einzugsgebietsfläche je Meter Kanal-länge
- als ein- oder beidseitige Einzugsgebietsfläche einer Kanalhaltung, bezogen auf den untenliegenden Schacht
- als Einzugsgebietsfläche eines Nebensammlers des Kanalnetzes, bezogen auf die Einmündung in den Hauptsammler.

Der erstgenannte Teil des Oberflächenabflusses — die Abflußbildung — wurde bereits in einem Arbeitsbericht behandelt und in KORRESPONDENZ ABWASSER (1986/2) veröffentlicht. Der vorliegende Bericht befaßt sich ausschließlich mit dem zweiten Teil — der Abflußkonzentration.

Teil 2 — Abflußkonzentration

1. Grundlagen der Abflußkonzentration

Bei der Berechnung der Abflußkonzentration unterscheidet man zwischen hydraulischen und hydrologischen Verfahren. Beiden Verfahrengruppen ist gemeinsam, daß der Niederschlag als gleichmäßig verteilt über die wie vor definierten Einzugsgebietsflächen angenommen wird.

Hydraulische Verfahren gehen von der Vorstellung aus, daß sich auf der Oberfläche ein Fließzustand einstellt, der dem Abfluß in einem Rechteckgerinne großer Breite und geringer Tiefe gleichkommt. Die Breite des „Gerinnes“ wird je nach Definition der Einzugsgebietsfläche mit 1 m Kanallänge oder mit einer Haltungs-länge angenommen (vgl. Bild 2). Die „Wassertiefe“ des „Gerinnes“ entspricht der Schichtdicke des Oberflächenabflusses. Die beiden Unbekannten der Berechnung, die Wassertiefe „h“ und der Abfluß „Q“ werden durch Ansatz und Lösung der Kontinuitätsgleichung und der Bewegungsgleichung bestimmt.

Bei hydrologischen Ansätzen wird gegenüber den hydraulischen Verfahren das Übertragungsverhalten zwischen Niederschlag und Abfluß in einem Einzugsgebiet ohne mathematische Beschreibung der physikalischen Vorgänge dargestellt. Sie gehen von der Vorstellung aus, daß in einem unveränderten Einzugsgebiet ein bestimmter abflußwirksamer Niederschlagsverlauf immer wieder die gleiche Abflußganglinie erzeugt. Es wird weiter davon ausgegangen, daß ein proportionaler Anteil des abflußwirksamen Niederschlagsverlaufs zu einem entsprechend proportionalen Anteil des Abflußverlaufs führt. Dieses Prinzip wird mit „Linearität“ bezeichnet. Die Folge dieser Vorgabe ist, daß ein beliebiger abflußwirksamer Niederschlagsverlauf in gleiche Niederschlagsanteile (Einheitsniederschläge) aufgliedert werden kann. Der Einheitsniederschlag wird im allgemeinen zu 1 mm/1 min oder 1 mm/5 min gewählt.

Die aus einem Einheitsniederschlag entstehende gebietscharakteristische Abflußganglinie wird als „Einheitsganglinie“ bezeichnet. Sie soll die Retentions- und Translationseigenschaften des Einzugsgebietes erfassen. Ihre Form ist vom gewählten Zeitintervall abhängig.

Die Proportionalität von Niederschlag und Abfluß führt zum Prinzip der „Superposition“, d. h., wenn zum Beispiel ein abflußwirksamer Niederschlag von 1 mm/5 min eine bestimmte Abflußganglinie in einem Gebiet hervorruft, so führt eine Verdoppelung des Niederschlages auf 2 mm/5 min zu einer Verdoppelung der Ordinaten der Abflußganglinie.

Ein weiteres Prinzip der linearen hydrologischen Betrachtungsweise ist die zeitliche Invarianz. Sie besagt, daß ein um Δt zeitversetzter Niederschlagsverlauf zu einem um Δt versetzten Abflußverlauf führt.

Diese beiden Prinzipien der Superposition und der zeitlichen Invarianz erlauben bei Kenntnis der Einheitsganglinie (= Übertragungsfunktion) eines Gebietes die Konstruktion der Abflußganglinie aus einem beliebigen abflußwirksamen Niederschlagsverlauf (vgl. Bild 1).

Streng genommen ist das Niederschlag-Abfluß-Verhalten eines Einzugsgebietes allerdings ein nichtlinearer Prozeß. Die Nichtlinearität kann jedoch, wie Erfahrungen zeigen, im allgemeinen vernachlässigt werden. Daher werden in der Praxis insbesondere lineare hydrologische Verfahren angewendet. Sie haben den gemeinsamen Grundgedanken, daß es für jede Einzugsgebietsfläche, also z. B. auch für das Einzugsgebiet einer Kanalhaltung, eine charakteristische und unveränderliche Einheitsganglinie gibt, die immer dann entsteht, wenn auf diese Fläche ein örtlich gleichmäßig verteilter Niederschlag fällt.

Zur Bestimmung der Einheitsganglinie wurden verschiedene Modellansätze entwickelt. Sie beruhen vornehmlich auf der Vorstellung, daß sich ein Einzugsgebiet wie ein einzelner oder wie mehrere kaskadenförmig angeordnete Speicher verhält. Eine ausführliche Untersuchung über die Eignung verschiedener hydrologischer Modellansätze findet sich bei NEUMANN (1981). In der

Praxis werden zur Berechnung des Oberflächenabflusses in Siedlungsgebieten u. a.

- der lineare Einzelspeicher (Neumann, 1976)
- die Speicherkaskade (Euler, 1978)
- die Standard-Einheitsganglinie (Harms/Verworn, 1984) verwendet.

Die genannten Ansätze enthalten jeweils einen oder mehrere Parameter, die eine Anpassung der Ansätze an die jeweils vorliegenden Verhältnisse erlauben. Die Parameter werden aus Kenndaten der Einzugsgebiete, wie z. B. Gebietsgefälle, Schwerpunktslage der befestigten Flächen zum Kanal usw., bestimmt. Falls Meßergebnisse vorliegen (synchrone Niederschlags- und Abflußbeobachtungen), lassen sich die Parameter auch durch Auswertung der Messungen berechnen (SIEKER, 1971).

Für den Abfluß von jeder Flächenart (undurchlässig, teildurchlässig, durchlässig) sind jeweils eigene Einheitsganglinien aufzustellen und die jeweils zugehörigen Teilwellen aus den unterschiedlichen abflußwirksamen Niederschlägen zu ermitteln. Die Überlagerung dieser Teilwellen ergibt den Gesamtabfluß einer Einzugsgebietsfläche.

2. Beschreibung der Verfahren

2.1 Hydraulische Verfahren

Die hydraulischen Verfahren beruhen auf der Bewegungs- und der Kontinuitätsgleichung für den instationären, diskontinuierlichen Abfluß auf einer schiefen Ebene (Siehe ATV-Arbeitsblatt A 110). Beim Oberflächenabfluß kann die Bewegungsgleichung wegen der im allgemeinen kleinen Wassertiefen stark vereinfacht werden:

$$J_s - J_r(x, t) = 0 \quad (1)$$

d. h., an jedem Punkt x entlang des Fließweges stellt sich die dem jeweiligen Abfluß entsprechende Normalabflußtiefe ein. Wird für das Reibungsgefälle J_r die Formel von Manning-Strickler eingesetzt, so ergibt sich hieraus

$$q(x, t) = k_{st} \cdot h(x, t)^{5/3} \cdot J_s^{1/2} \quad (2)$$

mit

- x = Wegkoordinate in Fließrichtung (m)
- t = Zeitkoordinate (s)
- $q(x, t)$ = Abfluß an der Stelle x zur Zeit t ($m^3/s \cdot m$)
- $h(x, t)$ = Wassertiefe an der Stelle x zur Zeit t (m)
- k_{st} = Beiwert nach Manning-Strickler ($m^{1/3}/s$)
- J_s = Gefälle der Fläche (-)

Bei Verzicht auf eine örtliche Diskretisierung längs des Fließweges und Annahme einer linearen Zunahme des Abflusses auf der Fließstrecke L kann die mittlere Wassertiefe h_m in Abhängigkeit von der Endwassertiefe h_e angegeben werden (KOENIGER, 1976):

$$h_m = 1/l \cdot \int_0^l h \, dx = 5/8 \cdot h_e \quad (3)$$

Der Abfluß Q_e von der Fläche A berechnet sich damit zu

$$Q_e(t) = A \cdot k_{st} \cdot [8/5 \cdot h_m(t)]^{5/3} \cdot J_s^{1/2} \quad (4)$$

Die Kontinuitätsgleichung läßt sich dann mit $q_e = Q_e/A$ und dem abflußwirksamen Niederschlag $N_w(t)$ wie folgt schreiben:

$$dh_m(t)/dt + q_e(t) - N_w(t) = 0 \quad (5)$$

Für die numerische Lösung wird die Differentialgleichung durch eine Differenzengleichung ersetzt:

$$[h_m(t + \Delta t) - h_m(t)]/\Delta t + 0,5 \cdot [q_e(t) + q_e(t + \Delta t)] - 0,5 \cdot [N_w(t) + N_w(t + \Delta t)] = 0 \quad (6)$$

d. h., bei der Ableitung nach t werden die Mittelwerte über $\Delta x = l$ eingesetzt, während im übrigen Mittelwerte über das Intervall Δt

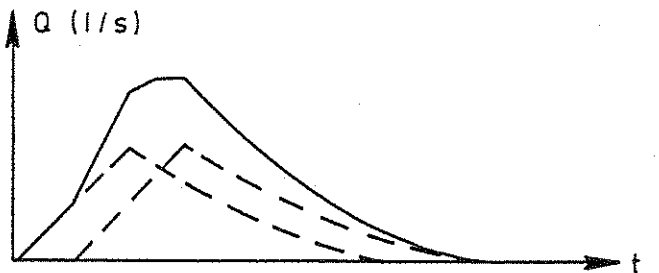
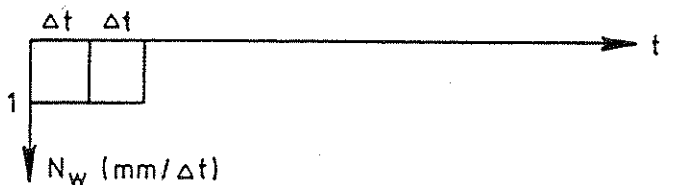
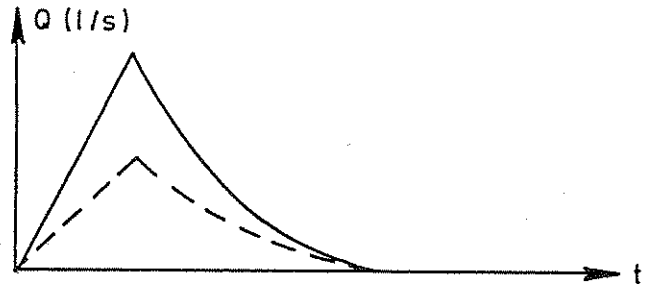
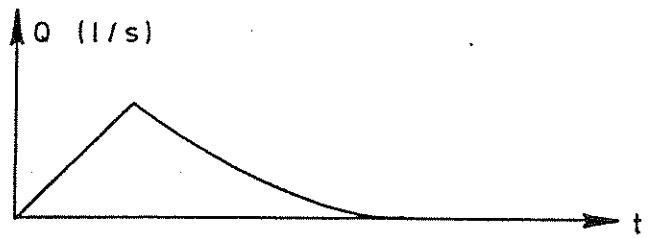
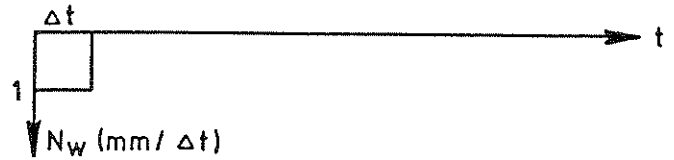


Bild 1 Eigenschaften der Einheitsganglinie

gebildet werden. Die Gleichung wird mit einem iterativen numerischen Verfahren (z. B. Newton) gelöst.

2.2 Hydrologische Verfahren

Entsprechend den Ausführungen im Abschnitt 1 werden im folgenden die drei Verfahren „Linearer Einzelspeicher“, „Speicherkaskade“ und „Standard-Einheitsganglinie“ behandelt. Die Anwendung weiterer Verfahren ist ebenfalls möglich.

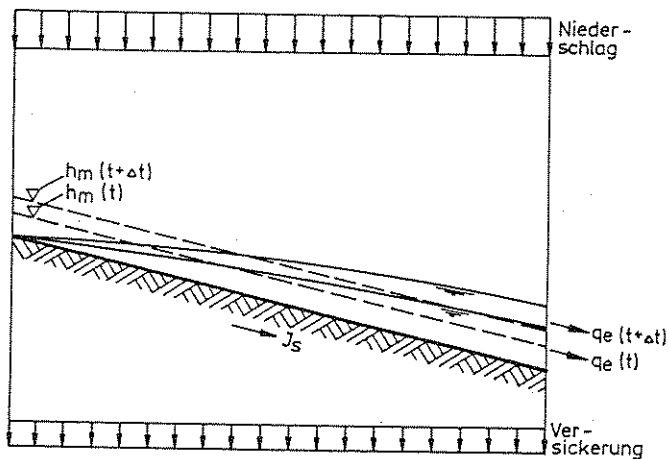
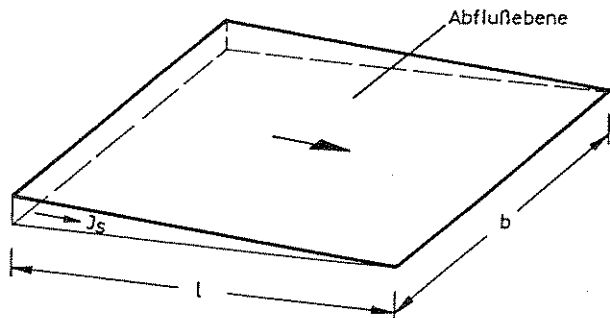


Bild 2 Definitionsskizze zum hydraulischen Verfahren

2.2.1 Linearer Einzelspeicher

Die Einzugsgebietsfläche wird als einzelner Speicher aufgefaßt, dessen Zufluß der abflußwirksame Niederschlag und dessen Abfluß der gesuchte Oberflächenabfluß ist:

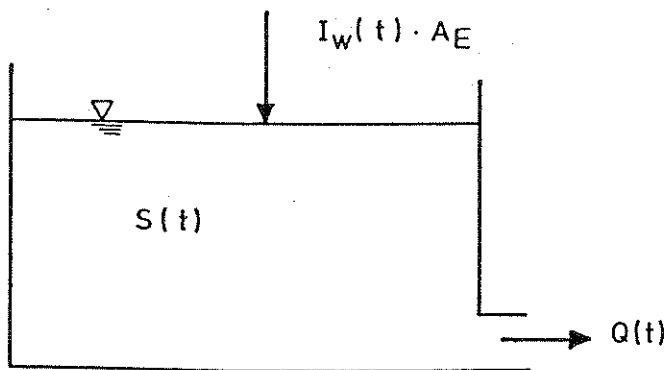


Bild 3 Definitionsskizze zum linearen Einzelspeicher

Es bedeuten:

- $I_w(t)$ = abflußwirksame Niederschlagsintensität (Regenmenge pro Zeitintervall), (m/s)
- A_E = Einzugsgebietsgröße (m²)
- $S(t)$ = Speicherinhalt (m³)
- $Q(t)$ = Abfluß (m³/s)

Die Kontinuitätsgleichung lautet:

$$I_w(t) \cdot A_E - Q(t) = dS/dt \quad (7)$$

Darin ist neben $Q(t)$ zunächst auch die Speicherinhaltsänderung dS/dt unbekannt. Zur Lösung wird der Ansatz:

$$S(t) = K \cdot Q(t) \quad (8)$$

$$\text{bzw. } dS/dt = K \cdot dQ/dt \quad (8a)$$

eingeführt.

Das Einsetzen von Gleichung (8a) in Gleichung (7) führt auf eine Differentialgleichung, die für einen „Blockregen“ der Größe

$$I_w(t) = N_w/\Delta t$$

die folgende Lösung besitzt:

a) für den ansteigenden Ast (vgl. Bild 4):

$$Q(t) = \frac{N_w \cdot A_E}{\Delta t} (1 - e^{-t/K}) \quad (9)$$

Der ansteigende Ast gilt für die Dauer des Blockregens und führt auf den Maximalwert der Abflußganglinie bei $t = \Delta t$.

b) für den fallenden Ast (vgl. Bild 4):

$$Q(t) = \frac{N_w \cdot A_E}{\Delta t} (e^{(\Delta t - t)/K} - e^{-t/K}) \quad (10)$$

Die Speicherkonstante K wird empirisch bestimmt. NEUMANN (1976) gibt folgende Formel an:

$$K = \frac{40 \cdot b^{0,6}}{l^{0,4} \cdot J^{0,4} \cdot k_{st}^{0,6}} \text{ (S)} \quad (11)$$

Es bedeuten:

- K = Speicherkonstante (s)
- $I_w = N_w/\Delta t$ = abflußwirksame Niederschlagsintensität (mm/min)
- b = Breite der Einzugsfläche = Fließweg auf der Oberfläche (m), vgl. Bild 2
- J = Gefälle der Einzugsfläche (-)
- k_{st} = Manning-Strickler-Beiwert (m^{1/3}/s)

Die Dauer des Blockregens Δt (s) in den Gleichungen (9) und (10) sollte $\leq K$ gewählt werden.

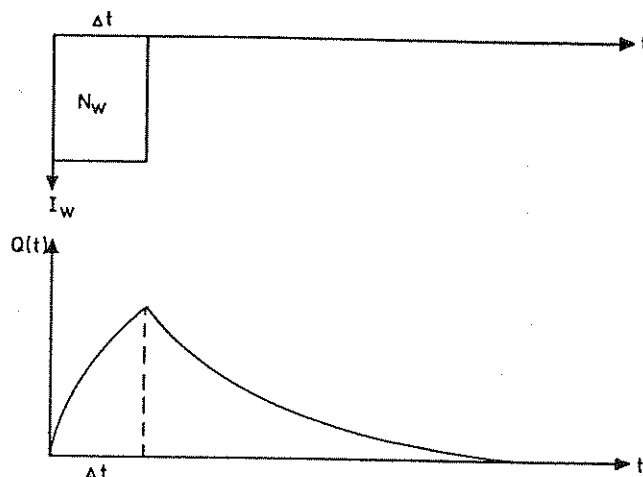


Bild 4 Abflußganglinie des linearen Einzelspeichers

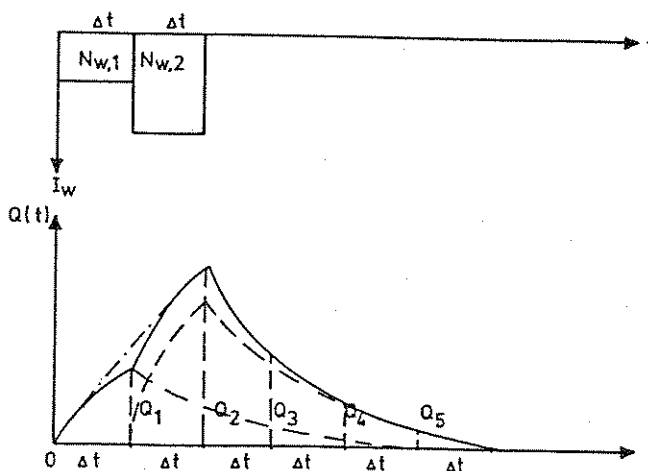


Bild 5 Beispiel für Überlagerungsberechnung beim linearen Einzelspeicher

Für die Berechnung der Abflußganglinie aus mehreren aufeinanderfolgenden Blockregen gleicher Dauer Δt gilt das in Bild 1 dargestellte Superpositionsprinzip. Für ein Beispiel mit zwei aufein-

anderfolgenden Intervallen ist die Berechnung in Bild 5 dargestellt.

$$Q_0 = 0$$

$$Q_1 = \frac{N_{w,1} \cdot A_E}{\Delta t} (1 - e^{-\Delta t/K}) \quad \text{Gl. (9)}$$

$$Q_2 = Q(N_{w,1}; 2 \Delta t) + Q(N_{w,2}; \Delta t)$$

mit Gl. (10):

$$\begin{aligned} Q(N_{w,1}; 2 \Delta t) &= \frac{N_{w,1} \cdot A_E}{\Delta t} (e^{-(\Delta t - 2\Delta t)/K} - e^{-2\Delta t/K}) \\ &= \frac{N_{w,1} \cdot A_E}{\Delta t} (1 - e^{-\Delta t/K}) \cdot e^{-\Delta t/K} \\ &= Q_1 \cdot e^{-\Delta t/K} \end{aligned}$$

und Gl. (9):

$$\begin{aligned} Q(N_{w,2}; \Delta t) &= \frac{N_{w,2} \cdot A_E}{\Delta t} (1 - e^{-\Delta t/K}) \\ &= Q_1 \cdot \frac{N_{w,2}}{N_{w,1}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_3 &= Q(N_{w,1}; 3 \Delta t) + Q(N_{w,2}; 2 \Delta t) \\ &= Q(N_{w,1}; \Delta t) \cdot e^{-2\Delta t/K} + Q(N_{w,2}; \Delta t) \cdot e^{-\Delta t/K} \\ &= Q_1 \cdot e^{-2\Delta t/K} + Q_1 \cdot \frac{N_{w,2}}{N_{w,1}} \cdot e^{-\Delta t/K} \end{aligned} \quad \text{Gl. (10)}$$

$$\begin{aligned} Q_4 &= Q(N_{w,1}; \Delta t) \cdot e^{-3\Delta t/K} + Q(N_{w,2}; \Delta t) \cdot e^{-2\Delta t/K} \\ &= Q_1 \cdot e^{-3\Delta t/K} + Q_1 \cdot \frac{N_{w,2}}{N_{w,1}} \cdot e^{-2\Delta t/K} \end{aligned} \quad \text{Gl. (10)}$$

$$\begin{aligned} Q_5 &= 0 + Q(N_{w,2}; \Delta t) \cdot e^{-3\Delta t/K} \\ &= 0 + Q_1 \cdot \frac{N_{w,2}}{N_{w,1}} \cdot e^{-3\Delta t/K} \end{aligned} \quad \text{Gl. (10)}$$

$$Q_6 = 0 \quad \text{(Sieker)}$$

Für undurchlässige und durchlässige Flächen (vgl. Teil I – Abflußbildung, KORRESPONDENZ ABWASSER 1986/2) werden die Abflußganglinien getrennt ermittelt und danach überlagert. Die Ermittlung der Abflußkonzentration unterscheidet sich insbesondere durch unterschiedliche Werte der Größe k_{st} . NEUMANN (1976) empfiehlt für undurchlässige Flächen $k_{st} = 70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ und für durchlässige Flächen $k_{st} = 70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. (Die empfohlenen Werte gelten auch für hydraulische Verfahren, vgl. Gleichung [2]).

Hinsichtlich der Größen „b“ (Fließlänge auf der Oberfläche) und „J“ (Oberflächengefälle) schlägt NEUMANN (1976) vor, lediglich zwischen den folgenden Stufen zu unterscheiden:

schmal	mittel	breit
b = 20 m	b = 35 m	b = 50 m

flach	mittel	steil
J = 0,004	J = 0,01	J = 0,04

2.2.2 Speicherkaskade

Die Einzugsgebietsfläche wird als Kaskade hintereinandergeschalteter, untereinander gleicher linearer Speicher aufgefaßt, deren Zufluß der abflußwirksame Niederschlag und deren Abfluß der gesuchte Oberflächenabfluß gemäß der Definitionsskizze in Bild 6 ist.

Beim Durchfließen mehrerer Speicher wird die Abflußwelle gedämpft und gestreckt. Die Anzahl „n“ der hintereinander geschalteten Speicher ist damit neben der für alle Speicher gleichen Speicherkonstanten „K“ ein zweiter Parameter zur Umformung des abflußwirksamen Niederschlags in eine den örtlichen Verhältnissen angepaßte Abflußwelle

Nach EULER (1978) lautet die Formel der Abflußganglinie für einen Blockregen N_w bei den hier in Frage kommenden Dauern Δt :

$$Q(t) = \frac{N_w \cdot A_E}{K(n-1)!} \left(\frac{3t}{K}\right)^{n-1} \cdot e^{-t/K} \quad \text{(12)}$$

mit

N_w = abflußwirksamer Niederschlag (m)

A_E = Einzugsfläche (m^2)

K = Speicherkonstante (s)

n = Speicheranzahl (—)

t = Zeitvariable (s)

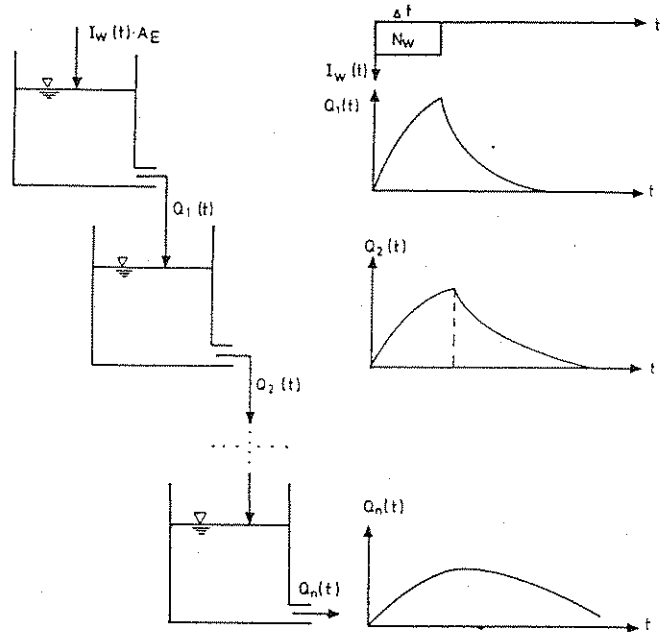


Bild 6 Definitionsskizze zur Speicherkaskade

In der Regel genügt es, für $n = 3$ zu wählen und $K = K_1/n = K_1/3$, wenn K_1 die Speicherkonstante des linearen Einzelspeichers ist nach Gleichung (11).

Dann ergibt sich Gl. (12) zu:

$$Q(t) = \frac{3 \cdot N_w \cdot A_E}{2 \cdot K_1} \left(\frac{3t}{K_1}\right)^2 \cdot e^{-3t/K_1} \quad \text{(12a)}$$

Diese Formel gilt im Gegensatz zum linearen Einzelspeicher sowohl für den ansteigenden wie für den abfallenden Ast der Ganglinie.

Für Einzugsgebiete von Nebensammlern, bei denen in der Abflußkonzentration auch das Abflußverhalten der Rohre enthalten ist, kann nach EULER (1978) ebenfalls $n = 3$ gewählt werden, während K aus der empirischen Beziehung

$$K = 0,25 t_c \quad \text{(13)}$$

folgt. Dabei ist t_c die längste Fließzeit im Einzugsgebiet unter Einfluß der Oberflächenfließzeit, also

$$t_c = t_r + t_a \quad \text{(14)}$$

mit

t_r = längste Fließzeit im Kanal bei Vollfüllung (folgt aus hydraulischer Berechnung)

t_a = Oberflächenfließzeit mit folgenden Richtwerten

- flaches Gefälle: $t_a = 180-300 \text{ s}$
- mittleres Gefälle: $t_a = 120-180 \text{ s}$
- steiles Gefälle: $t_a = 60 \text{ s}$

Die Abflußberechnung bei mehreren aufeinander folgenden Blockregen gleicher Dauer entsprechend der Intervallfolge eines äquidistant geteilten abflußwirksamen Niederschlagsereignisses (vgl. Teil I – Abflußbildung, KORRESPONDENZ ABWASSER 1986/2) erfolgt durch Überlagerungsrechnung analog Bild 1 und Bild 5 und analog zu dem Beispiel des linearen Einzelspeichers.

2.2.3 Standard-Einheitsganglinie

Die Standard-Einheitsganglinie (HARMS/VERWORN, 1984) ist eine dimensionslose, idealisierte Ganglinie entsprechend der Definitionsskizze, Bild 7.

Die, aus der Standard-Einheitsganglinie über die Gleichungen (16) bis (18) gewonnenen ortsspezifischen Kenngrößen Q_p , t_p und K ergeben eine Einheitsganglinie, die auf einen Blockregen von 1 mm mit der Dauer $\Delta t = 1$ min bezogen ist.

Der Verlauf der Einheitsganglinie ist entsprechend Bild 7 zwischen 0 und Q_p linear, der abfallende Ast hat die Funktion

$$Q = Q_p \cdot e^{-(t-t_p)/K} \quad (l/s) \quad (15)$$

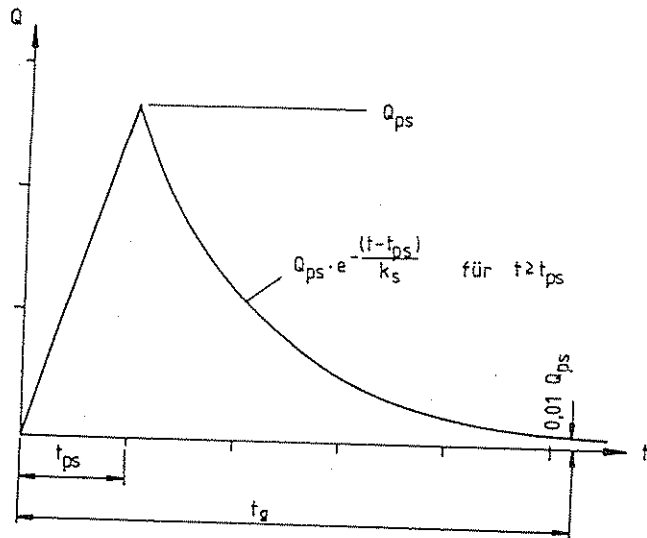


Bild 7 Definitionsskizze zur Standard-Einheitsganglinie

Auf andere Blockregen (mit anderer Dauer oder anderer abflußwirksamer Niederschlagshöhe) bezogene Einheitsganglinien oder Abflußganglinien aus Folgen von abflußwirksamen Niederschlagsintervallen lassen sich nach dem Superpositionsprinzip entsprechend Bild 1 oder entsprechend dem Beispiel in Abschnitt 2.2.1 ermitteln.

Kenngrößen der Standard-Einheitsganglinie sind:

- Scheitelwert Q_{ps} = 0,96 (-)
- Scheitelanstieg t_{ps} = 0,49 (-)
- Speicherkonstante K_s = 0,82 (-)

Aus der Standard-Einheitsganglinie lassen sich dimensionsechte Einheitsganglinien (vgl. Abschnitt 1) nach folgenden Beziehungen errechnen:

- Scheitelwert $Q_p = (Q_{ps} \cdot A_E) / (0,006 \cdot t_L)$ (l/s) (16)
- Scheitelanstiegszeit $t_p = t_{ps} \cdot t_L$ (min) (17)
- Speicherkonstante $K = A_E / (0,006 \cdot Q_p) - t_p / 2$ (min) (18)
- A_E = Einzugsgebiet (ha)
- t_L = Schwerpunktslaufzeit (min)

t_L kann für undurchlässige und durchlässige Flächen nach den folgenden empirischen Gleichungen bestimmt werden:

a) undurchlässige Flächen:

$$t_L = 5 + 0,87 \cdot \ln A_E + 6 \left(l - \left[\frac{l}{2} \right] \right) \quad (\text{min}) \quad (19)$$

Dabei bedeuten:

A_E = undurchlässige Fläche (ha)

l = Haltungslänge (m)

l_f = Fließlänge auf der Oberfläche nach der Formel:

$$l_f = \sqrt{\left(\frac{l}{2} \right)^2 + (c \cdot b / 16)^2} \quad (\text{m}) \quad (20)$$

b = Breite der Einzugsfläche (vgl. Bild 2)

c = Koeffizient zur Berücksichtigung der Schwerpunktslage der undurchlässigen Fläche innerhalb der Gesamtfläche entsprechend Tafel 1 (-)

b) durchlässige Flächen:

$$t_L = 2,3 + 0,4 \frac{l_f^{0,6}}{l_w^{0,4} \cdot J^{0,4} \cdot k_{st}^{0,6}} \quad (\text{min}) \quad (21)$$

mit

l_w = abflußwirksame Niederschlagsintensität (mm/min)

J = Oberflächengefälle (-)

k_{st} = Manning-Strickler-Beiwert ($m^{1/3}/s$)

c	einseitig	zweiseitig			
		1	2	3	4
1	4	2	3	4	2
2	12	6	5	4	5
3	8	3	4	5	4
4	8	5	4	2	4
5	12	4	5	6	6
6	4	4	2	2	3
7	8	2	4	6	4
8	8	5	4	3	4

□ Kanal
• Haltungsfläche

□ Koeffizient für undurchlässige Fläche

□ Koeffizient für durchlässige Fläche

Tafel 1 Koeffizient zur Berücksichtigung der Schwerpunktslage

Die Typisierung „einseitig“ oder „zweiseitig“ bedeutet, daß die Einzugsfläche hauptsächlich auf einer Seite des Kanals oder etwa gleichmäßig auf beiden Seiten liegt. Die Abgrenzung zwischen den beiden Typen kann nach dem Verhältnis der Einzugsbreiten b_1 bzw. b_2 entsprechend Bild 8 erfolgen.

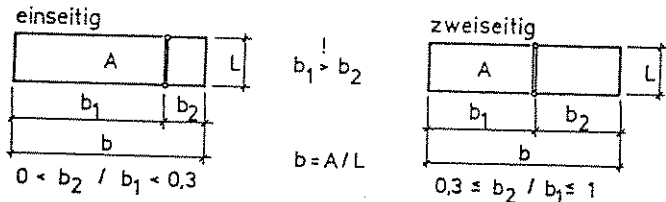


Bild 8 Typisierung von Haltungsflächen

3. Anwendungsbeispiele

3.1 Vergleichende Ermittlung von Einheitsganglinien

Im folgenden soll beispielhaft für eine gegebene Haltungsfläche die Einheitsganglinie, bezogen auf einen Blockregen von $N_w = 1$ mm abflußwirksamen Niederschlag mit $\Delta t = 5$ min Bezugsdauer, nach den vier vorgenannten Verfahren bestimmt werden. Die Haltungsfläche weist folgende Kenndaten auf:

- Haltungslänge $l = 50$ m
- Breite des Einzugsgebietes $b = 50$ m
- Oberflächengefälle $J = 0,01$
- Manning-Strickler-Beiwert $k_{st} = 70$ $m^{1/3}/s$
- einseitige Lage der undurchlässigen Fläche mit zentrischem Schwerpunkt
- die gesamte Fläche sei undurchlässig

3.1.1 Berechnung nach hydraulischem Verfahren

Gebietsdaten: s. oben

Berechnungskennwerte: Zeitschritt: 1 (min)

Simulationsdauer: 40 (min)

Abbruchschranke: 0,01 (-)

Berechnungsergebnis:

3.1.2 Berechnung mit dem Ansatz des linearen Einzelspeichers

Die Speicherkonstante K , wird nach Gl. (11) berechnet. Mit $b = 50$ m, $l_w = 0,2$ mm/min, $J = 0,01$ und $k_{st} = 70$ $m^{1/3}/s$ folgt:

$$K_f = \frac{40 \cdot 50^{0,6}}{0,2^{0,4} \cdot 0,01^{0,4} \cdot 70^{0,6}} = 392 \text{ s}$$

Als Rechenschrittweite wird aus Gründen der Einheitlichkeit (vgl. 3.1.1) $\Delta t = 60$ s gewählt, der effektive Niederschlag beträgt $N_w = 0,001$ m. Um eine Einheitsganglinie auf der Basis von

Berechnungsergebnis:

t (min)	N _w (mm)	Q _E (l/s)	h _m (mm)
1	0,2	0,5	0,19
2	0,2	1,46	0,37
3	0,2	2,59	0,52
4	0,2	3,70	0,65
5	0,2	4,70	0,75
6	0,0	3,69	0,64
7	0,0	2,96	0,57
8	0,0	2,42	0,50
9	0,0	2,01	0,45
10	0,0	1,69	0,40
.....			
15	0,0	0,82	0,26
.....			
20	0,0	0,47	0,19
.....			
25	0,0	0,30	0,14
.....			

Tafel 2 Hydraulisches Verfahren: Einheitsganglinie bezogen auf 1 mm/5 min

0,001 m/5 min zu erhalten, werden fünf Einheitsganglinien auf der Basis von 0,001 m/1 min um je 1 min zeitversetzt überlagert, und die erhaltenen Ordinaten durch 5 dividiert.

Die Funktionswerte des ansteigenden Astes zwischen 0 und 60 s werden nach Gl. (9) berechnet, die des abfallenden Astes für t > 60 s nach Gleichung (10). Dabei wird eingesetzt:

$$N_w = 0,001 \text{ m}; A_E = 2500 \text{ m}^2; \Delta t = 60 \text{ s}; K_1 = 392 \text{ s}$$

Zum Beispiel ergibt sich der Maximalabfluß für t = 60 s nach Gl. (9) zu:

$$Q(60) = \frac{0,001 \cdot 2500}{60} (1 - e^{-60/392}) = 0,0059 \text{ m}^3/\text{s}$$

Die Fläche unter der Einheitsganglinie, also das Abflußvolumen der Einheitsganglinie, muß dem abflußwirksamen Niederschlag, hier = 1 mm auf 2500 m² = 2500 l, entsprechen.

Die näherungsweise Integration der Wertetabelle nach der Trapezregel ergibt einen Wert geringfügig unter 2500 l.

Die Kontrolle der Volumenbilanz sollte in jedem Falle durchgeführt werden.

3.1.3 Berechnung mit dem Ansatz der Speicherkaskade

Es gilt Gleichung (12a) mit den Werten:

$$\begin{aligned} N_w &= 0,001 \text{ m in } \Delta t = 1 \text{ min} = 60 \text{ s}; \\ A_E &= 2500 \text{ m}^2 \\ K_1 &= 392 \text{ s (nach Abschnitt 3.1.2)} \\ K &= K_1/3 = 130 \text{ s} \end{aligned}$$

Für die Rechenschrittweite muß gelten: $\Delta t \leq K$

Es wird daher mit $\Delta t = 1 \text{ min}$ gerechnet. Der zugehörige abflußwirksame Niederschlag beträgt (s. o.) 0,001 m. Um eine Einheitsganglinie auf der Basis von 0,001 m/5 min zu erhalten, werden fünf Einheitsganglinien auf der Basis von 0,001 m/1 min um je 1 min zeitversetzt überlagert und durch 5 dividiert. Gleichung (12a) für 0,001 m/1 min:

$$Q(t) = \frac{0,001 \cdot 2500}{130 \cdot 2} \cdot \left(\frac{t}{120}\right) \cdot e^{-t/120} \cdot 1000 \text{ (l/s)}$$

Tafel 4 gibt Funktionswerte dieser Einheitsganglinie in 1-min Schritten an.

t (min)	Q ₁ (t)	Q ₂ (t)	Q ₃ (t)	Q ₄ (t)	Q ₅ (t)	Q _G (t):5
1	5,91	0,0	0,0	0,0	0,0	1,18
2	5,07	5,91	0,0	0,0	0,0	2,20
3	4,35	5,07	5,91	0,0	0,0	3,07
4	3,74	4,35	5,07	5,91	0,0	3,82
5	3,21	3,74	4,35	5,07	5,91	4,46
6	2,75	3,21	3,74	4,35	5,07	3,82
7	2,36	2,75	3,21	3,74	4,35	3,28
8	2,03	2,36	2,75	3,21	3,74	2,82
9	1,74	2,03	2,36	2,75	3,21	2,42
10	1,49	1,74	2,03	2,36	2,75	2,07
.....						
15	0,69	0,81	0,94	1,10	1,28	0,96
.....						
20	0,32	0,38	0,44	0,51	0,60	0,45
.....						
25	0,15	0,17	0,20	0,24	0,28	0,21
.....						
30	0,07	0,08	0,09	0,11	0,13	0,10

Tafel 3 Linearer Einzelspeicher: Überlagerung von fünf Einheitsganglinien mit je 1,0 mm/min zu einer Einheitsganglinie mit 1 mm/5 min

t (min)	Q(t) (l/s)	t (min)	Q(t) (l/s)
1	1,29	11	1,55
2	3,26	12	1,16
3	4,62	13	0,86
4	5,17	14	0,63
5	5,09	15	0,45
6	4,62	16	0,33
7	3,97	17	0,23
8	3,27	18	0,16
9	2,61	19	0,11
10	2,03	20	0,08

Tafel 4 Funktionswerte der Speicherkaskade bezogen auf 1,0 mm/min

Die Einheitsganglinie der Speicherkaskade, bezogen auf 1 mm/5 min, ergibt sich durch zeitversetzte (um je 1 min) Überlagerung und anschließende Division der Funktionswerte durch 5 entsprechend Abschn. 3.1.2. Die Werte sind in Tafel 5 zusammengestellt.

t (min)	Q(t) (l/s)	t (min)	Q(t) (l/s)
1	0,26	11	2,68
2	0,91	12	2,12
3	1,83	13	1,64
4	2,87	14	1,24
5	3,89	15	0,93
6	4,55	16	0,68
7	4,69	17	0,50
8	4,42	18	0,36
9	3,91	19	0,26
10	3,30	20	0,18

Tafel 5 Funktionswerte der Speicherkaskade bezogen auf 1 mm/5 min (durch Überlagerung berechnet)

3.1.4 Berechnung nach dem Verfahren der Standard-Einheitsganglinie

Die Berechnung erfolgt nach den Gleichungen (20) und (19) sowie (16), (17) und (18).

Der c-Wert in Gl. (20) ergibt sich in diesem Beispiel – einseitige Lage der undurchlässigen Fläche mit zentrischem Schwerpunkt – zu $c = 8$. Damit wird mit $b = 50$ m und $l = 50$ m:

$$l_1 = \sqrt{(50/2)^2 + (8 \cdot 50/16)^2} = 35,36 \text{ m}$$

Die Schwerpunktslaufzeit t_L folgt aus Gleichung (19) zu:

$$t_L = 5 + 0,87 \cdot \ln 0,25 + 6(1 - [50/2 \cdot 35,36]) = 5,55 \text{ min}$$

Die Kenngrößen Q_p , t_p und K ergeben sich aus den Gleichungen (16) bis (18) zu:

$$Q_p = (0,96 \cdot 0,25)/(0,006 \cdot 5,5) = 7,21 \text{ l/s}$$

$$t_p = 0,49 \cdot 5,5 = 2,72 \text{ min}$$

$$K = (0,25/0,006 \cdot 7,2 - 3/2) = 4,27 \text{ min}$$

Für den ansteigenden Ast wird entsprechend Bild 7 ein linearer Verlauf angenommen, wobei der Maximalwert bei $t = 3$ min angesetzt wird. Der absteigende Ast ergibt sich aus Gleichung (15) zu:

$$Q(t) = 7,21 \cdot e^{-(t-3)/4,27} \text{ (l/s)}$$

Die sich daraus ergebenden Funktionswerte sind in Tafel 6 zusammengestellt.

t (min)	Q(t) (l/s)	t (min)	Q(t) (l/s)
1	2,40	11	1,11
2	4,80	12	0,88
3	7,21	13	0,70
4	5,71	14	0,55
5	4,52	15	0,44
6	3,58	16	0,35
7	2,83	17	0,27
8	2,24	18	0,22
9	1,78	19	0,17
10	1,41	20	0,14

Tafel 6 Funktionswerte aus der Standard-Einheitsganglinie berechnet, bezogen auf 1,0 mm / min

Die Standard-Einheitsganglinie ist per Definition auf einen Blockregen der Dimension 1 mm / 1 min bezogen. Man erhält eine Einheitsganglinie mit der Bezugsbasis 1 mm / 5 min, in dem man fünf Einheitsganglinien der erstgenannten Art entsprechend Abschn. 3.1.2 mit je 1 min zeitversetzt einander überlagert und die erhaltenen Ordinaten durch 5 dividiert. Tabelle 6 zeigt das Ergebnis.

t (min)	Q(t) (l/s)	t (min)	Q(t) (l/s)
1	0,48	11	1,87
2	1,44	12	1,48
3	2,88	13	1,17
4	4,02	14	0,93
5	4,93	15	0,74
6	5,16	16	0,58
7	4,77	17	0,46
8	3,77	18	0,37
9	2,99	19	0,29
10	2,37	20	0,23

Tafel 7 Funktionswerte aus der Standard-Einheitsganglinie bezogen auf 1 mm / 5 min (durch Überlagerung berechnet)

3.2 Vergleich der Einheitsganglinien

Bild 9 zeigt den Vergleich der nach den vier verschiedenen Methoden ermittelten Einheitsganglinien, bezogen auf das in Abschnitt 3.1 gegebene Beispiel mit einem (abflußwirksamen!) Bezugsregen von jeweils 1 mm / 5 min.

Die Kurven stimmen hinsichtlich des Scheitelwertbetrages relativ gut überein (zwischen 4,46 und 5,16 l/s). Der Zeitpunkt des Scheitelwertes schwankt zwischen 5 min (Hydraulisches Verfahren und Einzelspeicher) und 7 min (Speicher-Kaskade). Der Scheitelwert der Standard-EGL liegt bei 6 min.

Recht deutliche Unterschiede treten beim Verlauf des absteigenden Astes auf: Während Hydraulisches Verfahren und Einzelspeicher nach dem Scheitelwert einen relativ raschen Abfall, dafür jedoch einen langen Auslauf besitzen (beim Zeitpunkt 20 min beträgt der Abfluß noch ca. 10 % des Scheitelwertes), ist die Einheitsganglinie bei der Speicher-Kaskade und bei der Standard-Einheitsganglinie im Scheitelpunkt breiter angelegt, strebt dafür jedoch rascher gegen Null.

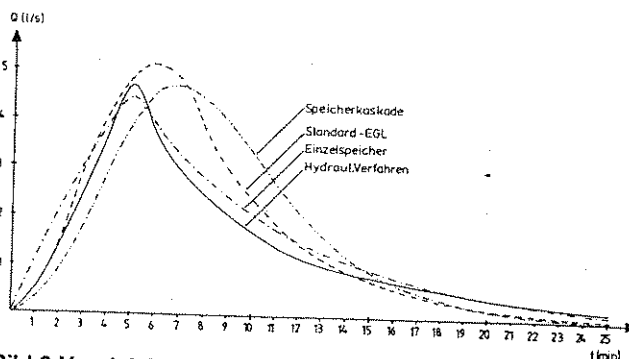


Bild 9 Vergleich der Einheitsganglinien bezogen auf 1 mm / 5 min

Das Integral der verschiedenen Einheitsganglinien muß im vorliegenden Falle, da sie sich alle auf dieselbe Fläche und denselben Niederschlag beziehen, gleich sein, hier = 2 500 l. Hinsichtlich einer Wertung der verschiedenen Ansätze ist festzustellen, daß die Unterschiede zwar bei einer einzelnen Haltungsfäche deutlich sind, daß diese jedoch bei der Überlagerung der Abflüsse verschiedener Haltungen unter Berücksichtigung der Fließvorgänge im Kanal geringer werden, so daß jeder der vorgenannten Ansätze zur Anwendung kommen kann.

Literatur

- [1] ATV: Arbeitsbericht der ATV/DWK-Arbeitsgruppe 1.2.6 „Hydrologie der Stadtentwässerung“. Die Berechnung des Oberflächenabflusses in Kanalnetzmodellen, Teil I – Abflußbildung, KORRESPONDENZ ABWASSER 1986/2, S. 157–162
- [2] Neumann, W.: Der Oberflächenabfluß in städtischen Einzugsgebieten – Ein Beitrag zur Kanalnetz-berechnung, Berichte aus Wassergütwirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, Technische Universität München, Heft Nr. 11, 1976
- [3] Euler, G.: Regenabflußwellen aus Siedlungsgebieten und deren Verlauf im Vorflur. Beitrag zum Symposium „Regenwetterabflüsse“, Haus der Technik, e. V. und Lehrstuhl und Institut für Siedlungswasserwirtschaft der TH Aachen, Essen, 1978
- [4] Harms, R. W.; Verworn, H. R.: HYSTEM – Ein hydrologisches Stadtentwässerungsmodell, Teil 1: Modellbeschreibung, KORRESPONDENZ ABWASSER, 1984/2, S. 112–117
- [5] Neumann, W.: Kanalzufluß aus Teilflächen, 13. Fortbildungslehrgang für Hydrologie des DWVK, Bad Herrenalb, 1981
- [6] Sieker, F.: Hydrologische Bestandsaufnahme sanierungsbedürftiger Kanalnetze mittels Hochrechnung zeitlich begrenzter Messungen, Gas- und Wasserfach, 1971/10
- [7] Königer, W.: Nichtlineare hydrologische Modelle in der Stadtentwässerung, Gas- und Wasserfach – Wasser/Abwasser 1972/9