

Weiterentwicklung der Langzeit-Seriensimulation des Niederschlag-Abfluß-Prozesses für kanalisierte und natürliche Einzugsgebiete

Von Joachim Sartor

Zur Durchführung einer parallelen Langzeit-Seriensimulation für kanalisierte und natürliche Einzugsgebiete sind zunächst Kriterien erforderlich, welche zur Auswahl der maßgebenden Starkregenereignisse aus einer kontinuierlichen Niederschlagsreihe führen. Weiterhin wird von Untersuchungsergebnissen berichtet, in deren Rahmen u. a. fünf gängige Abflußbildungsansätze auf ihre Eignung für solche Simulationsrechnungen getestet und teilweise modifiziert wurden. Letztlich wird ein Verfahren zur indirekten Berücksichtigung von Ein- und Überstauwirkungen bei der hydrologischen Kanalnetzsimulation vorgestellt.

1 Einleitung

Die Wechselwirkungen zwischen kanalisierten und natürlichen Einzugsgebieten können u. a. zu folgenden Problemen führen:

- Qualitätseinbußen des Gewässers durch Mischwasserüberläufe
- hydraulische Überlastung kleiner Gewässer durch extreme Regenwasserabflüsse aus Siedlungsgebieten und
- Einstau der Aus- und Überläufe des Kanalnetzes durch hohe Gewässerstände und eventuelles Eindringen von Hochwasser in die Kanalisation.

In vielen Fällen ist die Langzeitsimulation beider Abflußkomponenten die einzige Möglichkeit die Auftrittshäufigkeit solcher Ereignisse zu bestimmen und die Effektivität von Sanierungsmaßnahmen zu untersuchen. Sofern sich die Fragestellung auf Hochwasserabflüsse beschränkt, bietet die (in [2] definierte) Seriensimulation Vorteile gegenüber der Kontinuumsimulation. Die Seriensimulation erfordert

- keine Kalibrierung der Parameter für Niedrig- und Mittelwasserperioden sowie
- geringere Rechenzeiten bzw. erlaubt kleinere Simulationszeitschritte, um die Abflußspitzen besser erfassen zu können.

Für die parallele Simulation beider Einzugsgebietstypen empfiehlt es sich jedoch, an einigen klassischen Modellansätzen Verbesserungen vorzunehmen. Im folgenden wird von Untersuchungen zu dieser Problematik aus [12] berichtet.

2 Kriterien für die Ereignisauswahl

Die Auswahl maßgebender Ereignisse aus einer kontinuierlichen Regenreihe sollte alle Niederschlagsganglinien erfassen, welche in natürlichen und/oder kanalisierten Gebieten zu mindestens einjährigen Abflüssen führen. Diese Bedingung wird von den folgenden Kriterien erfüllt,

wobei bereits die Überschreitung eines dieser Grenzwerte zur Auswahl des betreffenden Ereignisses ausreicht:

- $\max I \geq 5 \text{ mm/15 min}$
- $h_N \geq 10 \text{ mm}$ und $\max I \geq 7,5 \text{ mm/h}$
- $h_N \geq 15 \text{ mm}$ und $\max I \geq 5 \text{ mm/h}$
- $h_N \geq 20 \text{ mm}$

mit

h_N : Gesamtniederschlagshöhe des Ereignisses

$\max I$: Maximal auftretende Intensität innerhalb des Ereignisses

Die so nicht berücksichtigten Daten (zwischen zwei maßgebenden Ereignissen) können z. B. durch einen Vorregenindex berücksichtigt werden. Der Auswahlprozeß wird wesentlich durch die Grenzpause GP zur Definition zweier unabhängiger Ereignisse und durch die Grenzintensität GI beeinflusst (**Bild 1**). Regenintensitäten bis zu $GI = 0,01 \text{ mm/15 min}$ können bei der Auswahl maßgebender Ereignisse wie Regenspauzen behandelt werden. Die Dauer von GP sollte folgende Mindestwerte nicht unterschreiten:

- 4 Stunden
- die doppelte Konzentrations- bzw. Fließzeit der beiden Einzugsgebiete
- die Entleerungszeit aller Rückhalteräume.

Der auch in [4] verwendete Wert von $\min GP = 4 \text{ h}$ stützt sich auf [13], wo anhand eines Berechnungsbeispiels gezeigt wird, daß sich die sommerlichen Starkregenereignisse der dort gewählten Reihe ab diesem Wert als statistisch unabhängig erweisen.

Eine Verifikation dieser Kriterien ist dadurch gegeben, daß sie zur Auswahl aller Niederschlagsereignisse führten, die in den drei in **Tab. 1** enthaltenen überwiegend natürlichen Einzugsgebieten sowie in den acht in **Tab. 2** dargestellten Kanalnetzen Abflußereignisse größer oder gleich dem kleinsten Jahreshöchstabfluß bewirken. Während für die Kanalnetze die Ergebnisse einer Kontinuumsimulation über jeweils rund 200 Jahre als Vergleichskriterium dienten, wurden für die natürlichen Gebie-

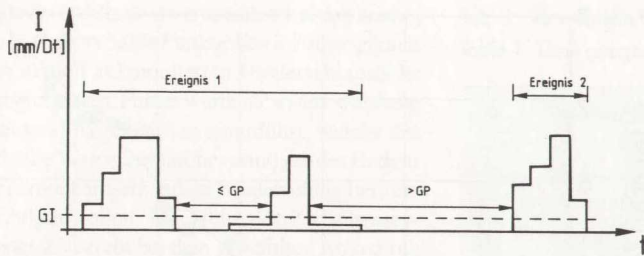


Bild 1: Zusammenhänge zwischen Grenzpause (GP) und Grenzintensität (GI)

Fig. 1: Influence of the critical duration of storm breaks (GP) and critical intensity (GI) on the selection process

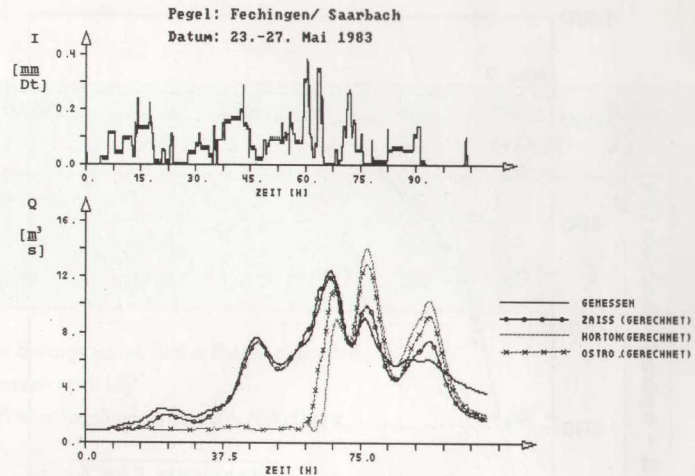


Bild 2: Eichereignis Mai 1983 für den Pegel Fechingen (mit Abflußbildung nach Zaiss, Horton und Ostrowski)

Fig. 2: Measured and calculated flow hydrographs of the May 1983 event in the Fechingen catchment

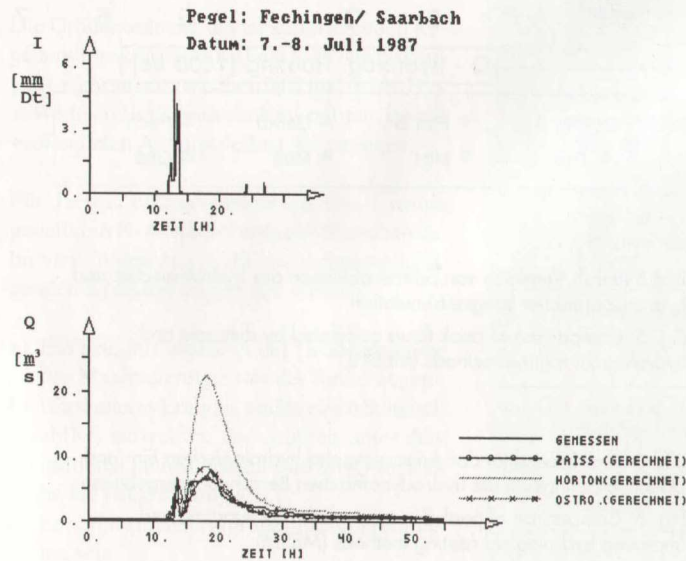


Bild 3: Eichereignis Juli 1987 für den Pegel Fechingen (mit Abflußbildung nach Zaiss, Horton und Ostrowski)

Fig. 3: Measured and calculated flow hydrographs of the July 1987 event in the Fechingen catchment

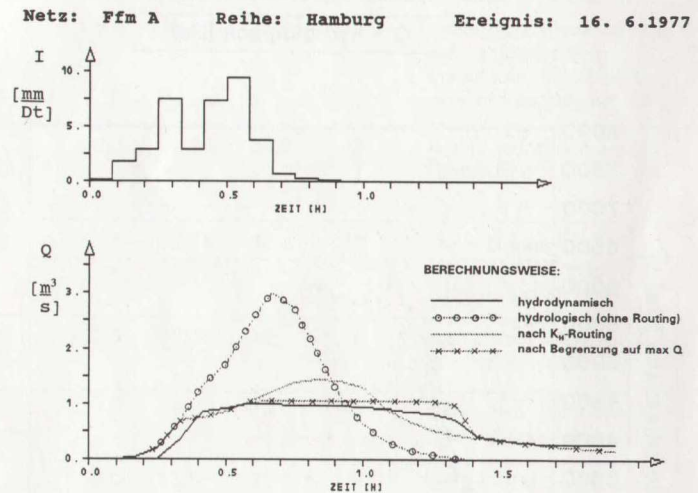


Bild 4: Beispiel für die Auswirkungen des hydrologischen Ein- und Überstauroutings

Fig. 4: Flow hydrographs from a sewer system calculated by dynamic and hydrological routing methods

te die angegebenen Pegelreihen herangezogen. Aufgrund der Bedingung $h_N \geq 20 \text{ mm}$ wird davon ausgegangen, daß die Auswahlkriterien auch für Einzugsgebiete mit $A_E \geq 50 \text{ km}^2$ Gültigkeit haben.

Durch die vorgestellten Auswahlkriterien wird die Zahl der zu untersuchenden Ereignisse gegenüber der weitverbreiteten Vorgehensweise, alle Ereignisse mit $h_N \geq 5 \text{ mm}$ auszuwählen (vgl. z. B. [4]), wesentlich reduziert.

3 Abflußbildungsansätze für durchlässige Flächen

Einige solcher Modellansätze wurden im Hinblick auf eine Verwendung von statistischen

Improvements to the Multiple Event Simulation Method for Urban and Rural Catchments

by Joachim Sartor

The Multiple Event Simulation Method (MESM) requires the selection of critical events from given continuous precipitation data to allow long-term simulation. Selection criteria for all storm hydrographs are presented that generate at least one-year flows in urban and rural catchments. Furthermore, the results of investigations comparing and improving the quality of classic algorithms of storm run-off models for the MESM are discussed. Five methods to calculate the amount of effective rainfall for unsealed surfaces as well as hydrological model components for the simulation of backwater effects in sewer systems are included.

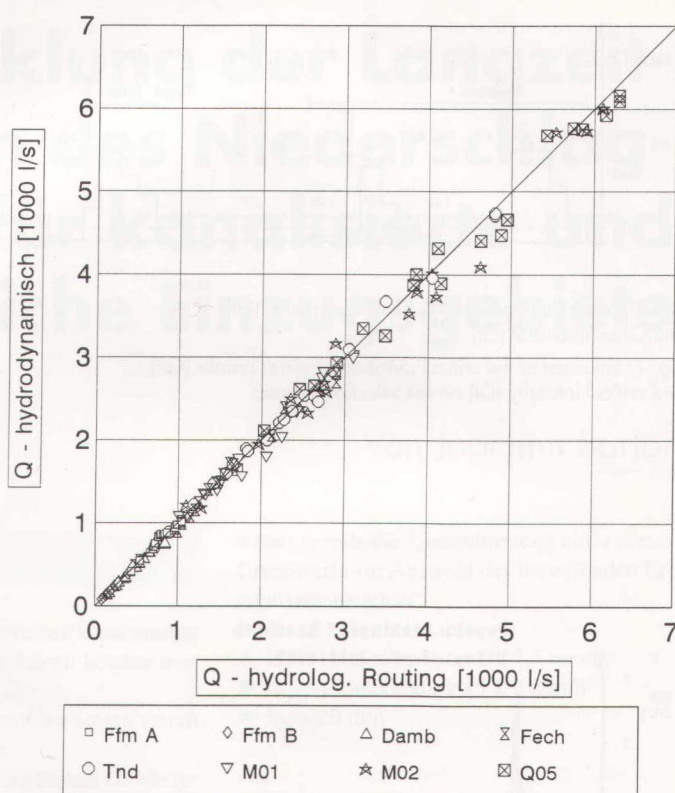
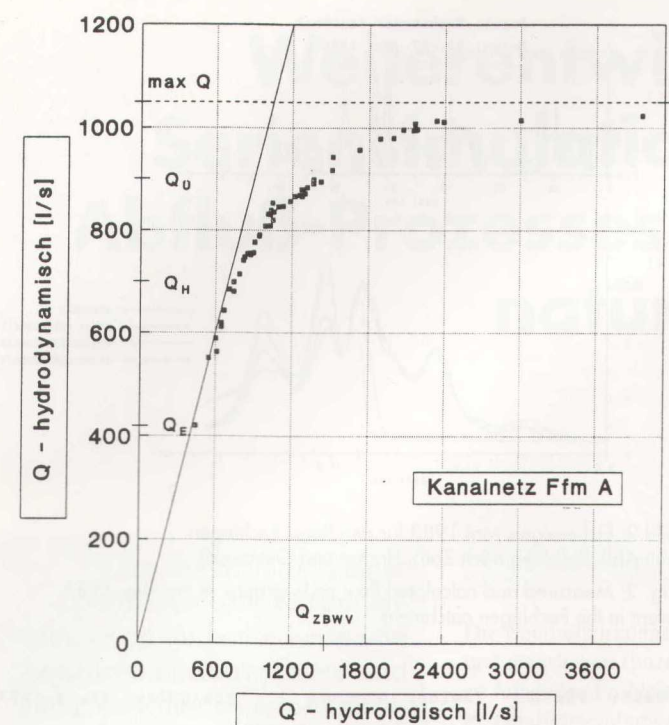


Bild 5 (links): Vergleich von Spitzenabflüssen aus hydrologischer und hydrodynamischer Langzeitsimulation

Fig. 5: Comparison of peak flows calculated by dynamic and hydrological routing methods (MESM)

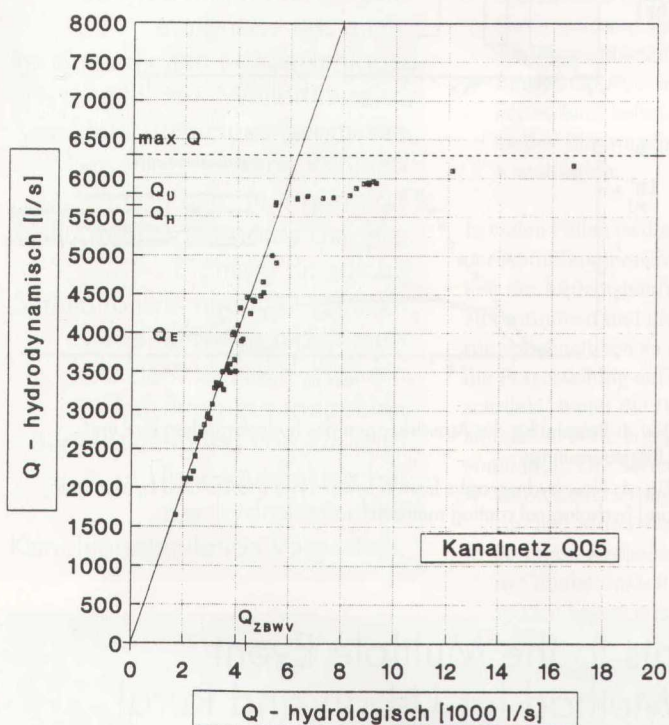


Bild 6 (oben): Qualität der Anpassung des hydrologischen Ein- und Überstauroutings an die hydrodynamischen Berechnungsergebnisse

Fig. 6: Comparison of peak flows calculated by dynamic and improved hydrological routing methods (MESM)

Q₀: Überstaubeginn (beliebiger Schacht) **Q_E:** Einstaubeginn (beliebige Haltung)

Q_H: Grenzafluß, ab welchem $Q(\text{hydrodynam}) < Q(\text{hydrolog})$ **Q_{ZBWV}:** 1-jährlicher Abfluß nach dem Zeitbeiwertverfahren

Bemessungsregen entwickelt und abgesichert. Dies ist einerseits deswegen problematisch, da die in einer Langzeitsimulation enthaltenen Extremereignisse die i. d. R. ein- bis fünfjährigen Bemessungsereignisse für Kanalnetze erheblich überschreiten können (vgl. z. B. [6]). Andererseits liegen die Bemessungsereignisse für Bauwerke an natürlichen Gewässern (meist $\geq HQ_{10}$) deutlich über zahlreichen Jahreshöchstabflüssen, welche von einer Langzeit-

simulation ebenfalls (möglichst) richtig wiedergegeben werden müssen, da sie i. d. R. die Eingangsgrößen für die nachfolgenden statistischen Analysen bilden. Dazu müssen die in Frage kommenden Ansätze u. a. in der Lage sein, die bei kleineren Ereignissen meist sehr einflußreiche Anfangsfeuchte des Bodens (aufgrund der meteorologischen Vorgeschichte) ausreichend zu berücksichtigen. Vor diesem Hintergrund wurden die folgenden fünf klas-

sischen Methoden auf ihre Eignung für die Seriensimulation untersucht:

- Abflußbeiwertansatz nach Zaiß (modifiziertes SCS-Verfahren, siehe [14])
- Abflußbeiwertansatz nach Lutz ([7])
- Abflußbeiwertansatz nach Harms ([4])
- Verlustratenansatz nach Paulsen (modifiziertes Horton-Verfahren, siehe [10]) und
- Vereinfachtes Bodenfeuchtemodell nach Ostrowski ([9]).

Alle drei Abflußbeiwertansätze wurden analog zu [14] als variable Funktionen in Abhängigkeit der aktuell akkumulierten Niederschlagshöhe programmiert. Ferner wurden Zwischenverluste während Regenpausen eingeführt, welche das erhöhte Wasseraufnahmevermögen des Bodens bei erneut einsetzendem Niederschlag berücksichtigen sollen. Die Höhe des Zwischenverlustes ZV strebt bei dem gewählten Ansatz mit zunehmender Dauer der Regenpause asymptotisch dem Wert des Anfangsverlustes AV zu:

$$ZV_i = AV - (AV - ZV_{i-1}) \cdot e^{-K_p \cdot Dt} \quad [mm] \quad (1)$$

mit
K_p: Regenerationskonstante [1/h]
Dt: Simulationszeitschritt [h]
i: laufendes Intervall über die Regenpause [-]
und
ZV_{i=0} = 0

Die Größenordnung der zu kalibrierenden Regenerationskonstante K_p liegt nach den bisherigen Erfahrungen zwischen 0,01 und 0,2/h. Diese Werte sind im Zusammenhang mit dem jeweils verwendeten Anfangsverlust AV zu sehen.

Für die drei Einzugsgebiete aus Tab. 1 wurde jeweils ein N-A-Modell aufgestellt und an drei bis vier Ereignissen kalibriert, welche nach folgenden Kriterien ausgewählt wurden:

- a) Ein Ereignis mußte in der Größenordnung des Maximalereignisses der Reihe liegen.
- b) Ein weiteres Ereignis mußte einen Scheitelabfluß aufweisen, der deutlich unter dem mittleren Jahreshöchstabfluß MHQ der Reihe lag (Begründung s. o.).
- c) Es sollte ein mehrgipfliges Ereignis enthalten sein.
- d) Sofern hierzu noch freie Auswahlmöglichkeiten verblieben, wurde angestrebt, daß die Eichereignisse
 - aus verschiedenen Abschnitten des Meßzeitraumes resultierten,
 - aus verschiedenen Jahreszeiten stammten sowie
 - unterschiedliche Niederschlagshöhen und Vorregenindexwerte aufwiesen.

Dabei gelang es mit einer Ausnahme (Horton/Paulsen) die danach ausgewählten und in **Tab. 3** dargestellten Ereignisse mit einem einheitlichen Parametersatz aus einem plausiblen Wertebereich volumenmäßig im Mittel richtig wiederzugeben, d. h. den mittleren Gesamtabflußbeiwert aus Messung (ψ_M) und Berechnung (ψ_R) in Übereinstimmung zubringen. Waren hierfür mehrere Parametereinstellungen möglich, so wurde die – im folgenden dargestellte – Summe der Beträge aus den relativen Abweichungen Δψ der einzelnen Eichereignisse minimiert:

$$\sum_{i=1}^j |\Delta\psi| = \sum_{i=1}^j \left| \frac{\psi_R - \psi_M}{\psi_M} \right| \quad [-] \quad (2)$$

Tab. 1: Verwendete Pegel
Table 1: Flow gauges

Nr.	Name/Gewässer	A _E km ²	BEB %	W %	t _c h	PNP m+NN	Reihe AJ
1.	Wasserliesch/Albach	37,5	2,8	29,1	6,2	134	75–89
2.	Fechingen/Saarbach	48,7	9,9	23,0	5,6	198	60–87
3.	Eisenschmitt/Salm	49,8	1,2	70,7	5,8	323	74–88

mit: A_E = Oberirdisches Einzugsgebiet; BEB = Bebauungsanteil;
t_c = Konzentrationszeit nach [3];
W = Waldanteil; PNP = Pegelnullpunkt; AJ = Abflußjahr

Tab. 2: Verwendete Kanalnetze
Table 2: Sewer networks

Nr.	Name	A _{EK} ha	A _u ha	BEF %	t _f min	Bemerkungen
1.	Frankfurt-Lettigkautweg A (Ffm A)	36,4	12,66	34,8	15	reales Netz, Modellkalibrierung an gemessenen Ereignissen, Teilnetz A, stark rückstaubehafet
2.	Frankfurt-Lettigkautweg B (Ffm B)	6,0	2,24	37,2	5	wie 1., jedoch Teilnetz B, rückstaufrei
3.	Hameln-Tündern (Tnd)	63,8	27,78	43,5	28	reales Netz, leicht modifiziert, vermascht, leicht rückstaubehafet
4.	Birkenfeld-Dambach (Damb)	7,5	3,15	42	4	reales Netz, leicht modifiziert, leicht rückstaubehafet
5.	Saarbrücken-Fechingen I (Fech)	29,4	9,71	33	15	reales Netz, leicht modifiziert, stark rückstaubehafet
6.	M 01	50,0	15,0	30	9	fiktives Netz aus [6], leicht modifiziert, rückstaufrei
7.	M 02	50,0	25,0	50	8	wie 6.
8.	Q 05	100,0	50,0	50	22	wie 6.

mit: A_{EK} = Gesamteinzugsgebiet; A_u = undurchlässiger Flächenanteil;
BEF = A_u/A_{EK}; t_f = Fließzeit
(Hinweis: Die Angaben zu den Rückstauverhältnissen beziehen sich auf den 1-jährlichen Bemessungsabfluß)

Anschließend wurde jeweils eine getrennte Langzeit-Seriensimulation mit jeder der fünf Methoden durchgeführt, wobei die ebenfalls zuvor kalibrierte Übertragungsfunktion einheitlich beibehalten wurde. Die so ermittelten Berechnungsergebnisse in Form von MHQ sowie den 20- und 50-jährlichen Scheitelabflüssen HQ₂₀ und HQ₅₀ wurden den entsprechenden, aus Meßwerten ermittelten Größen gemäß Tab. 4 vergleichend gegenübergestellt. Aufgrund des Einflusses der statistischen Extrapolation wurde HQ₅₀ bei der Bewertung weniger stark gewichtet.

Als wesentliche Ergebnisse sind festzuhalten:

- a) Im Rahmen der Kalibrierung konnte mit den Verfahren nach SCS/Zaiß und Ostrowski die beste Anpassung an die Meßwerte erzielt werden.
- b) In Bezug auf MHQ und HQ₂₀ führte der Ansatz nach SCS/Zaiß zur besten Übereinstimmung.
- c) Der Verlustratenansatz nach Horton/Paulsen (und in eingeschränktem Maße auch das Ostrowski-Modell) reagierte generell sehr sensitiv auf Parametervariationen, erzeugte teilweise zu hohe Abflüsse bei extremen

Tab. 3: Vergleich der berechneten und gemessenen Gesamtabflußbeiwerte (Kalibrierung)
Table 3: Comparison of calculated and measured mean flow coefficients of the events used for calibration

Pegel/ Ereignis	Messung	SCS-Zaiß		Lutz		Harms		Horton-P		Ostrowki	
	ψ_M	ψ_R	$\Delta\psi$	ψ_R	$\Delta\psi$	ψ_R	$\Delta\psi$	ψ_R	$\Delta\psi$	ψ_R	$\Delta\psi$
–	–	–	%	–	%	–	%	–	%	–	%
<i>Fechingen</i>											
Dez. 65	0,300	0,373	+ 24,3	0,323	+ 7,7	0,282	– 6,0	0,158	– 47,3	0,383	+ 27,7
Okt. 81	0,443	0,445	+ 0,5	0,339	– 23,5	0,348	– 21,4	0,513	+ 15,8	0,488	+ 10,2
Mai 83	0,369	0,351	– 4,9	0,402	+ 8,9	0,414	+ 12,2	0,254	– 31,2	0,251	– 32,0
Juli 87	0,115	0,088	– 23,5	0,178	+ 54,8	0,194	+ 68,7	0,306	+ 166	0,112	– 2,6
Mittel	0,31	0,31	± 13,3	0,31	± 23,7	0,31	± 27,1	0,31	± 65,1	0,31	± 18,1
<i>Eisenschmitt</i>											
Nov. 77	0,396	0,287	– 27,5	0,333	– 15,9	0,318	– 19,7	0,556	+ 40,4	0,358	– 9,6
Nov. 84	0,314	0,367	+ 16,9	0,427	+ 36,0	0,465	+ 48,1	0,306	– 2,5	0,269	– 14,3
März 86	0,336	0,387	+ 15,2	0,286	– 14,9	0,263	– 21,7	0,184	– 45,2	0,420	+ 25,0
Mittel	0,35	0,35	± 19,9	0,35	± 22,3	0,35	± 29,8	0,35	± 29,4	0,35	± 16,3
<i>Wasserliesch</i>											
Jan. 82	0,381	0,366	– 3,9	0,281	– 26,2	0,282	– 26,0	0,638	+ 67,5	0,516	+ 35,4
Mai 83	0,318	0,352	+ 10,7	0,356	+ 12,0	0,356	+ 12,0	0,046	– 85,5	0,320	+ 0,6
April 86	0,161	0,149	– 7,5	0,220	+ 36,6	0,219	+ 36,0	0,175	+ 8,7	0,020	– 87,6
Mittel	0,29	0,29	± 7,4	0,29	± 24,9	0,29	± 24,7	0,29	± 53,9	0,29	± 41,2

Regenintensitäten (Tab. 4 und Bild 3) und d) berechnete teilweise zu spät einsetzende Effektivniederschläge bei schwach intensiven Ereignissen (Bild 2).

Da insbesondere das letztgenannte Problem bei der parallelen Simulation mit den frühzeitig reagierenden Siedlungsflächen als besonders kritisch angesehen werden muß, empfiehlt sich aufgrund dieser Untersuchungsergebnisse die Verwendung des SCS/Zaiß-Ansatzes für solche Aufgabenstellungen.

Der zu spät einsetzende Direktabfluß bei den beiden – letztlich auf Verlustraten basierenden – Ansätzen nach [9] und [10] ist auf eine zu späte rechnerische Mindestsättigung des Bodens zurückzuführen. Offensichtlich steht in einem natürlichen Einzugsgebiet aber i. d. R. ein gewisser Flächenanteil zur Verfügung (z. B. Flußauen mit relativ hohen Grundwasserständen), der ein früheres Einsetzen des Abflusses bewirkt, als er über flächengemittelte Bodenkennwerte simuliert wird. Vermutlich aufgrund dieser Zusammenhänge verwenden einige Kontinuumsmodelle für Flußgebiete auch keine mittleren, sondern flächengewichtete Parameter (siehe z. B. [11]). Als mögliche (wenn auch etwas aufwendigere) Alternative hierzu erscheint die weitere flächenmäßige Unterteilung des Einzugsgebietes, um solche Einflüsse ausreichend berücksichtigen zu können. Jedenfalls war bei einer Erfassung der Gebiete als Einzelflächen, auch unter Wahl extremer Parametersätze (einheitlich für alle Eichereignisse), das rechtzeitige

Einsetzen des Effektivniederschlags bei intensitätsschwachen Ereignissen mit den o. g. Ansätzen nicht erreichbar.

Ein genereller Vorteil der (verbesserten) variablen Abflußbeiwertansätze liegt auch darin, daß sie sich – verglichen mit den Verlustratenansätzen – weit weniger sensitiv bei Parameteränderungen verhalten und mittels Standardparametern meist bereits die Größenordnung der Meßwerte wiedergeben. Dies gilt insbesondere für den SCS/Zaiß-Ansatz, für dessen entscheidenden Parameter, den CN-Wert relativ große Erfahrungen vorliegen. Dieser Vorteil sei anhand eines sehr praxisnahen Problems erläutert: Beim Fallbeispiel Wasserliesch reichten 3 Niederschlagsmeßstationen für die nur knapp 38 km² große Einzugsfläche kaum aus, um das Gebietsmittel des Niederschlags mit ausreichender Genauigkeit zu rekonstruieren. Solche Schwierigkeiten führen naturgemäß dazu, daß zur Modelleichung auf die weniger ortsvariablen Ereignisse zurückgegriffen werden muß. Dies sind i. d. R. die eher schwach intensiven „Landregen“, an welchen dann die Parameter kalibriert werden. Bei der nachfolgenden Langzeitsimulation berechnete dann im o. g. Fall insbesondere der Horton/Paulsen-Ansatz für die in der Reihe enthaltenen hochintensiven Starkregen unplausibel hohe Effektivniederschläge. Hierdurch läßt sich u. a. die aus Tab. 4 ersichtliche, auffallend deutliche Überschreitung der Meßwerte erklären. Diese Schwäche des Ansatzes ist vermutlich darauf zurückzuführen, daß in der zweijährigen Meßreihe,

welche seiner (Weiter-)Entwicklung gemäß [10] zugrunde lag, keine solchen Extremereignisse enthalten waren. Aber auch in [8] wurde bereits aus einem entsprechenden Modellvergleich der Schluß gezogen, daß Abflußbeiwertansätze (im Vergleich zu Verlustratenansätzen) zu besseren Resultaten führen, „obwohl sich damit keine physikalischen Vorstellungen verbinden lassen“.

4 Hydrologische Simulation von Rückstauwirkungen in Kanalnetzen

Eine hydrodynamische Langzeitsimulation für Kanalnetze ist sehr zeitaufwendig. Dagegen sind die klassischen hydrologischen Ansätze (z. B. Einheitsganglinie) nicht in der Lage, Rück- und Überstauwirkungen zu simulieren, welche die – das Gewässer belastenden – Abflußganglinien extremer Ereignisse aus Siedlungsgebieten wesentlich beeinflussen können. Als eine mögliche Lösung wurde das im folgenden beschriebene Simulationskonzept entwickelt (vgl. Bild 4):

- a) Anpassung der Einheitsganglinie anhand hydrodynamischer Berechnungsergebnisse (Dimensionierungsergebnisse ohne wesentliche Rückstauwirkungen), z. B. aus der Bemessungsphase des Netzes.
- b) Hydrologische Seriensimulation der nach den Kriterien gemäß Kap. 2 ausgewählten

Ereignisse und Sortierung nach der Größe ihrer berechneten Abflußspitzen.

- c) Hydrodynamische Simulation der Ereignisse aus b) (der große nach in absteigender Reihenfolge) bis die Abflußspitzen (hydrodynam./hydrolog.) übereinstimmen. Dieser Abfluß entspricht dem Parameter Q_H (vgl. Bild 5). Ferner wird so auch der theoretische Maximalabfluß $\max Q$ festgelegt, gegen den die so aufgetragenen Ergebnisse asymptotisch streben (Überstaubedingungen ohne weitere wesentliche Druckhöhenzunahme).
- d) Kalibrierung der Retentionskonstante K_H eines linearen Einzelspeichers (anhand der Ereignisse, welche zwischen Q_H und $\max Q$ liegen), der lediglich von dem oberhalb Q_H liegenden Teil der Welle beaufschlagt wird.
- e) Rückhalt des oberhalb von $\max Q$ liegenden Wellenteils in einem weiteren fiktiven Speicher, bis wieder freie Kapazitäten im Netz zur Verfügung stehen (Ansatz gemäß [5]).

Ergänzend ist zu erwähnen, daß das hydrologische und das hydrodynamische Modell natürlich identische Oberflächenmodelle aufweisen müssen, damit alle Differenzen zwischen den beiden Berechnungen auf den Wellenablauf im Netz zurückgeführt werden können.

Das vorgeschlagene Konzept wurde erfolgreich anhand der in **Tab. 2** enthaltenen acht Netze getestet (vgl. **Bild 6**). Es kann besonders dann von großem praktischen Nutzen sein, falls Variantenuntersuchungen eine wiederholte Langzeitsimulation erfordern oder falls Kanalnetz und Gewässer von verschiedenen Institutionen bzw. Ingenieurbüros bearbeitet werden.

Ein großer Nachteil ist dabei sicherlich die erforderliche Kalibrierung an hydrodynamischen Berechnungsergebnissen, die aber aufgrund der sehr individuellen Reaktion jedes einzelnen Netzes nicht vermeidbar ist. Dies läßt sich anhand der beiden extremen Beispiele in **Bild 5** verdeutlichen. Während sich bei dem realen, hydraulisch stark überlasteten Netz Ffm A eine stetige Kurve oberhalb von Q_H ergibt, fällt der Übergangsbereich zwischen Q_H und $\max Q$ bei dem streng nach [1] neu bemessenen Netz Q05 verhältnismäßig klein aus. Dies ist vermutlich auf die relativ gleichmäßige Auslastung aller Haltungen zurückzuführen, was dann bei Überlastung zum annähernd gleichzeitigen Versagen des Gesamtnetzes führt, d. h. es können keine Reserven mehr in anderen Netzteilen genutzt werden.

Entsprechend individuell fällt auch der Parameter $\max Q$ aus und zwar beispielsweise im Hinblick auf den relativ einfach ermittelbaren, theoretisch einjährigen Abfluß nach dem Zeitbeiwertverfahren (Q_{ZBWV} , vgl. **Bild 5**). Der Parameter K_H nahm für die untersuchten Netze Werte zwischen 0,15 h (Fech) und 1,5 h (Q05) an.

Tab. 4: Ergebnisse der Langzeitsimulation
Table 4: Results of long-term simulation (MESM)

	MHQ m ³ /s	Δ MHQ %	HQ ₂₀ m ³ /s	Δ HQ ₂₀ %	HQ ₅₀ m ³ /s	Δ HQ ₅₀ %
Pegel Fechingen						
Messung	10,6	0	34,1	0	52,8	0
SCS-Zaiß	13,5	+ 27,4	34,2	+ 0,3	47,1	- 10,8
Lutz	13,6	+ 28,3	29,3	- 14,1	37,5	- 29,0
Harms	15,5	+ 46,2	36,7	+ 7,6	49,6	- 6,1
Horton-Paulsen	19,3	+ 82,1	55,1	+ 61,6	70,9	+ 34,3
Ostrowski	14,8	+ 39,6	50,8	+ 49,0	81,0	+ 53,4
Pegel Eisenschmitt						
Messung	9,80	0	15,6	0	17,4	0
SCS-Zaiß	9,88	+ 0,8	16,4	+ 5,1	18,6	+ 6,9
Lutz	10,5	+ 7,1	16,1	+ 3,2	17,9	+ 2,9
Harms	10,4	+ 6,1	16,4	+ 5,1	18,3	+ 5,2
Horton-Paulsen	16,3	+ 66,3	25,4	+ 62,8	28,3	+ 62,6
Ostrowski	14,6	+ 49,0	23,8	+ 52,6	26,8	+ 54,0
Pegel Wasserliesch						
Messung	5,68	0	13,5	0	16,7	0
SCS-Zaiß	9,52	+ 67,6	20,7	+ 53,3	25,5	+ 52,7
Lutz	9,03	+ 59,0	18,2	+ 34,8	22,8	+ 36,5
Harms	11,2	+ 97,2	27,7	+ 105	41,2	+ 147
Horton-Paulsen	21,8	+ 284	50,3	+ 273	77,6	+ 365
Ostrowski	12,3	+ 117	32,8	+ 143	41,9	+ 151

Literatur

- [1] Abwassertechnische Vereinigung e.V. (ATV): Richtlinien für die hydraulische Berechnung von Schmutz-, Regen- und Mischwasserkanälen. Arbeitsblatt A 118, St. Augustin, 1977
- [2] ATV: Langzeitsimulation – Begriffsbestimmung unter Berücksichtigung besonderer Anwendungsbereiche. Arbeitsbericht der Arbeitsgruppe 1.2.6, Korrespondenz Abwasser, Heft 4, 1985
- [3] Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK): Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluß-Modellen in kleinen Einzugsgebieten. Regeln zur Wasserwirtschaft, Heft 112 und 113, 1982 und 1984
- [4] Harms, R. W.: Synthese maßgebender Abflußdaten für teilbebaute kleine Einzugsgebiete. Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft der Universität Hannover, Heft 55, 1984
- [5] Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie (ITWH): Softwarepaket HYSTEM-EXTRAN, Version IV.2 und IV.3. Hannover, 1988
- [6] Kirschbauer, L.: Untersuchungen zur Bemessung von Regenentlastungen im ländlichen Raum. Berichte des Fachgebiets Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Kaiserslautern, Heft 1, 1994
- [7] Lutz, W.: Berechnung von Hochwasserabflüssen unter Anwendung von Gebietskenngrößen. Mitteilung Nr. 24 des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe, 1984
- [8] Naef, F.: Ein Vergleich von mathematischen Niederschlag-Abfluß-Modellen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Heft 26, 1977
- [9] Ostrowski, M. W., Wolf, U., Rohde, F. G.: Die Berechnung der aktuellen Infiltration mittels Bodenfeuchtesimulation. Die Wasserwirtschaft, Heft 1, 1984
- [10] Paulsen, O.: Kontinuierliche Simulation von Abflüssen und Stofffrachten in der Trennentwässerung. Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft der Universität Hannover, Heft 62, 1987
- [11] Sartor, J.: Langzeit-Kontinuumsmodelle für Flußgebiete. Materialien des DVWK, Heft 1, 1993
- [12] Sartor, J.: Die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens maßgebender Abflußereignisse in Kanalisationsnetzen und natürlichen Gewässern. Berichte des Fachgebiets Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Kaiserslautern, Heft 3, 1994
- [13] Schilling, W.: Univariate versus multivariate rainfall statistics – problems and potentials. Water Science Technology, Volume 16, Kopenhagen, 1984
- [14] Zaiß, H.: Simulation ereignisspezifischer Einflüsse des Niederschlag-Abfluß-Prozesses von Hochwasserereignissen kleiner Einzugsgebiete mit N-A-Modellen. Technischer Bericht des Instituts für Ingenieurhydrologie und Hydraulik, TH Darmstadt, Nr. 42, 1989

Anschrift des Verfassers:
Prof. Dr.-Ing. Joachim Sartor
Fachhochschule Trier, FB 2
Schneidershof
D-54293 Trier



DK-Nr. 551.577 : 628.228 556.161