Das Stormwater Management Model: ein Simulationsmodell für die elektronische Berechnung von Kanalisationen

Autor(en): **Christen, Jürg / Dietrich, Hans-Peter / Schmocker, Peter**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **102 (1984)**

Heft 38

PDF erstellt am: **28.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-75525

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Das Stormwater Management Model

Ein Simulationsmodell für die elektronische Berechnung von Kanalisationen

Von Jürg Christen, Hans-Peter Dietrich und Peter Schmocker, Bern

Im vorliegenden Artikel wird das «Stormwater Management Model», kurz SWMM, vorgestellt. SWMM ist ein Berechnungsmodell für die Simulation der Abflüsse von Gebietsoberflächen und in Kanalisationen. Die durchgeführten Testrechnungen für die Prüfung des Programms und die Sensibilität der Berechnungsparameter werden erläutert. Aus den Testrechnungen kann die Folgerung gezogen werden, dass das SWMM-Programm ein geeignetes Berechnungsmodell ist, um von beliebig eingegebenen Niederschlägen sowohl den Oberflächenabfluss als auch die Abflussvorgänge im Kanalisationsnetz wirklichkeitsgetreu zu simulieren. Im Vergleich zu den bisher verwendeten Berechnungsmethoden wird aufgezeigt, wo die herkömmlichen, sogenannten «Rationalmethoden» und wo die neueren sogenannten «Differentialmethoden» vorzugsweise angewendet werden können. Der Artikel zeigt auf, wie problematisch der Vergleich der verschiedenen Berechnungsarten ist, vor allem wenn er am «grünen Tisch» erfolgt.

Einleitung

Problemstellung

Durch die fortschreitende Urbanisierung unseres Landes wurde der natürliche Wasserkreislauf erheblich gestört. In vielen Gemeinwesen werden schon bei relativ schwachen Niederschlägen die *Kanalisationen überlastet*. Die Folgen sind unangenehme Rückstauerscheinungen oder gar Überschwemmungen. Neben Neuberechnungen von Abwässerkanälen in Gebieten ohne Generelle Kanalisationsprojekte (GKP) und überall dort, wo infolge Überarbeitung der Zonenpläne bestehende GKP angepasst werden müssen, haben vor allem die Sanierungen bestehender Kanalsysteme eine grosse Bedeutung erlangt. Die Entwicklung der Computertechnik hat dazu geführt, dass komplizierte physikalische Vorgänge nachgebildet (simuliert) und in sogenannten mathematischen Modellen dargestellt werden können.

Während die Anwendung des Computers im konstruktiven Ingenieurbau schon seit mehreren Jahren eine Selbstverständlichkeit ist, hat es im Tiefbau und da vor allem in der Siedlungswasserwirtschaft etwas länger gedauert, bis die EDV für die Berechnung der meist recht anspruchsvollen Probleme verwendet werden konnte.

In einem Gebiet der Siedlungswasserwirtschaft, der Wasserversorgung, wird seit einigen Jahren für die Berechnung grosser Netze der Computer mit Erfolg eingesetzt. Bei der *Kanalisationstechnik* hat die Entwicklung brauchbarer Programme wegen der Komplexität der Probleme länger gedauert. In der Schweiz werden erst in neuster Zeit Computerprogramme regelmässig für die Berechnung von Kanalnetzen benutzt. Die Vermutung, wonach die bisher üblichen Rechenverfahren in der Kanalisationstechnik häufig zu Fehldispositionen geführt haben, ist vor 15 Jahren in einem Artikel über die EDV-Berechnung des Kanalnetzes der Stadt Basel [1] geäussert worden. Die Frage ist heute jedoch noch *weitgehend offen*, ob die herkömmlichen Berechnungsverfahren wirklich so veraltet sind, wie dies von der einen Seite behauptet, von der Gegenseite jedoch bestritten wird. Im vorliegenden Artikel möchten wir weder für die Befürworter der neuen Methoden noch gegen die Anhänger der konventionellen Berechnungsart Partei ergreifen. Ziel des Artikels ist vielmehr, ein neues elektronisches Berechnungsmodell vorzustellen und über seine Anwendung in der Praxis zu berichten.

Abflussberechnungsmethoden

Grundsätzlich ist bei der Berechnung des Ablaufes von Hochwasserwellen zwischen Berechnungs*modellen* und Berechnungs*verfahren* zu unterscheiden. Berechnungsmodelle erlauben die Eingabe *gemessener* Niederschlagsereignisse, wobei die einzelnen Modellparameter aufgrund von Messresultaten geeicht werden können. Demgegenüber basieren die Berechnungsverfahren auf der Eingabe *vereinfachter, schematischer* Regenereignisse. Eine Eichung aufgrund gemessener Werte ist nur für summarische Verfahrensparameter möglich.

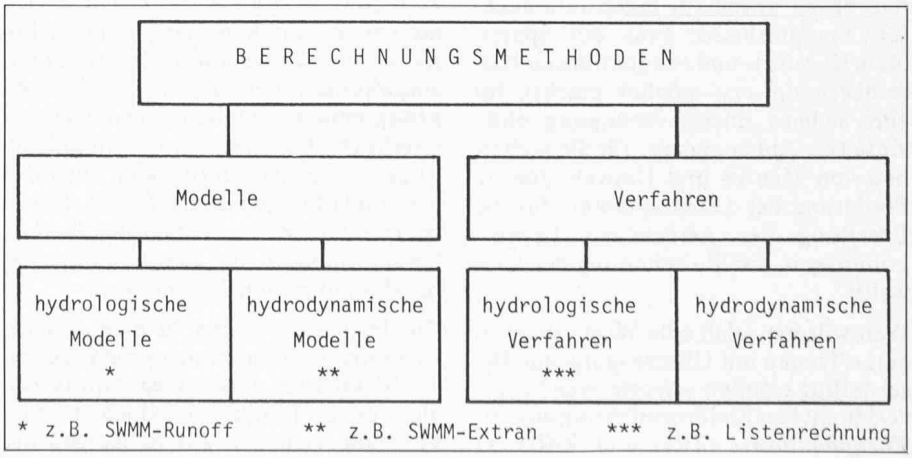
Bei der Berechnung wird wiederum zwischen zwei Hauptgruppen unterschieden, nämlich zwischen den hydrologischen und den hydrodynamischen Methoden (Bild 1). Hydrologische Methoden benützen zur Ermittlung der Abflüsse oder Abflussganglinien sogenannte Übertragungsfunktionen. Die Bewegungsgleichung wird durch einen Näherungsansatz ersetzt. Die hydrologischen Methoden sind in der Anwendung einfacher und benötigen einen kleineren Rechenaufwand. Die hydrodynamischen Methoden berechnen die Abflüsse oder Abflussganglinien auf der Basis von Differentialgleichungen, wobei verschiedene Grade der Vereinfachung möglich sind. Normalerweise werden zwei Abflussberechnungen durchgeführt, nämlich einerseits die Berechnung des Oberflächenabflusses und anderseits der Abfluss im Kanalsystem.

Das SWMM-Programm

Allgemeines

Das «Stormwater Management Model», kurz SWMM, ist ein im Auftrag der amerikanischen Umweltschutzbehörde EPA entwickeltes instationäres Berechnungsmodell, das nach der sogenannten *Differentialmethode* zur Berechnung von Abflüssen, den Ablauf von Hochwasserwellen auf der Geländeoberfläche und in Kanälen simulieren kann. Der Ablauf von solchen Wasserwellen ist ein instationärer Prozess,

Bild 1. Abflussberechnungsmethoden



bei dem die Sätze von der Erhaltung der Masse und der Energie gelten. Das Abflussgeschehen kann mathematisch durch die Differentialgleichungen von St. Venant beschrieben werden. Es handelt sich bei diesen Differentialgleichungen um eine Kontinuitäts- und eine Bewegungsgleichung.

Diese Gleichungen können in der Praxis nur mit recht grossem Rechenaufwand numerisch gelöst werden. Die Vereinfachungen, die bei den numerischen Lösungen der Gleichungen bei den verschiedenen Berechnungsverfahren gewählt wurden, haben zu einer Vielfalt von publizierten sogenannten Flood-routing-Methoden geführt.

Im Gegensatz zu den meisten andern eingesetzten Rechenmethoden ist das SWMM ein veröffentlichtes, für jedermann zugängliches Programm. Es ist auf amerikanische Verhältnisse ausgelegt und musste deshalb für die Anwendung in der Schweiz verschiedenen Anpassungen unterworfen werden. Das Programm wurde metrifiziert und der Ausdruck unseren Bedürfnissen angepasst.

Aufbau des Programms

Eine elektronische Kanalnetzberechnungsmethode hat die Aufgabe, den *Übergang zwischen Niederschlag und Abfluss im Kanalnetz* nachzuvollziehen. Die Niederschlagsganglinie wird dabei durch Retention, Infiltration und Verdunstung abgeflacht und die Abflussganglinien der einzelnen Teileinzugsgebiete zeitlich verschoben, im Kanalnetz summiert und transportiert (Bild 2).

Es gibt Berechnungsmethoden, die auf eine differenzierte Simulation des Oberflächenabflusses verzichten. Dabei werden die Niederschlagshydrographen, die direkt dem Kanalnetz zugeführt werden, durch summarische Verlustbeiwerte reduziert. Im Gegensatz dazu hat das SWMM-Programm den Vorteil, dass die Berechnung des Abflusses auf der Oberfläche und im Kanalsystem mit verschiedenen Simulationsmodellen durchgeführt werden kann.

Für die Abflussermittlung sind beim SWMM folgende *Hauptblöcke* vorhanden:

Runoff: Oberflächenabfluss
Transport: Kanalnetzberechnung ohne Rückstau

Extran: Kanalnetzberechnung mit Rückstau (Extran = Abkürzung für extended transport)

Im folgenden werden die beiden wichtigsten Blöcke, *Runoff* und *Extran*, kurz vorgestellt:

Runoff-Block

Mit dem Runoff-Block wird der *Oberflächenabfluss* von bebauten und unbebauten Gebieten unter Berücksichtigung verschiedener Parameter simuliert. Diese differenzierte Simulation erfolgt anstelle eines summarischen Abflussbeiwertes und einer schwer zu definierenden Anlaufzeit. Als Systembelastung können beliebige intensitätsvariable Regenereignisse vorgegeben werden. Der Runoff-Block stellt ein mathematisch deterministisches Modell dar, dessen Parameter anhand gemessener Niederschlags-Abflussdaten geeicht bzw. dessen Berechnungen anhand von Messungen überprüft werden können. Der zeitabhängige Intensitätsverlauf des Niederschlages muss dabei als Lastfall in das Modell eingegeben werden. Die zur Berechnung notwendigen Parameter müssen zumindest für ein Berechnungsgebiet allgemeingültig sein und innerhalb physikalisch vernünftigen Grenzen liegen.

Extran-Block

Extran ist ein volldynamisches Simulationsmodell mit der Auflösung der St. Venantschen Differentialgleichungen nach der Differenzenmethode. Die Kanalnetzberechnung mit dem Extran-Block weist gegenüber einigen anderen Berechnungsverfahren folgende Besonderheiten auf:

- Behandlung von Rückstau, Rückfluss, Retention, Speicherelementen, Verzweigungen, Trennbauwerken, Ausläufen unter Wasser
- Berücksichtigung der Effektivhöhen von Kanalsohlen, Strassenoberflächen, Schachtdeckeln und Anschlusskanälen
- Simulation des Abflusses bei vollaufenden Kanälen mit allen Vermaschungen

Der Einsatzbereich von SWMM

Das SWMM-Extran-Programm eignet sich sowohl für die Nachrechnung überlasteter Netze als auch für die Neurechnung von geplanten Kanalisationen, wobei zu letzteren zu bemerken ist, dass das SWMM-Programm, ähnlich wie andere Berechnungsmethoden, nicht selbst Leitungen dimensioniert. Das SWMM-Programm ist vor allem für Netzsanierungen interessant, da es aufzeigt, wo Engpässe auftreten. Im Gegensatz zur Listenrechnung wird jedoch beispielsweise der Zeitpunkt, die Dauer und die Höhe eines Rückstaus aufgezeigt. Durch Variation der Eingabe verschiedener Sanierungsmassnahmen lässt sich mit mehreren Berechnungsgängen eine optimale Lösung finden. Die ersten Berechnungskosten sind normalerweise höher als bei den herkömmlichen Methoden. Nach unseren Erfahrungen rechtfertigen sich jedoch diese Mehrkosten, vor allem dann, wenn mehrere Sanierungsvarianten durchgerechnet und so das Leitungsnetz optimal ausgenützt werden kann. Mit andern Worten: Der grössere finanzielle Aufwand in der Berechnungsphase wird durch die erzielbaren Minderkosten bei baulichen Sanierungsmassnahmen mehr als nur ausgeglichen.

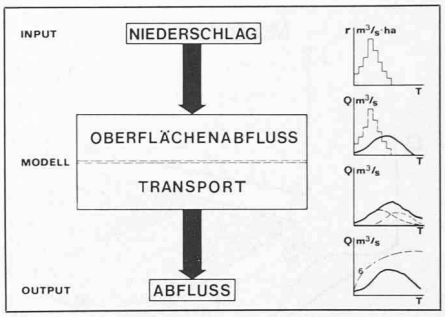


Bild 2. Verbindung zwischen Niederschlag und Abfluss

Erläuterungen zum Programm

Der Oberflächenabfluss

Grundsätzliches

Im Oberflächenabflussmodell (Runoff) wird die zeitlich veränderliche Abflussmenge aus den einzelnen Teileinzugsgebieten berechnet. Dabei werden für die Simulation *folgende Charakteristiken der Einzugsgebiete* berücksichtigt:

- Anteil der befestigten und der unbefestigten Oberfläche
- Terraingefälle
- Gebietsweite
- Oberflächenrauhigkeit
- Muldenverluste
- Verdunstungsrate
- Infiltrationsrate

Die Annahme dieser einzelnen Parameter erfolgt aufgrund von Angaben im Benützerhandbuch, von Empfehlungen durch SWMM-Benützer und - wie noch gezeigt wird - aufgrund der Auswertungen eigener Untersuchungen in Testgebieten. Der Oberflächenabfluss ist schematisch in Bild 3 dargestellt. Die Berechnung des Abflusses auf den einzelnen Teileinzugsgebietsoberflächen erfolgt nach der Formel von *Strickler* (Bild 4).

Anteil der befestigten und unbefestigten Oberfläche

Die sogenannte «reduzierte Fläche F_{red}» wird bei den konventionellen Berechnungsmethoden meist mit dem Spitzenabflussbeiwert ψ_s berechnet. Bei der Oberflächenabflussberechnung mit dem SWMM werden die Parameter

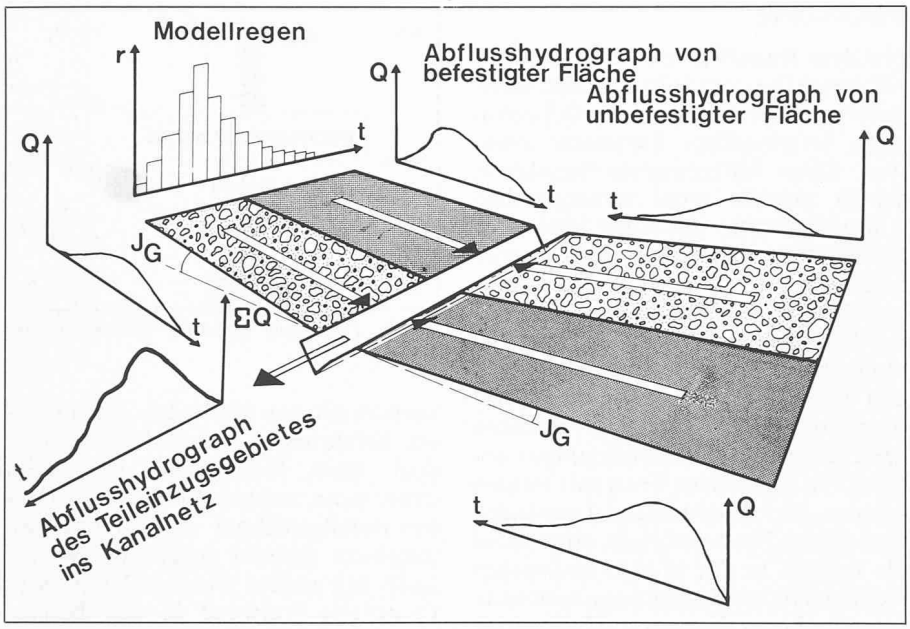
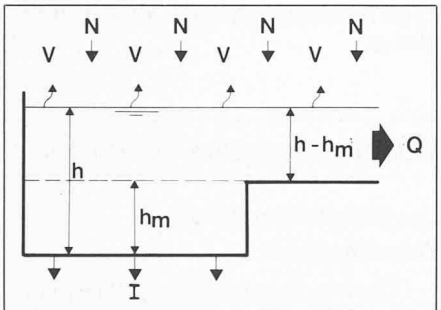


Bild 3. Schematische Darstellung des Oberflächenabflusses

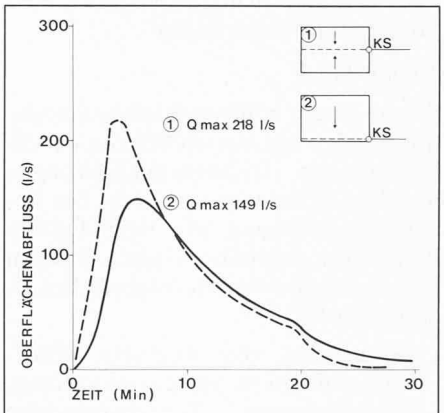


$$Q_{ab} = k_{St} \cdot W \cdot (h - h_m)^{5/3} \cdot J_G^{1/2}$$

Bezeichnungen:

h	=	Wassertiefe in der Mulde
h_m	=	Muldentiefe
$(h-h_m)$	=	Abflusstiefe auf der Oberfläche
k_{St}	=	(Oberflächen)-Rauhigkeitsbeiwert
I	=	Infiltration
J_G	=	Geländegefälle
N	=	Niederschlag
Q	=	Wassermenge
V	=	Verdunstung
W	=	Weite des Einzugsgebietes

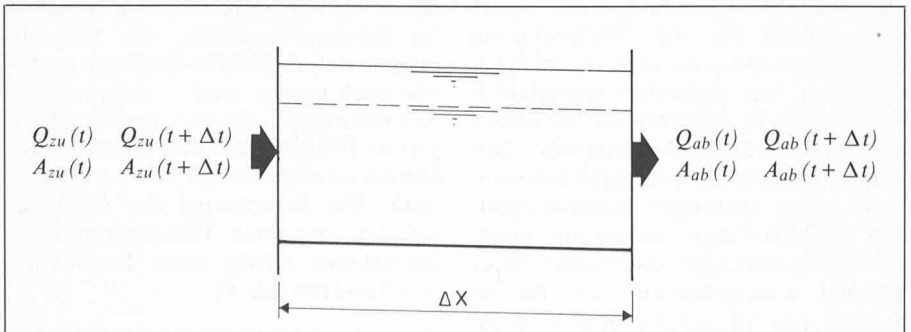
Bild 4. Oberflächenabfluss



Das Bild zeigt deutlich, wie die Lage des Kanals den Oberflächenabfluss beeinflussen kann. Speziell die Maximalwerte weichen stark voneinander ab (im vorliegenden Beispiel $Q_{max,2} = 70\%\ Q_{max,1}$)

Bild 5. Einfluss der Lage des Kanals auf den Oberflächenabfluss

Bild 6. Volumenbilanz im Kanalelement



$$\Sigma (Q_{zu} \cdot \Delta t) = \Sigma (Q_{ab} \cdot \Delta t) + Q_{Sp}$$

$$\left\{ Q_{zu}(t) - Q_{ab}(t) + Q_{zu}(t+\Delta t) - Q_{ab}(t+\Delta t) \right\} \frac{\Delta t}{2} +$$

$$+ \left\{ A_{ab}(t+\Delta t) - A_{ab}(t) + A_{zu}(t+\Delta t) - A_{zu}(t) \right\} \frac{\Delta x}{2} = \Delta Q \cdot \Delta t$$

«Muldenverluste» und «Oberflächenrauhigkeit» mit dem Anteil der befestigten und unbefestigten Oberfläche, dem sogenannten Befestigungsanteil, gewichtet. Für die Bestimmung des Befestigungsanteils gilt nach [2] angenähert folgende Beziehung:

$$\gamma = \frac{\psi_s}{0{,}85}$$

Geländegefälle J_G

Bei der Berechnung des Oberflächenabflusses spielt die Eingabe der *Gebietsneigung* eine wesentliche Rolle. Dabei wirkt sich eine Gefällserhöhung weniger auf die Charakteristik (d. h. speziell auf den Zeitpunkt des Auftretens des Maximalabflusses) als auf die Form der Abflussganglinie aus (Veränderung des Maximalabflusses). Unsere diesbezüglichen Untersuchungen haben gezeigt, dass bei einem Testgebiet bei einer Veränderung der Oberflächenneigung von 0,5 auf 10% die Abflussspitzen zeitlich nur 1–2 Minuten auseinander liegen (bei grossem Gefälle tritt die Spitze erwartungsgemäss etwas früher ein als bei kleineren). Die Grösse des Maximalabflusses erfährt mit 30% eine beträchtliche und in diesem Ausmass eher unerwartete Erhöhung.

Gebietsweite W

Die Grösse der Gebietsweite W hängt davon ab, wo im Teileinzugsgebiet die Abflussrinne (tiefste Geländelinie, beispielsweise eine offene Rinne, die Kanalisation oder der tiefste Geländepunkt) liegt (Bild 5). Wenn die Abflussrinne in der Symmetrieachse eines annähernd rechteckförmigen Teileinzugsgebietes liegt, ist W gleich der doppelten Kanallänge ($W = 2\ L$), liegt die Abflussrinne am Rande des (rechteckigen) Teileinzugsgebietes ist $W = L$. Bei beliebiger Lage der Abflussrinne im Teileinzugsgebiet ist $W = (2 - \varphi)\ L$, wobei

$$\varphi = \frac{F_2 - F_1}{F}$$

(F_1, F_2 = Teilflächen der totalen Teileinzugsgebietsfläche F)

Weitere Oberflächenparameter

Neben den bereits beschriebenen Parametern sind für die Simulation des Oberflächenabflusses noch die Einflussgrössen über die Oberflächenbeschaffenheit zu berücksichtigen. Es handelt sich dabei um die Oberflächenrauhigkeit, die Muldenverluste sowie die Infiltrations- und Verdunstungsrate. Bei der Wahl dieser Parameter werden, speziell bei den Muldenverlusten, aber auch bei der Infiltrations- und Verdunstungsrate, die Empfehlungen aus dem Handbuch, publizierte Erfahrungen von weiteren SWMM-Benützern und Ergebnisse von eigenen Testgebietsrechnungen angewendet.

Bei den Berechnungen von Bauzonen späterer Bauetappen, wo detaillierte Kenntnisse über die zukünftige Oberflächenbeschaffenheit zur Zeit der GKP-Ausarbeitung meistens fehlen, müssen diese Parameter angenommen, d. h. aufgrund von Erfahrungswerten gewählt werden. In speziellen Verhältnissen können die Oberflächenparameter mit Hilfe von Testrechnungen überprüft und wenn notwendig angepasst werden.

Der Abfluss im Kanalnetz

Das Kanalnetz besteht vor allem aus Schächten und Kanälen. Ein *Kanal* wird durch folgende Parameter definiert: Rauhigkeit k_{St}, Länge L, durchflossener Querschnitt A, hydraulischer Radius R und Wasserspiegeloberfläche. Die letzten drei Parameter sind abhängig von der momentanen Wassertiefe. Die im System fliessende Wassermenge ist die Hauptvariable. Die *Schächte* werden als Speicherelement aufgefasst. Ihre Eigenschaften sind: Volumen, Druckhöhe und Wasserspiegeloberfläche. Die Veränderung des Volumens im Kanalnetzabschnitt während zweier Berechnungsschritte dient als Grundlage für die Berechnung der Drucklinie und der Wassermenge. Bei der Berechnung des Abflusses im Kanalnetz wird das Prinzip der Volumenkontinuität angewendet, das heisst, dass das Zuflussvolumen gleich der Summe des Abflussvolumens und der Speicherung im Kanal ist.

Die Berechnungsmethode ist ein explizites Verfahren. Die Abflussgleichung wird für jede Strecke, die Kontinuitätsgleichung für jeden Knoten ohne implizite Abhängigkeit angesetzt. Nachdem die Durchflüsse $Q(t+\Delta t)$ in den Strekken bestimmt sind, werden die Wasserstände $H(t+\Delta t)$ in den Knoten berechnet. Dazu wird für jeden Knoten die Kontinuitätsgleichung angewendet und eine Wasservolumenbilanz durchgeführt. Alle während eines Zeitintervalls anfallenden Wassermengen werden dabei berücksichtigt (Bild 6).

Die Zustandsvariablen $Q(t+\Delta t)$ werden mit der nach einem Verfahren von *Euler* entwickelten Halbschritt-Ganglinienmethode bestimmt. Damit werden für jeden Zeitschritt innerhalb eines Regenereignisses für jeden Knotenpunkt bzw. Kanalstrang des Netzes die Wassertiefen und Wassermengen mit einer Abflussganglinie aufgezeichnet. Die beiden wichtigsten Formeln für die Berechnung des Abflusses im Kanalnetz sind:

- die Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

- die Impulsgleichung

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2\frac{Q}{A}\frac{\partial Q}{\partial x} + \left(g \cdot A - \frac{Q^2}{A^2} \cdot b\right)\frac{\partial h}{\partial x} + g \cdot A(J_E - J_s) = 0$$

Bedeutung der Symbole:

A = durchflossener Querschnitt
J_E = Energieliniengefälle
J_s = Sohlengefälle des Kanals
Q = Wassermenge
b = Wasserspiegelbreite
g = Erdbeschleunigung
h = Wassertiefe

Durch Einsetzen der Kontinuitätsgleichung in die Impulsgleichung erhält man die *St. Venantsche* Differentialgleichung (Details siehe [3]):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -g \cdot A(J_s - J_E) + 2v \cdot \frac{\partial A}{\partial t} + v^2 \cdot \frac{\partial A}{\partial x} - g \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x}$$

Obwohl die mathematischen Grundlagen allgemein anerkannt sind, benötigt deren Anwendung grosse Erfahrung: Das Kanalnetz mit all seinen Eigenheiten muss einerseits in eine mathematisch definierte Form gebracht werden, und anderseits möchte man mit möglichst wenig Rechenzeit genügend genaue Resultate erhalten.

Testrechnungen

Grundsätzliche Bemerkungen

Für die *Überprüfung einer neuen Berechnungsmethode* und die *Bewertung eines modifizierten Programms* ist die Durchführung von Testrechnungen ein ausserordentlich taugliches Mittel. Bei diesen Tests gilt es zu prüfen, ob die durch das Programm simulierten Oberflächenabflüsse sowie die hydromechanischen Zusammenhänge des Transportmodells der Wirklichkeit entsprechen oder zumindest die wirklichen Verhältnisse in befriedigender Übereinstimmung wiedergeben. Im konkreten Falle war das Ziel der Durchrechnung von Testgebieten die Abklärung folgender Fragen:

1. Sind die hydrologischen Parameter richtig?
2. Gibt das Runoff-Programm von SWMM den Oberflächenabfluss wirklichkeitsgetreu wieder?
3. Können mit Hilfe des Transportmodells die Abflussvorgänge von effektiven Regenereignissen in einem vermaschten und rückgestauten Kanalnetz der Wirklichkeit entsprechend simuliert werden?

Vorgängig den Testrechnungen mit natürlichen Einzugsgebieten wurde durch die Wahl von Modellgebieten und Modellregen untersucht, wie sich die *Variation der verschiedenen Berechnungsparameter* einerseits und der *Gebietscharakteristiken* anderseits auf die Form und das Maximum der Abflussganglinie von Oberflächen und im Kanal auswirken. Es wurde dabei festgestellt, dass sowohl die Berechnungsparameter als auch die Einzugsgebietscharakteristiken unterschiedliche Sensibilitätsgrade aufweisen. Es gibt einerseits Einflussgrössen, deren Variation auf das Abflussgeschehen praktisch keinen Einfluss hat, während es anderseits Parameter gibt, auf deren Variation der Abfluss äusserst sensibel reagiert (vergleiche hierzu die Darlegungen im Abschnitt über den Oberflächenabfluss). Für Kanalnetzberechnungsverfahren, die den gesamten Regenverlauf betrachten, reichen die bisher üblichen Regenauswertungen nicht aus. Die Regenspendelinien nach *Hörler/Rhein* [4] oder SNV [5] geben keine Aussage über den wahrscheinlichen zeitlichen Intensitätsverlauf sowie die Gesamtdauer und Gesamtniederschlagsmenge eines Regenereignisses gewählter Häufigkeit.

Das beim SWMM zur Anwendung gebrachte Berechnungsverfahren basiert auf der Eingabe beliebig geformter Regenereignisse, d. h., es können Regenformen eingegeben werden, die sowohl konstante Intensitäten (Blockregen) als auch variable Intensitäten (Modellregen oder gemessene Regenereignisse) aufweisen. Da in den häufigsten Fällen keine genügend aufschlussreiche Regenmessungen für bestimmte Einzugsgebiete vorhanden sind und Auftraggeber nur ausnahmsweise bereit sind, Mittel für umfangreiche Messungen bereitzustellen, ist man gezwungen, für die Bemessung von Kanalnetzen schematische Regenereignisse, sogenannte Modellregen, anzuwenden.

Über die Form, Häufigkeit oder Maximalwerte von solchen Niederschlägen wurde in der Fachliteratur viel geschrieben, und es bestehen unter Fachleuten oft Meinungsdifferenzen darüber, welches der beste Bemessungsregen darstellt. Bei der Entwicklung eines Modellregens waren für uns in erster Linie die zur Zeit gültigen Regenintensitätskurven der Schweiz (SNV-Norm, *Hörler/Rhein*) massgebend.

Zur Überprüfung des gewählten Modellregens haben wir für verschiedene Gebiets- und Regenformen Vergleichsrechnungen durchgeführt. Sie zeigten, dass der gewählte Bemessungsregen be-

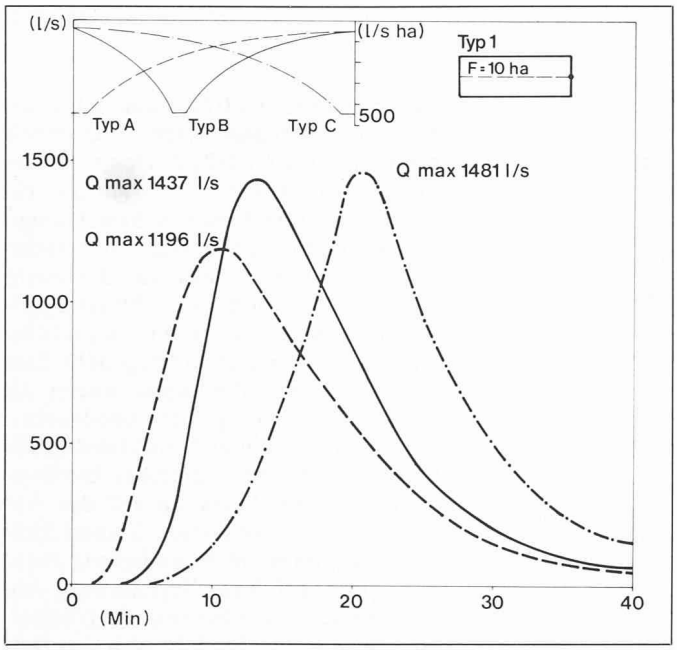


Bild 7. Rechteckform

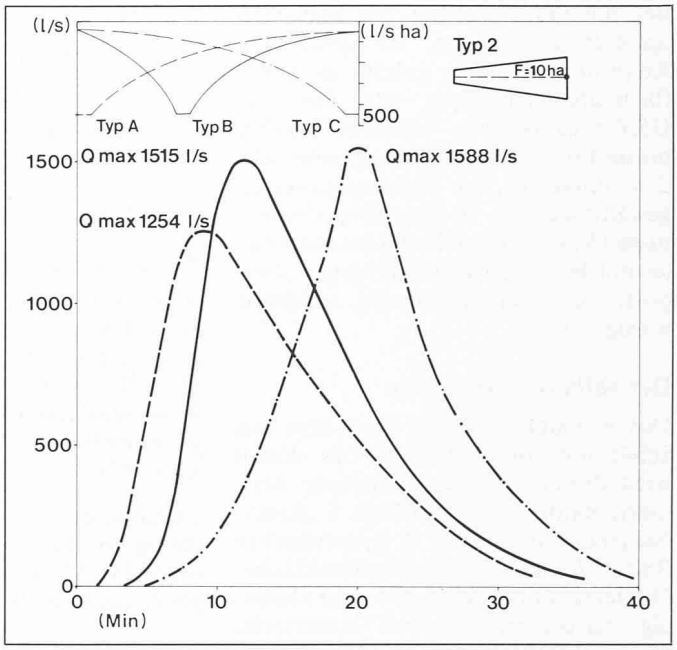


Bild 8. Trapezform mit zunehmender Breite

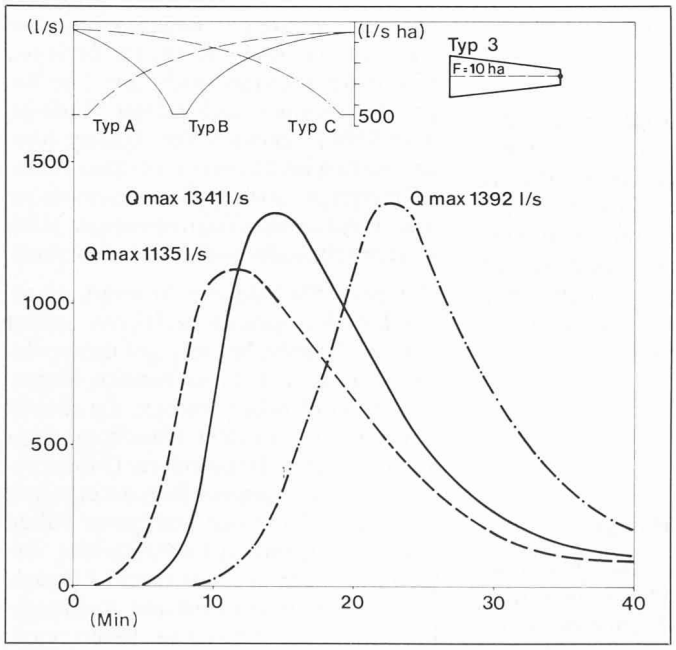


Bild 9. Trapezform mit abnehmender Breite

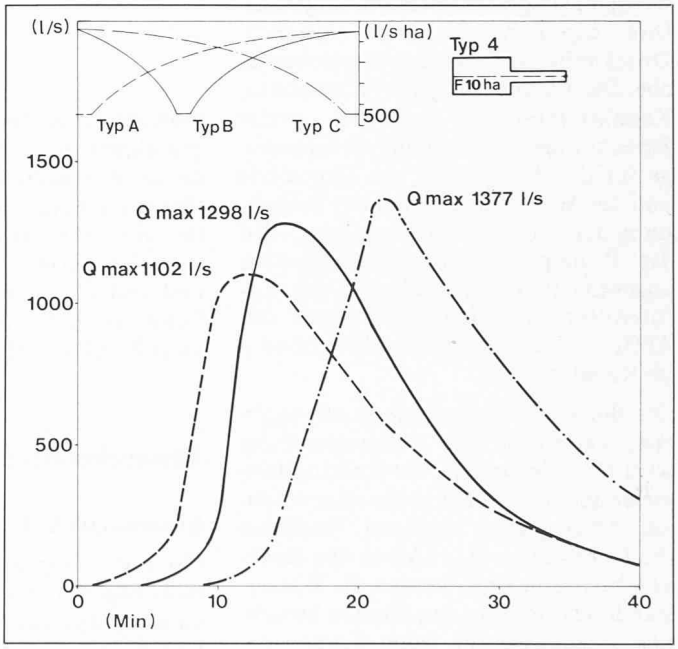


Bild 10. Birnenform

friedigende Resultate bezüglich Regen- und Abflussmengen ergab.

Der Modellregen wird in der Regel in 1-Minuten-Intervalle aufgeteilt. Die Regendauer kann für kleinere Gebiete mit 15–20 Minuten angenommen werden. Für grössere Gebiete sind Regen von 30–40 Minuten Dauer anzusetzen. Für Berechnungen, wo neben der Bemessung der Leitungen auch Rückhalteanlagen dimensioniert werden müssen, empfiehlt es sich, noch längere Regen von bis zu 90 Minuten Dauer miteinzubeziehen. Bei längerem Regen können die Intervalle jedoch auf 5–10 Minuten erhöht werden. Zur Überprüfung des Einflusses der Regen-Modellform auf die Abflussspitzen wurden verschiedene Gebiete mit drei typischen Regenerscheinungen durchgerechnet:

Typ A: Intensitätsspitze am Beginn des Regenereignisses. Das Regenmodell besitzt einen Haupt- und einen Nachregen.

Typ B: Intensitätsspitze im ersten Drittel des Regenereignisses. Das Regenmodell besitzt sowohl Vor- wie Nachregen zum Hauptregen.

Typ C: Intensitätsspitze am Ende des Regenereignisses. Das Regenmodell besteht aus Vor- und Hauptregen.

Die Bilder 7–10 zeigen, dass die 3 Regentypen auf die Grösse und das zeitliche Eintreffen der Abflussspitze einen relativ grossen Einfluss haben. In den gleichen Bildern ist auch der Einfluss der Gebietsform auf die Abflussganglinie dargestellt. Bei allen Einzugsgebieten beträgt die Fläche $F = 10$ ha.

Testrechnungen in Gebieten

Zur weiteren Überprüfung des Rechenprogramms und zur Eichung bzw. Eingrenzung der Eingabewerte der Parameter wurde eine Reihe von *Vergleichsrechnungen* durchgeführt. In drei Testgebieten, für die sowohl die genauen Einzugsflächen mit dem vollständigen Kanalnetz als auch Regen- und Abflussmessungen zur Verfügung standen, wurden detaillierte Simulationsrechnungen mit dem SWMM durchgeführt. Für die Berechnung der Abflusshydrographen wurde dem SWMM-Programm ein definiertes Kanalnetz mit folgenden Input-Daten eingegeben:

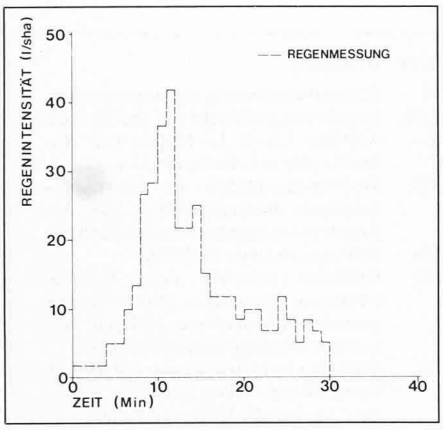


Bild 11. Regenganglinie vom 9.9.76, Testgebiet 3

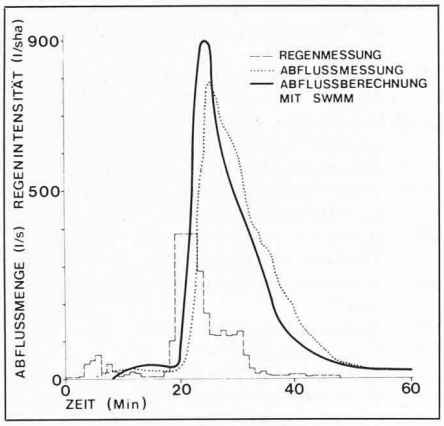


Bild 12. Testgebiet 1, Regen vom 11.7.1975, 13.45 h

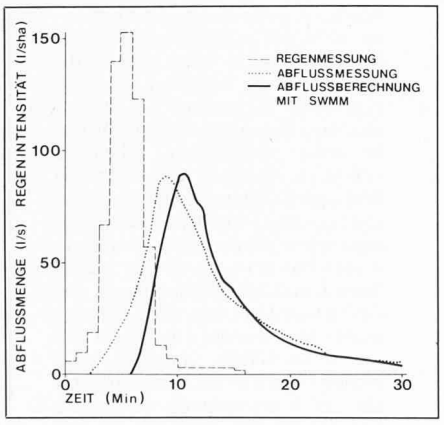


Bild 13. Testgebiet 2, Regen vom 23.6.1975, 8.00 h

Bild 14. Testgebiet 3, Regen vom 9.9.1976, 19.20 h

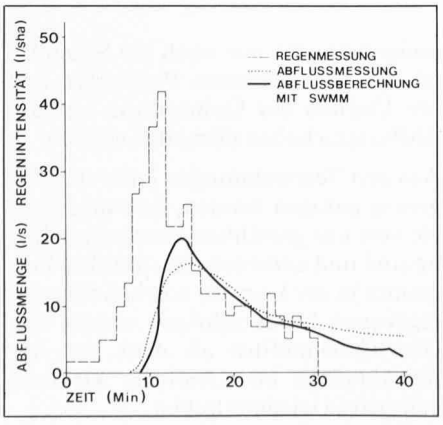


Tabelle 1. Charakteristik der Testgebiete

Bezeichnung	Symbol	Einheit	Testgebiet 1	Testgebiet 2	Testgebiet 3
Art der Überbauung	-	-	städtische Wohn- und Gewerbezone	Wohnzone mit mehrstöckigen Häusern	dicht überbaute Einfamilienhauszone
Total Einzugsgebietsfläche	F_{total}	[ha]	8,6	8,5	4,5
Mittleres Geländegefälle	J_G	[‰]	10	5	150
Anteil der befestigt. Fläche	f_b	[%]	65	49	40
Abflussbeiwerte					
- bezogen auf befestigte Fläche	ψ_{fb}	[-]	0,58–0,70	0,30–0,36	0,23–0,48
- bezogen auf Totalfläche	ψ_F	[-]	0,37–0,46	0,15–0,18	0,10–0,19
Anzahl Teileinzugsgebiete	n_F	[-]	42	26	18

Tabelle 2. Charakterisierung der Niederschläge und der Abflüsse aus den 3 Testgebieten

Bezeichnung	Symbol	Einheit	Testgebiet 1	Testgebiet 2	Testgebiet 3
Regen					
Dauer des Ereignisses	-	-	lang	kurz	lang
Regendauer	T_R	[min]	48	16	30
Ort der Spitze in der Ganglinie	-	-	Hälfte	Hälfte	1. Drittel
Regenintensität					
- maximale	r_{max}	[l/s·ha]	383	153	42
- mittlere	r_{mittel}	[l/s·ha]	68	40	11
Niederschlagsvolumen*	V_N	[m³]	1695	315	115
Charakteristik	-	-	Regenmaximum hoch mit relativ langer Dauer	Vor- und Nachregen weisen relativ hohe Intensität auf	ausgeprägte Vor- und Nachregen
Abfluss					
Abflussdauer	T_{AB}	[min]	80	33	45
Abfluss-Spitze	Q_{max}	[l/s]	786	86	42
Abflussvolumen**	V_{AB}	[m³]	622	50	21
Abflusskoeffizient V_{AB}/V_N	ψ	[-]	0,37	0,16	0,18

* während der Niederschlagsdauer
** während der Abflussdauer

für die *Knotenpunkte:* Deckel- und Sohlenkoten
für die *Kanalstränge:* Länge, Profilkennwerte, k_{st}-Wert, Sohlenabstürze

Die meisten Daten stammen aus Katasterplänen der Tiefbauämter, welche durch zusätzliche Erhebungen ergänzt wurden. Der Rauhigkeitsbeiwert nach *Strickler* k_{st} wurde aus der gemessenen Wassertiefe, der Wassermenge sowie dem Sohlengefälle berechnet.

Für die Testrechnungen standen Messungen von Regenereignissen mit einer Dauer von 13–52 Minuten zur Verfügung. Der Verlauf eines Regenereignisses ist eine Kurve (Regenganglinie wie in Bild 11 dargestellt), wobei die Fläche unter der Kurve das gesamte im Einzugsgebiet gefallene Niederschlagsvolumen darstellt. Die Regendaten wurden in Minutenschritten ausgewertet.

Die Aufzeichnungen der Abflusshöhen wurden jeweils am untersten Schacht des Einzugsgebietes durchgeführt. Die Abflusshydrographen wurden ebenfalls in Zeitschritten von 1 Minute dargestellt. Die Fläche unter der Abflusskurve ergab das Abflussvolumen.

Tabellen 1 und 2 enthalten die Charakteristik der Testgebiete bzw. der Niederschläge und Abflüsse.

In einer ersten Berechnungsphase wurden nur Einzugsgebietsflächen berücksichtigt, die einen direkten Abfluss in die Kanalisation aufweisen. In einer zweiten Phase wurde, speziell im Hinblick auf GKP-Berechnungen, die gesamte Fläche mit befestigter und unbefestigter Oberfläche berücksichtigt, d. h. dass auch diejenigen Flächen einbezogen wurden, die gemäss Geländeaufnahmen keinen direkten Abfluss in die Kanalisation aufweisen. In den Bildern 12–14 werden von diesen Testgebieten je ein gerechneter Abfluss eines charakteristischen Regenereignisses dargestellt und mit den gemessenen Abflusshydrographen verglichen.

Tabelle 3. Resultatausdruck der GKP-Berechnung Bellach

E M C H + B E R G E R B E R N A G Seite 26

Auftrag GKP Bellach Datum 05. 07. 84
Programm SWMMPP User Schmocker

1)	SCHACHT NR.	46/4A	L41	L40	L39	L38	L36
2)	ZUFLUSS 1	LS 40	LS 41	LS 42	LS 43	LS 44	LS 45
3)	ZUFLUSS 2	L3 11					
4)	ZUFLUSS 3						
5)	ABFLUSS 1	LS 41	LS 42	LS 43	LS 44	LS 45	LS 47
6)	ABFLUSS 2						
	DECKELKOTE: muM	447. 70	447. 70	445. 40	443. 60	441. 80	438. 20
	SOHLE EIN1: muM	443. 33	442. 72	441. 02	438. 92	435. 92	434. 20
	SOHLE EIN2: muM						
	SOHLE EIN3: muM						
	AUS : muM	443. 33	442. 52	440. 72	438. 62	435. 62	434. 42
	E-GEBIET ha	0. 420	0. 000	0. 620	1. 010	2. 740	0. 720
	ABFLUSSKOEF %	40.	0.	69.	51.	38.	17.
	E-GEBIET hared	0. 168	0. 000	0. 430	0. 516	1. 033	0. 120
	E-GEB TOT hared	4. 571	4. 571	5. 001	5. 517	6. 550	
	EINWOHNER	2358	2358	2358	2423	2725	
17)	QTWA l/s	0. 7	0. 0	0. 5	2. 2	4. 5	0. 6
18)	QFREMD l/s	0. 0	0. 0	0. 0	0. 0	0. 0	0. 0
	WSPmax od DL m	444. 37	443. 41	441. 54	440. 78	441. 80	438. 20
20)	KRIT/DLMAX m	1. 83	2. 79	2. 36	1. 32	-1. 50	-1. 50
21)	WSP/ROHRSCHEITm	0. 33	0. 21	0. 38	-0. 95	-4. 98	-2. 58
22)	WSP/DECKEL m	3. 33	4. 29	3. 86	2. 82	0. 00	0. 00

	KANAL NR.	LS 41	LS 42	LS 43	LS 44	LS 45
	TYP	KREIS	KREIS	KREIS	KREIS	KREIS
	DM / BREITE mm	900.	900.	900.	900.	900.
	HOEHE mm	900.	900.	900.	900.	900.
	k-WERT	85.	85.	85.	85.	85.
	LAENGE m	39. 93	49. 98	60. 05	89. 92	39. 93
	GEFAELLE %	16.	30.	30.	30.	23.
	Qvoll l/s	2503.	3455.	3455.	3455.	2993.
	Vvoll m/s	3. 93	5. 43	5. 43	5. 43	4. 69
32)	QKONST TOT l/s	23. 6	23. 6	24. 1	26. 2	30. 7
33)	H m	0. 08	0. 03	0. 03	0. 08	0. 08
34)	v m/s	1. 15	1. 59	1. 58	1. 59	1. 37
35)	Hmax oben m	1. 02	0. 89	0. 82	2. 15	6. 18
36)	Hmax unten m	0. 89	0. 82	2. 15	6. 18	3. 78
37)	QTOTmax l/s	2809.	2823.	3594.	3245.	3520.
	vmax m/s	4. 51	6. 07	6. 10	6. 10	5. 55
39)	Qmax/Qvoll %	112.	82.	104.	94.	118.
40)	KONZ. ZEIT min	8	8	9	9	10

Nebenstehend werden einzelne Zeilen, deren Bedeutung nicht ohne weiteres klar sind, kurz erläutert:

Zeile Bedeutung

1) Schachtbezeichnung alphanumerisch.
2-6) (erweiterungsfähige) Liste der Zu- und Abflüsse. LS 40, L3 11 sind zwei Zuflusskanäle zu Schacht L46/4A.
17) Trockenwetteranfall der einwohnerspezifisch, flächenspezifisch oder als Konstante eingegeben werden kann.
18) Weitere konstante Zuflüsse.
20) Differenz zwischen einer beliebig wählbaren Höhenkote (z.B. maximal tolerierte Rückstaukote) und dem maximalen Wasserspiegel im Schacht.
21) Differenz zwischen Wasserspiegel und Kanalscheitel. Wenn der Kanal eingestaut ist, wird die Differenz negativ.
22) Reserve zwischen maximalem Wasserspiegel und Schachtdeckel. Wird zu Null, wenn der Wasserspiegel auf Dekkelhöhe oder oberhalb des Deckels liegt. Negative Werte gibt es nicht, da das Wasser bei $H_w >$ Deckelkote das System verlässt!
32) Totaler Trockenwetteranfall (Schmutzwasser + Fremdwasser).
33,34) Wasserhöhe und Wassergeschwindigkeit bei TWA, berechnet unter Zugrundelegung der Normalabflusshydraulik.
35,36) Wasserstandshöhe oben und unten im Kanal beim Regenereignis.
37) Maximale Wassermenge: Summe TWA und Meteorwasser.
38) Maximale Abflussgeschwindigkeit im Kanal.
39) Auslastungsgrad des Kanals.
40) Konzentrationszeit t_c:
Bei der Listenrechnung wird die Anlaufzeit t_a über die ganze Berechnungszeit als konstant angenommen. Die Summe aus der Anlaufzeit t_a und der Fliesszeit t_f ergibt die sogenannte Konzentrationszeit t_c, d.h. die Zeit des Auftretens des maximalen Abflusses für den betrachteten Kanalquerschnitt.
Beim SWMM ist diese vereinfachende Betrachtungsweise nicht mehr gültig. Hier nimmt die Anlaufzeit t_a mit zunehmender Regendauer ab, d.h. die maximale Regenintensität trifft schneller beim beobachteten Kanalquerschnitt ein als bei der Listenrechnung. Wenn das Kanalnetz zusätzlich rückgestaut ist – was in flachen Gebieten meistens sehr rasch der Fall ist –, tritt das Abflussmaximum im ganzen flachen Netzteil praktisch gleichzeitig auf. Der Grund liegt darin, dass sich ein rückgestautes Netz wie ein kommunizierendes Gefäss verhält. Aufgrund dieser Tatsache lässt sich die Konzentrationszeit t_c der Listenrechnung nur noch beschränkt mit dem Zeitpunkt des Auftretens des Maximums bei den instationären Modellen vergleichen.

Folgerungen aus den Testrechnungen

Nach der Auswahl und der Eingabe eines bestimmten gemessenen Regenereignisses wurde mit dem *Runoff-Block* der Oberflächenabfluss für die einzelnen Teileinzugsgebiete simuliert. Beim Einlauf in die Kanalisation wird die Ganglinie des Oberflächenabflusses berechnet und dem entsprechenden Kanalabschnitt als Input übertragen.

Mit dem *Extran-Block* wurden die Abflussverhältnisse im ganzen Kanalnetz berechnet. Für diejenige Kanalstrecke, wo eine Abflussmessung durchgeführt wurde, haben wir die Abflussganglinie ausdrucken lassen und mit der aufgezeichneten Abflusskurve der Messstelle verglichen.

Die *Überprüfung* zeigt (vgl. Bilder 12-14), dass die gerechneten Abflusshydrographen sowohl in bezug auf die Maximalwerte als auch auf den Gesamtabfluss und die Form der Abflusskurve gut mit den gemessenen Kurven übereinstimmen. Anhand der Testrechnungen konnte u.a. auch die Sensibilität der verschiedenen Parameter und der Einfluss der Gebietsform auf das Abflussgeschehen überprüft werden.

Aus den Testrechnungen kann die *Folgerung* gezogen werden, dass einerseits die von uns gewählten Parameter richtig sind und anderseits das SWMM-Programm in der Lage ist, von beliebig eingegebenen Niederschlägen sowohl den Oberflächenabfluss als auch die Abflussvorgänge im Kanalnetz wirklichkeitsgetreu wiederzugeben.

Resultate einer GKP-Berechnung

Tabelle 3 enthält den *Resultatausdruck* für eine GKP-Berechnung. Er kann auftragsspezifisch ohne besondere Schwierigkeiten den Wünschen des Kantonalen Wasserwirtschaftsamtes, der zuständigen Bauverwaltung oder des verantwortlichen Tiefbauamtes angepasst werden.

Zusätzlich zu den Tabellen ist es möglich, für alle Schächte und für Kanäle Hydrographen aufzuzeichnen. Zudem können Summenkurven der Wassermengen zur Überprüfung der Berechnung und zur Dimensionierung von Sonderbauwerken ausgedruckt werden.

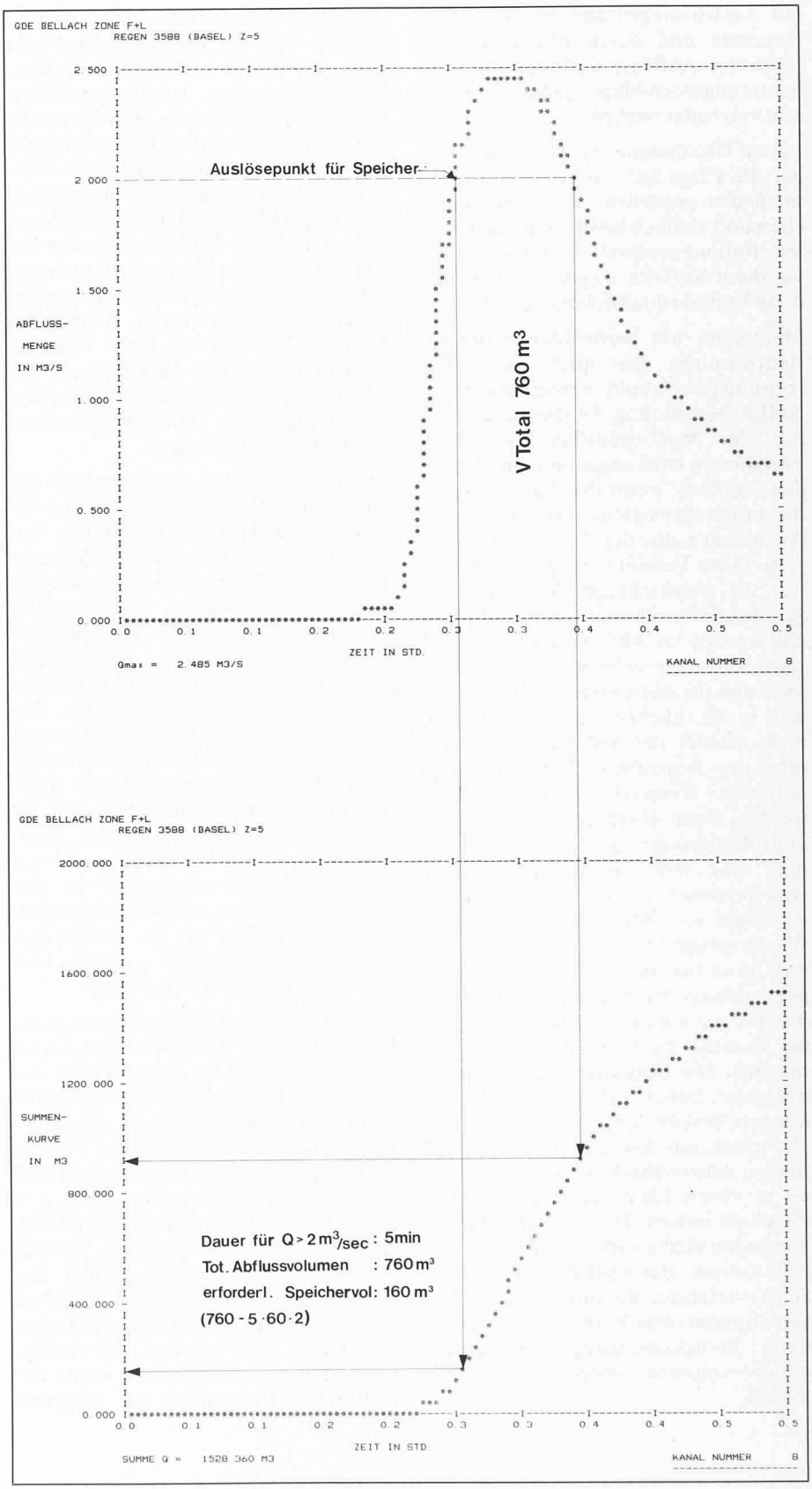
Als direkte Anwendung der Summenkurven wird in den Bildern 15 und 16 die *Dimensionierung eines Speicherkanales* dargestellt. Die maximale Wassermenge soll 2 m³/s für ein bestimmtes Kanalstück nicht überschreiten. Anhand der Wassermengenganglinien und der Summenkurve des Zulaufkanales zum Speicherkanal lässt sich das Volumen, das zurückgehalten werden soll, sofort ermitteln.

Zusammenfassung und Schlussbemerkungen

Die hydraulischen Berechnungen der GKP wurden bisher häufig mit der Listenrechnung von Hand ausgeführt. Mehr und mehr wird jedoch heute von den Gewässerschutzämtern der Vorschlag begrüsst, Kanalisationsnetze mittels hydrologischen und vor allem hydrodynamischen *EDV-Programmen* zu berechnen. Verschiedene Tiefbauämter und Bauverwaltungen haben sich bereits entschlossen oder sind im Begriffe, Beschlüsse zu fassen, ihre Kanalnetze mittels hydrodynamischen Programmen durchrechnen zu lassen.

Speziell bei *Nachrechnungen,* wo mit möglichst kostengünstigen Sanierungsmassnahmen ein optimaler Nutzen für das Kanalnetz erreicht werden soll, bringt der Einsatz einer hydrodynamischen Berechnungsmethode gegenüber der Listenrechnung erhebliche Vorteile mit sich. Dabei geht es nicht in erster Linie darum, bei der Berechnung Kosten einzusparen. Da ein hydrodynamisches Modell – wie beispielsweise das SWMM – eine genauere und erweiterte Berechnung erlaubt, jedoch bezüglich Ingenieurwissen an den Anwender grosse Anforderungen stellt, ist die Berechnung mit einem solchen Modell nicht billiger als eine Berechnung mit der Listenrechnung.

Dies gilt jedoch nur für die erste Durchrechnung des Kanalnetzes. Wenn die Elemente für die Berechnung *einmal gespeichert* sind, lassen sich mit relativ wenig Aufwand neuerliche Berechnungen mit modifizierten Daten durchführen. Sollte sich in Zukunft zeigen, dass das sanierte Netz trotzdem noch Engpässe aufweist, die sich beispielsweise in Überschwemmungen von Kellern, Tiefgaragen oder Unterführungen zeigen, kommt die Überlegenheit eines elektronischen Programms voll zum Tragen. Mittels Messungen können kritische Niederschläge, die zu Überschwemmungen führen, aufgezeichnet und als Belastung in die Berechnung eingegeben werden. Aufgrund dieser gemessenen Regen und den beobachte-



Bilder 15 und 16. Ganglinie für die Wassermenge und Summenkurve der Ganglinie

ten Auswirkungen auf das Kanalnetz einerseits und durch Simulation berechneter Abflüsse anderseits können Sanierungsvorschläge gezielt studiert und erarbeitet werden.

In den Diskussionen taucht immer wieder die Frage auf, ob die *Differentialmethoden* gegenüber der herkömmlichen und vielfach bewährten sogenannten Rationalmethode Vorteile haben, wo diese Vorteile liegen und wie sich diese Vorteile qualifizieren lassen.

Methoden, wie beispielsweise die Listenrechnung, aber auch andere Berechnungsverfahren vereinfachen die Abflussberechnung. In der Regel wird nur der Maximalabfluss betrachtet. Von diesem wird angenommen, dass er dann auftritt, wenn die Dauer des Bemessungsregens gleich der Summe der Anlaufzeit t_a und der längsten Fliesszeit t_f ist. Diese Vereinfachung trifft jedoch nur für gleichmässige Gebietsformen zu. Sämtliche Parameter der Oberfläche werden im Abflussbeiwert ψ pauschal und mehr oder weniger schematisch und subjektiv erfasst. Weiter wird, was in Wirklichkeit nach *Pecher* [6] nicht zutrifft, der Abflussbeiwert während der Regendauer konstant angenommen. Wasserspiegelberechnungen werden, wenn überhaupt, nur über die Teilfüllungsdiagramme für den Maximal- und den Trockenwetterabfluss vorgenommen. Die gleichzeitige Kenntnis von Wasserstandshöhe und Wassermenge (was beispielsweise notwendig ist für die Berechnung von Regenauslässen, Verzweigungsbauwerken usw.) ist nicht möglich. Ebensowenig ist die Berechnung von Abflussvolumen möglich. Die bisherigen Berechnungsmethoden haben sich so lange halten können, weil sie den grossen Vorteil der einfachen, zeit- und honorarkostensparenden Anwendbarkeit haben und weil sie in vielen Fällen genügend genaue Resultate liefern. Die konventionellen Methoden bleiben aber - auch wenn sie elektronisch durchgeführt werden - Schätzverfahren, die nur bei einfachen Kanalnetzen ohne Vermaschungen und ohne Berücksichtigung der Kanalspeichervolumen eingesetzt werden sollten.

Die *parallele Anwendung* der Rationalmethode und der Differentialmethode kann, wie von uns durchgeführte Testrechnungen zeigen, in extremen Fällen zu nicht unerheblichen Differenzen in den Resultaten und in der Interpretation von Berechnungsergebnissen führen. Die Testrechnungen haben gezeigt, dass in problemlosen Einzugsgebieten mit «normalen» Verhältnissen die Berechnungen «von Hand» zufriedenstellend bis gut mit den SWMM-Berechnungen übereinstimmen. Sobald jedoch die Verhältnisse nicht mehr so ideal sind, stimmten die Resultate zwischen den beiden Berechnungsmethoden oft nur noch schlecht oder überhaupt nicht mehr überein.

Häufig wird die Frage gestellt: Gibt die Rationalmethode *konservative Resultate*, d. h. gibt die Dimensionierung von Abwasserkanälen nach der Listenrechnung mehr Sicherheit? Unsere Berechnungen haben ergeben, dass das nicht immer der Fall ist. Die Interpretation der Resultate hat gezeigt, dass in einigen der mit der Differentialmethode (SWMM) berechneten Fälle der Abfluss nicht unbeträchtlich höher war als der mit der Listenrechnung bestimmte Wert. Diese Erscheinung ist vor allem bei relativ steilen Einzugsgebieten im oberen Teil des Kanalnetzes zu beobachten. In diesem Fall ist ein volldynamisches Berechnungsmodell in der Lage, den Abfluss wirklichkeitsgetreuer wiederzugeben als die Listenrechnung, wo die Anlaufzeit t_a schematisch zu 5 Minuten angenommen wird.

Die Analyse des Abflussgeschehens anhand der Regen- und Abflussganglinien hat gezeigt, dass in diesen Fällen die Anlaufzeit t_a recht kurz sein kann (gelegentlich kürzer als die meist angenommene minimale Anlaufzeit von 5 Minuten). Dies führte im untersuchten Fall (Regenintensitätskurve von Basel, z = 5) dazu, dass unsere Spitzenregenintensität bei über 500 l/s · ha liegt. Mit diesem Beispiel soll gezeigt werden, wie problematisch der Vergleich zwischen verschiedenen Berechnungsmethoden sein kann. Wir vertreten die Auffassung, dass die Tauglichkeit einer Berechnungsart eigentlich nur aufgrund von Vergleichen zwischen den simulierten und in der Wirklichkeit gemessenen Abflüssen und nicht durch Gegenüberstellung von Berechnungsmethoden am grünen Tisch nachgewiesen werden sollte.

Trotz der unverkennbaren Vorteile der Differentialmethode erfreut sich die Rationalmethode noch grosser Beliebtheit. Wir finden das gut, sofern die Rationalmethoden dort angewendet werden, wo sie mit den Differentialmethoden vergleichbare Resultate liefern. Es ist zu hoffen, dass künftig Differential- und Rationalmethoden vorurteilslos und frei von Firmeninteressen *nebeneinander* bestehen können.

Wie in jeder Kunst gibt es auch im Ingenieurwesen - und in unserem Falle in der Kanalisationstechnik - verschiedene bewährte Hilfsmittel, die die Lösung von Problemen erleichtern oder überhaupt ermöglichen. Aber auch eine teure EDV-Anlage mit einer hochentwikkelten Software kann den *erfahrenen Ingenieur* - im vorliegenden Falle den Abwasserspezialisten - nicht ersetzen. Diese schon fast banale Erkenntnis sollte bei Aufträgen für die Lösung von komplexen Ingenieurproblemen künftig wieder vermehrt beachtet werden!

Literatur

[1] *Warg, G.*, und *Kubat, J.*: «Elektronische Berechnung von Kanalnetzen, gezeigt am Beispiel Basel». Schweiz. Bauzeitung 87, Heft 47, 1969

[2] Bundesamt für Umweltschutz: «Sind die in der Praxis verwendeten Abflussbeiwerte zu hoch?» März 1980

[3] Versuchsanstalt für Wasserbau der TU München. Bericht Nr. 38 (Prof. Dr.-Ing. *F. Hartung*), 1978

[4] *Hörler, A.*, und *Rhein, H.R.*: «Die Intensitäten der Starkregen in der Schweiz». Schweiz. Bauzeitung 79, Heft 32, 1964

[5] Schweizerische Normenvereinigung: «Oberflächenentwässerung von Strassen». SNV 640 350

[6] *Pecher, R.*: «Das Zeitabflussfaktorverfahren zur Bemessung von Kanalnetzen». GWF 112, Heft 6, 1971

Adresse der Verfasser: *J. Christen*, dipl. Kult.-Ing. ETH, *H.-P. Dietrich*, Bau-Ing. HTL, *P. Schmocker*, dipl. Kult.-Ing. ETH, c/o Emch + Berger Bern AG, Ingenieurunternehmung, Gartenstr. 1, 3001 Bern.