Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 104 (1986)

Heft: 36

Artikel: Das hydrodynamische Simulationsmodell INATAT: die nichtlineare dynamische Wasserbewegung und Wassergüte in städtischen und ländlichen Entwässerungssystemen

Autor: Desserich, Marcel / Desserich, Georg / Lyons, T. Clark

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-76228

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 07.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Das hydrodynamische Simulationsmodell INSTAT

Die nichtlineare dynamische Wasserbewegung und Wassergüte in städtischen und ländlichen Entwässerungssystemen

Von Marcel und Georg Desserich, Luzern und
T. Clark Lyons, Weggis

Vorgestellt wird ein Paket hydrodynamischer Modelle zur Simulation von Abflussereignissen und Wassergüteberechnungen in städtischen und ländlichen Einzugsgebieten und des Abflussverlaufes in Kanal- und offenen Gerinnesystemen und Speicherelementen. Ein hydrodynamisches Oberflächen-Abflussmodell gestattet die Erstellung einer vollständigen, hydrologischen Wasserbilanz sowie von Abfluss- und Schmutzstoffeintragsganglinien. Für jedes simulierte Ereignis werden die Ergebnisse der Einzugsgebiete der Transportelemente (Strekken) und der Speicherstellen (Knoten) berechnet. Für beliebige Knoten und Strecken können Wasserspiegelhöhen oder Durchflüsse sowie Schmutzfrachtbelastungen bestimmt und graphisch als Ganglinie gedruckt werden.

Entwicklung und Zweck der quantitativen und qualitativen Kanalnetz- und Vorfluterbelastung

Bei der Planung neuer oder der Sanierung bestehender Entwässerungssysteme zwingen die Knappheit der Investitionsmittel einerseits und das kritische Umweltbewusstsein der Öffentlichkeit anderseits, alle Möglichkeiten zur technisch, ökonomisch und gesellschaftlich optimalen Problemlösung wirksam auszuschöpfen.

Die konventionellen Verfahren zur Bestimmung des Oberflächenabflusses berücksichtigen mit wenigen Erfahrungswerten pauschal den ganzen Vorgang vom Regen über Infiltration und Rückhalt auf den Oberflächen bis zur Strömung in Gerinneelementen vor der Einleitung in das Kanalnetz.

Bei den konventionellen Verfahren wird der Bemessungsregen durch die Parameter Überschreitungshäufigkeit, Regendauer und die zugehörige Regenmenge charakterisiert.

Bei dieser Betrachtungsweise wird vorausgesetzt, dass:

- die befestigte Fläche des Einzugsgebietes linear mit der Fliesszeit wächst
- der Ablfluss im Kanalnetz stationär gleichförmig erfolgt
- der Niederschlag ohne zeitlich und räumliche Schwankungen auftritt.

In Wirklichkeit sind diese Voraussetzungen nur selten erfüllt. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass die nach dem Fliesszeitkriterium ermittelten Abflüsse von den tatsächlichen Abflussverhältnissen abweichen.

Hydrodynamische Verfahren zur genauen Berechnung der Abflussverhältnisse in Entwässerungssystemen lassen die aus ungenauen Verfahren und entsprechend grosszügigen Sicherheitsfaktoren resultierenden Überdimensionierungen von Entwässerungseinrichtungen vermeiden.

Bei den deterministischen Simulationsmodellen dagegen tragen physikalisch fundierte Gleichungen unter Verwendung einer grossen Zahl entsprechender Parameter diesen unterschiedlichen Effekten Rechnung. Deshalb ergibt sich bei der Anwendung von Simulationsmodellen eine durch Messungen überprüfbare Übereinstimmung zwischen Naturvorgang und Rechnung. Zur Beurteilung vorhandener oder geplanter Entwässerungsnetze ist dies eine notwendige Voraussetzung.

Das hydrodynamische Simulationsmodell ist ein physikalisch und mathematisch korrektes Abbild eines vorgegebenen Systems, das die Überprüfung des instationären Verlaufes von Wasserständen, Abflüssen und Wassergüteparametern für beliebige Regenereignisse erlaubt.

Hydrodynamische Simulationsmodelle ermöglichen eine Berücksichtigung der vom Netz und der Struktur der Geländeoberfläche gesetzten Randbedingungen, Annahmen, wie sie beim Fliesszeitverfahren hinsichtlich Gebietsstruktur und Abflussvorgang gemacht werden müssen, oder die Konstanz der zeitlichen und räumlichen Niederschlagsparameter entfallen.

Der Ausbau und die Sanierung städtischer Kanalnetze wird im gesamten Bereich des Umweltschutzes in den nächsten Jahrzehnten grosse Investitionen erfordern. So ist es verständlich, dass sich die internationale Forschung seit einigen Jahren bemüht, neue Methoden zur Berechnung und Bemessung von Kanalnetzen zu entwickeln, um den planenden Ingenieuren ein besseres Rüstzeug für die Bewältigung dieser Aufgaben in die Hand zu legen. Gleichzeitig hat die Anwendung von elektronischen Daten Verarbeitungsanlagen, die sich in allen Gebieten der Technik durchsetzen, die Entwicklung auch hier entscheidend beeinflusst. Erst durch den Einsatz leistungsfähiger Rechenanlagen wird die Durchführung komplizierter Berechnungsmethoden, wie sie in mathematischen Simulationsmodellen angewendet werden, auch wirtschaftlich vertretbar.

In einer *ersten Phase* wurden EDV-Anlagen dazu benutzt, die herkömmlichen Berechnungsverfahren, wie z.B. Zeitbeiwert- und Summenlinienverfahren, wirtschaftlicher anzuwenden, ohne dass dabei die hydrologischen Grundlagen dieser konventionellen Verfahren verändert wurden [1].

In einer *zweiten Phase* versuchte man die instationäre Abflusskomponente, d.h. instationäre Abflussänderung nach der Zeit zu berücksichtigen. Damit war ein erster Schritt in Richtung mathematischer Simulationsmodelle vollzogen, so dass eine viel zutreffendere Betrachtungsweise des Abflussverhaltens in Transportsystemen ermöglicht wurde. Die genauere Erfassung der Hydraulik der Transportsysteme führte dazu, dass auch der Oberflächenabfluss einer differenzierten, instationären Betrachtungsweise unterzogen werden musste, da bei Misch- und Regenwasserkanalnetzen das Niederschlag-Abflussgeschehen die massgebende Bemessungsgrundlage bildet. Dementsprechend wurden die instationären Transportmodelle durch Oberflächen-Abflussmodelle ergänzt, die es gestatten, den gefallenen Niederschlag von seinem Auftreten am Boden bis zum Eintreten im Kanal in zeitlicher Abhängigkeit zu verfolgen.

In einer *dritten Phase* wurden chemische und hydrologische Parameter, wie BSB_5, absetzbare und nichtabsetzbare Stoffe, Stickstoffe, Phosphate u.a.m. in die mathematischen Simulationsmodelle miteinbezogen. Dadurch kann nicht nur die Abwassermenge, sondern auch die nach Ort und Zeit veränderliche Abwasserqualität in einem Kanalnetz verfolgt werden.

In einer *vierten Phase* wurde auch die Ökologie der Vorfluter selbst der Behandlung durch mathematische Simulationsmodelle zugänglich gemacht, um dadurch die Auswirkung von Sanie-

rungsmassnahmen jeder Art auf den Vorfluter besser beurteilen zu können.

Unter der Leitung der Umweltschutzbehörde der USA hat 1971 das Konsortium *Metcalf an Eddy, Inc, University of Florida* und *Water Resources Engineers, Inc,* das SWMM-I (Storm Water Management Modell) entwickelt [2].

Dieses Modell wurde in San Francisco und Seattle weiter modifiziert. Im Jahre 1973 wurden diese Simulationsmodelle zum ersten Mal in Deutschland, in Hamburg, angewendet [5].

Die amerikanische Firma *Resource Management Associates (RMA),* mit Niederlassung in Weggis, übernahm in der Folge die Fertigstellung des Hamburger Projektes und die Modifizierung der Abfluss- und Transportmodelle sowie der Vorflutermodelle.

1985 wurden von RMA diese Simulationsmodelle als Modellsystem *INSTAT* am Rechenzentrum des Ingenieurbüros *Desserich + Funk, INSTATIK DATA CENTER (IDC),* Luzern und Zürich, auf einem Prime-Computersystem installiert. Verschiedene städtische und ländliche Entwässerungssysteme in der Schweiz werden mittels dieses Programmpaketes nun bearbeitet. Insgesamt bietet die Anwendung dieser hydrodynamischen Simulationsmodelle dem Ingenieur bei der Überarbeitung des GKP eine grosse Hilfe. Sie geben wichtige Entscheidungshilfen bei der Ausarbeitung von *Sanierungsstufenplänen* und ermöglichen die Auswahl von *Sanierungsvarianten* innerhalb eines breiten Spektrums unter Berücksichtigung maximaler *Wirtschaftlichkeit.*

Vergleich zwischen einem hydrodynamischen Simulationsmodell und dem Fliesszeitverfahren

Im folgenden Kapitel wird versucht, die Unterschiede und Aspekte zwischen einem hydrodynamischen Simulationsmodell (instationär) und dem Fliesszeitverfahren (stationär) aufzuzeigen.

Das Fliesszeitverfahren beruht im wesentlichen auf folgenden Annahmen:

- Die über die Regendauer konstante Zuflussmenge (Blockregen) fliesst auf der ganzen Haltungslänge gleichmässig zu. Dies setzt ein näherungsweises rechteckiges Einzugsgebiet voraus. Die Zeit vom Regenbeginn bis zum Eintritt des Oberflächenabflusses in die Haltung wird vernachlässigt.
- Das in die jeweilige Kanalhaltung aus dem unmittelbaren Einzugsgebiet abfliessende Wasser bewegt sich während des Abflussvorganges mit einer konstanten Geschwindigkeit.
- Die vollständige Abflussganglinie an einer Schnittstelle entsteht durch Überlagerung der Fliesskurve der einzelnen Berechnungsstrecken eines Gesamteinzugsgebietes.
- Den Maximalabfluss an der Schnittstelle erhält man dadurch, dass das Kanalnetz mit Blockregen verschiedener Dauer überrechnet wird.
- Rückstau- und Überstaueffekte werden nicht berücksichtigt. Somit sind Sonderbauwerke, wie Regenüberläufe, Rückhaltebecken, Verzweiger usw., in ihrer Funktion beim Abflussgeschehen im Netz hydraulisch nicht einwandfrei zu erfassen.

Beim Fliesszeitverfahren wird mit den Regenintensitätskurven ein vereinfachtes Bemessungskriterium angenommen, intensitätsvariable Regen können nicht verarbeitet werden.

Das Fliesszeitverfahren eignet sich daher speziell für die *Neukonzeption* von möglichst unverzweigten und rückstaufreien Entwässerungsnetzen, während die hydrodynamischen Modelle hauptsächlich zur *Nachrechnung* und *Sanierung* bestehender Kanalnetze dienen.

Als Hauptunterschied berücksichtigen die hydrodynamischen Modelle die Abflussänderung nach der Zeit.

Folgende Vorteile der instationären Berechnungsverfahren gegenüber dem Fliesszeitverfahren können aufgeführt werden:

- Berechnung von vermaschten Netzen
- Erfassung der Speicherwirkungen im Kanalnetz
- Berücksichtigung der Rückstauerscheinungen
- Erfassung von Rückflüssen
- Einfache Erfassung der Sonderbauwerke im Modell
- Anschauliche Erfassung und Darstellung von Sanierungsvarianten
- Wesentlich geringere resultierende Sanierungskosten
- Berechnung der Abflussqualität und der Umweltbelastung sind möglich

Als entscheidender Vorteil ist die anschauliche Erfassung und Darstellung von Sanierungsmassnahmen festzustellen. Sanierungsvarianten wie z.B.

- Zusätzliche Vermaschung des Netzes
- Umleitungen in unterbelastete Netzteile
- Einbau von Speicherkanälen
- Auswechseln von stark überbelasteten Streckenabschnitten
- Parallelkanäle
- Bau von Retentionsbecken, Hochwasserentlastungen, Abflusssteuerungsanlage, usw.

können problemlos erfasst werden. Ein hydrodynamisches Simulationsmodell liefert mit einem etwas grösseren Planungsaufwand für die Datenbanken deutlich bessere und praxisbezogenere Werte.

Die enorme Flexibilität ermöglicht ein schnelles Durchrechnen von verschiedenen Varianten, was letztlich zu optimalen Lösungen führt. Die Sanierungskosten liegen daher beim Einsatz von hydrodynamischen Simulationsmodellen wesentlich günstiger [3, 4].

Mathematische Grundlagen der instationären Abfluss- und Qualitätsberechnung

Oberflächenabflussberechnung

Die Oberfläche kann entsprechend des Ansatzes der kinematischen Welle durchgeführt werden [6 und 8].

Bild 1 zeigt ein typisches Teilgebiet mit drei Abflusshöhen:

d_0 = Abflusshöhe zum Zeitpunkt t
d_1 = Abflusshöhe zum Zeitpunkt $t + dt$
d_S = maximale Wasserhöhe im Rückhaltespeicher

Das Ziel der Berechnung ist es, die neue Abflusshöhe d_1 zu finden, den Abfluss Q_0 zu bestimmen und bei jedem Zeitabschnitt die Massenkontinuität zu erhalten, d.h. es müssen gleichzeitig zwei Gleichungen gelöst werden:

- Kontinuitäts- oder Speichergleichung

$$(1) \quad \frac{\mathrm{d}\,d}{\mathrm{d}\,t} = \frac{d_1 - d_0}{d\,t} = R_S - I + \frac{Q_i - Q_o}{A_S}$$

R_S Regensumme während der Zeit dt
I Infiltration zum Bodenspeicher während der Zeit dt
Q_i Zufluss von oberhalb
Q_0 Abfluss
A_S Oberfläche des Elementes

- Manning-Strickler-Formel:

$$(2) \quad Q_0 = k_S J^{1/2} w \left[\frac{(d_0 + d_1)}{2} - d_S \right]^{5/3}$$

k_S = Manning-Strickler Beiwert
J = Gefälle
w = Breite der Abflussfläche

Die gleichzeitige Lösung der Gleichung 1 und 2 wird durch die Newton-Raphson-Methode verwirklicht, welche die enthaltenen Nichtlinearitäten leicht handhaben kann.

Die Grundlage für die Abflussberechnung im Transportmodell sind die Differenzialgleichungen von St.Venant,

die den instationär-ungleichförmigen eindimensionalen Abflussvorgang im offenen Gerinne beschreiben.

Nach Einsetzen in die Kontinuitätsgleichung ergibt sich die Bewegungsgleichung:

$$(3)\quad \frac{dQ}{dt} = -gFJ_r + 2v\frac{dF}{dt} + v^2\frac{dF}{dx} - gF\frac{dH}{dx}$$

g Erdbeschleunigung
Q Abfluss durch das Gerinne
v mittlere Geschwindigkeit im Gerinne
F benetzte Querschnittsfläche
H Wasserstand
J_r Reibungsgefälle

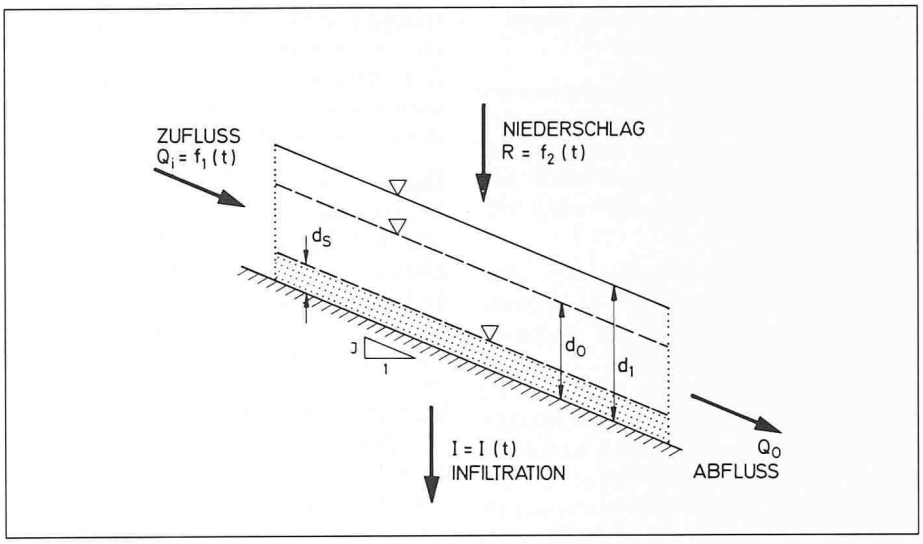


Bild 1. Typisches Abflusselement

Das Reibungsgefälle kann mit Hilfe der Gleichung von Manning-Strickler wie folgt berechnet werden:

$$(4)\quad J_r = \frac{vQ}{k_S^2 F R^{4/3}}$$

k_S Manning-Strickler Beiwert
R_S hydraulischer Radius

oder nach Prandtl-Colebrook:

$$(5)\quad J_r = \lambda\frac{v^2}{8gR};$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\log\left(\frac{2{,}51}{\mathrm{Re}\sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3{,}71\cdot 4R}\right)$$

λ Reibungszahl (dimensionslos)
Re Reynolds-Zahl
k Rauhigkeitsbeiwert (Wandrauhigkeit)

Durch Einsetzen der Gleichung für das Reibungsgefälle, Gleichungen (4, 5) in die Bewegungsgleichung (3) und Diskretisierung der Differentialgleichung erhält man unter der Annahme eines gradlinigen Wasserspiegelverlaufes zwischen den Knoten die Abflussgleichung für $Q(t + dt)$.

Diese Berechnungsmethode ist ein explizites Verfahren.

Nachdem die Durchflüsse $Q(t + dt)$ in den Strecken bestimmt sind, werden die Wasserstände $H(t + dt)$ in den Knoten berechnet.

Transport der Wassergütebestandteile

Die Bewegung des grössten Teils der Wassergütebestandteile in einem Kanalnetz erfolgt durch konservativen advektiven Transport.

Der advektive Transport kann auf zweierlei Weise dargestellt werden:

$$(6)\quad \frac{dM_k}{dt} = QC_k$$

M_k Masse der Komponente k
$\frac{dM_k}{dt}$ Änderungsrate der Masse in Funktion der Zeit
C_k Konzentration der Komponente k

$$(7)\quad \frac{dC_K}{dt} = -\frac{C_k}{V}\frac{dV}{dt} + u\frac{dC_k}{dx}$$

$\frac{dC_k}{dt}$ Änderungsrate der Konzentration in Funktion der Zeit
U Fliessgeschwindigkeit
x Entfernung
V Volumen

Bild 2. Schematischer Überblick und Zusammenhang der Simulationsmodelle mit den zugehörigen Datenbanken

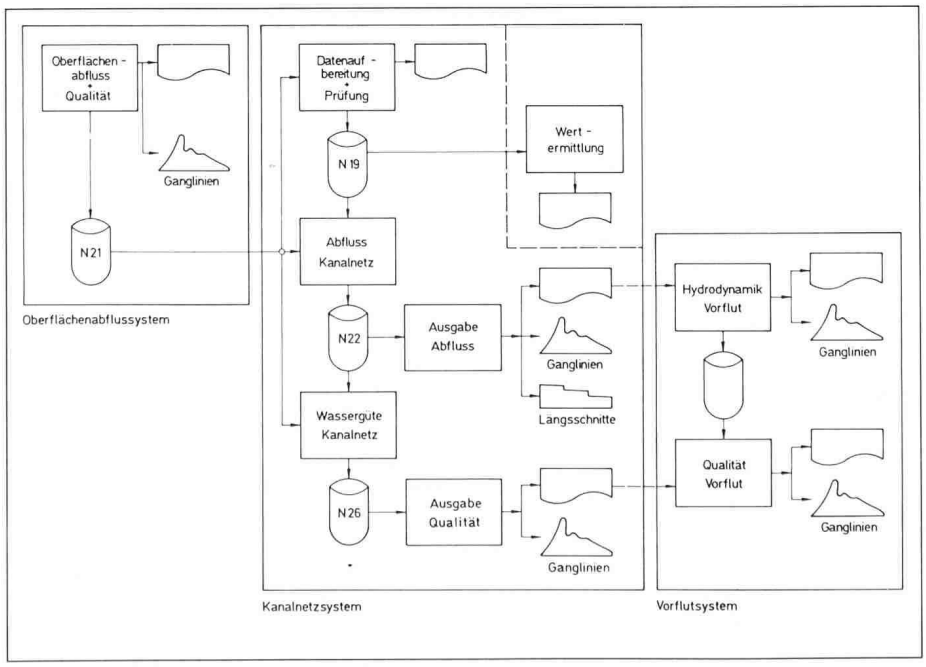
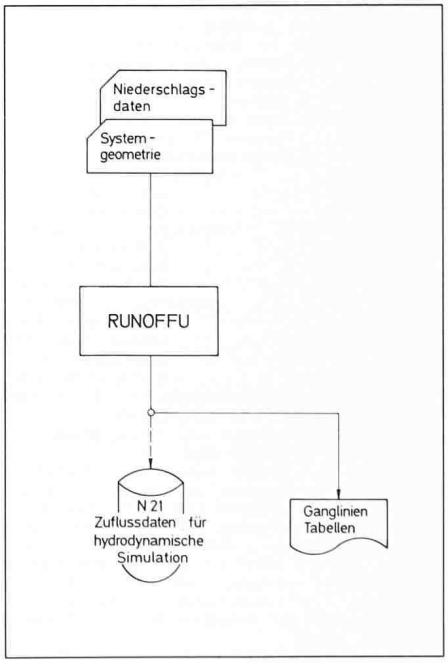


Bild 3. Datenflussplan RUNOFFU



Aufbau des hydrodynamischen Simultionsmodelles INSTAT

Das hydrodynamische Simulationsmodell INSTAT [5, 6, 7, 9, 10] setzt sich den natürlichen Vorgängen entsprechend aus den folgenden drei voneinander unabhängigen, sich aber ergänzenden Modellen zusammen:

Das *Oberflächenabflussmodell RUNOFF* berechnet die zeitlich veränderliche Menge und Qualität des Abflusses aus den Teileinzugsgebieten.
Eingabedaten für dieses Modell sind neben dem Regenereignis die hydraulischen und geometrischen Charakteristiken der Teileinzugsgebiete, der Gerinnelemente und der Trockenwetterabläufe. Das Ergebnis ist eine Oberflächenabflussganglinie für jedes Teileinzugsgebiet und Gerinnelement sowie weitere Ganglinien, die die zeitlich veränderliche Konzentration von Wassergüteparametern im Oberflächenabfluss angeben.

Die *Transportmodelle SETUP-EXSEWER-RESULT* und *TRAQAL-QALRES* simulieren die Verteilung und Translation der im Oberflächenabflussmodell berechneten Oberflächenabfluss- und Wassergüteparameterganglinien durch das Kanalnetz bis hin zum Vorfluter oder zum Klärwerk. Dabei können hydraulische Sonderbauwerke, wie Wehre, Abstürze, Durchflussöffnungen, freie Auslässe, Regenüberlauf- und Regenrückhaltebecken und Pumpwerke berücksichtigt werden. Eingabedaten für die Transportmodelle sind Oberflächenabfluss- und Wassergüteparameterganglinien sowie die geometrischen und hydraulischen Eigenschaften des Kanalnetzes. Die Modelle liefern Abfluss- und Wasserstandsganglinien sowie Frachtemissions- und Konzentrationsganglinien.

Das *Vorflutermodell RMA-12* simuliert die zeitliche und räumliche Verteilung und den Abbau vorgegebener Wassergüteparameter im Vorfluter. Notwendige Eingabedaten für dieses Modell sind die geometrischen, hydraulischen sowie die den Abbau von Wassergüteparametern bestimmenden Eigenschaften des Vorfluters. Das Resultat besteht aus Ganglinien von Stoffkonzentrationen an gewünschten Punkten des Vorfluters und stellt den logischen Endpunkt der Abflusssimulation dar.

Die folgenden Wassergüteparameter können einzeln oder gemeinsam unter Berücksichtigung gegenseitiger Beeinflussungen simuliert werden:

- Temperatur,
- konservative Minerale,
- Kohlenstoff-BSB,
- gelöster Sauerstoff,
- Stickstoffhaushalt (organischer Stickstoff, Ammoniak, Nitrit und Nitrat),
- Phosphor,
- Algen,
- Koliformbakterien,
- radioaktive Stoffe,
- Zooplankton und
- Fischbestände.

In Bild 2 ist ein schematischer Überblick und der Zusammenhang der Simulationsmodelle mit den zugehörigen Datenbanken dargestellt.

Das Oberflächenabflussmodell RUNOFFU

Bild 3 zeigt den Datenflussplan des Oberflächenabflussmodelles RUNOFFU [6, 8, 11].

Dieser Systemteil enthält als Eingabe das jeweilige Regenereignis, den Trokkenwetteranfall sowie die Charakteristiken der Teileinzugsgebiete und Gerinneelementen. Als Resultat ergeben sich Abflussganglinien der einzelnen Teileinzugsgebiete, die geplottet werden können.

Bild 4 enthält einen Auszug mit den wichtigsten Parametern der Datenbank des Systemteiles RUNOFFU.

Bild 5 zeigt drei Arten der in jedem Einzugsgebiet vorkommenden Berechnungselementen. Diese sind:

Durchlässige Flächen: Parks, Rasenflächen, Gärten, Felder, Waldflächen usw.

Undurchlässige Flächen: Dächer, geteerte Flächen usw.

Gerinneelemente: alle Abwasserkanäle, Auffangrinnen, offene Gerinne oder ähnliche Ableitungseinrichtungen, die den Abfluss von den durchlässigen und undurchlässigen Flächen sammeln und ableiten.

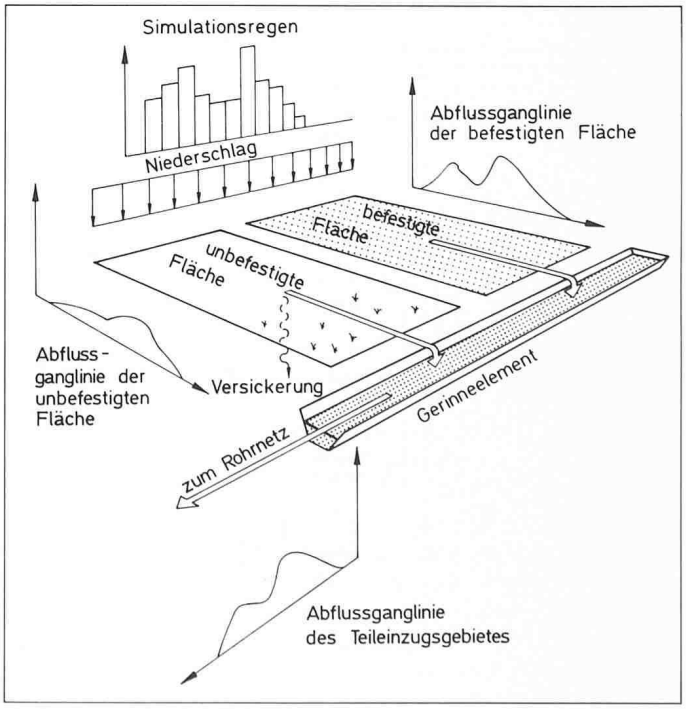
Sechs Wasserqualitätsbestandteile sind in das Abflussmodell einbezogen.

Bild 6 zeigt die Bestandteile, die derzeit mit dem Abflussmodell simuliert werden können. Am Anfang der Simulation wird die Gesamtmenge der Schmutzstoffe in und auf jedem der Sy-

Bild 4. Datenbank Oberflächenabflussmodell RUNOFFU

- Steuerdaten
- Niederschlagsdaten
- Ersatzwerte für Teileinzugsgebiets - Quantitätsdaten (Default)
- Quantitätsdaten für Teileinzugsgebiete :
  - Nummer des Einzugsgebietes
  - Nummer des Eingabeknotens
  - Fläche
  - Anteil der befestigten Fläche
  - Nummer der Regenschreiber und deren Einflussfaktoren
  - Trockenwetterabflussspende und deren Flächennutzung
    - Gerinneelementdaten :
      - Abflusslänge , Breite , Gefälle
      - Geschwindigkeitsbeiwert
    - Befestigte Flächendaten :
      - Abflusslänge , Breite , Gefälle
      - Geschwindigkeitsbeiwert
      - Oberflächenrückhalt
    - Unbefestigte Flächendaten :
      - Abflusslänge , Breite , Gefälle
      - Geschwindigkeitsbeiwert
      - Oberflächenrückhalt
      - Infiltrationsbeiwerte
- Ersatzwerte für Teileinzugsgebiets - Qualitätsdaten (Default)
- Qualitätsdaten für Teileinzugsgebiete :
  - Nummer des Einzugsgebietes
  - Rinnsteinlänge
  - Anzahl Gullys und Volumen
  - Angaben über Strassenreinigung
  - Angaben über TWA - Qualität
  - Angaben über die Qualität des Wassers in den Gullys
- Qualitätssimulation - Parameter :
  - Schmutz - und Staubaufbaukoeffizenten
  - Schmutz - und Staubaufteilungsfaktoren
  - Ausspühlungs - Koeffizenten
- Steuerdaten der Ausgabenlisten und Ausgabengraphik

Bild 5. Idealisierung des Abflusssystems



stemelemente geschätzt. Mit Beginn des Regens bewegen sich die Schmutzstoffe aus den Teilgebieten und Gullys zu den Gerinneelementen des Systems hin. Bei jedem Zeitschritt wird eine Massenbilanz für jedes Systemelement ermittelt, und die Bewegung der Inhaltsstoffe im Gerinnesystem wird als eindimensionaler Advekationsprozess berechnet. Alle aufgenommenen Bestandteile werden mit dem Abfluss konservativ, d.h. unter Annahme vollständiger Durchmischung und ohne Berücksichtigung chemisch-physikalisch-biologischem Abbau oder Umbildungsprozesse, mitgeführt und tabellarisch oder graphisch an jeder Kombination gewählter Systemknoten ausgegeben. Die Wassergütesimulation ist Bestandteil des Abflussmodells, die Abflusssimulation kann jedoch auch ohne Gütesimulation durchgeführt werden.

Das Transportmodell SETUP-EXSEWER-RESULT

Das Transportmodell besteht aus drei getrennten Programmen, von denen jedes seine eigene spezifische Funktion hat [7, 12]. Das Programm SETUP liest die auf Karten bzw. Datenrecords eingegebenen Systembeschreibungen, überprüft die Daten-Konsistenz und schreibt eine Systemdatei in dem für die hydrodynamische Simulation geeigneten Format. Das Programm EXSEWER führt die hydrodynamische Simulation aus und gibt in begrenztem Umfang zusammengefasste Ergebnisse aus. Der Hauptteil der Ergebnisse wird in eine Datei zur späteren Verarbeitung mit dem Modell RESULT geschrieben. Dieses Nachverarbeitungsprogramm erzeugt wahlweise eine detaillierte tabellarische oder graphische Ausgabe der Simulationsergebnisse.

Bild 7 zeigt den Datenflussplan zwischen diesen drei Programmen. Es ist zu erkennen, dass dieses Modell fünf verschiedene Dateien besitzt. Im Transportmodell wird das Abflusssystem durch Knoten und Verbindungen beschrieben, wodurch eine diskrete Wiedergabe des physikalischen Systems und die mathematische Lösung der Gleichungen des sich allmählich ändernden instationären Fliessens möglich ist.

Wie Bild 8 zeigt, wird das Haltungssystem durch Knoten, die mit Strecken untereinander verbunden sind, idealisiert. Strecken und Knoten haben genau definierte Eigenschaften, welche die Wiedergabe des gesamten Haltungssystems ermöglichen. Jede Rechenstrecke wird von 2 Knoten begrenzt. Knoten des Modellnetzes sind mit Schächten im vorhandenen Kanalsystem vergleichbar. Durchflussöffnun-

Feste Stoffe	**Nährstoffe**
- Absetzbare Stoffe	- Gesamtstickstoff
- Schwebestoffe	- Orthophosphat
Anorganische Stoffe	**Schwermetalle**
- z. Zt. keine	- z. Zt. keine
Organische Stoffe	
- Biochemischer Sauerstoffbedarf	
- Fettstoffe	

Bild 6. Simulierte Wassergütebestandteile Oberflächenabflussmodell RUNOFFU

Bild 7. Datenflussplan des Transportmodells

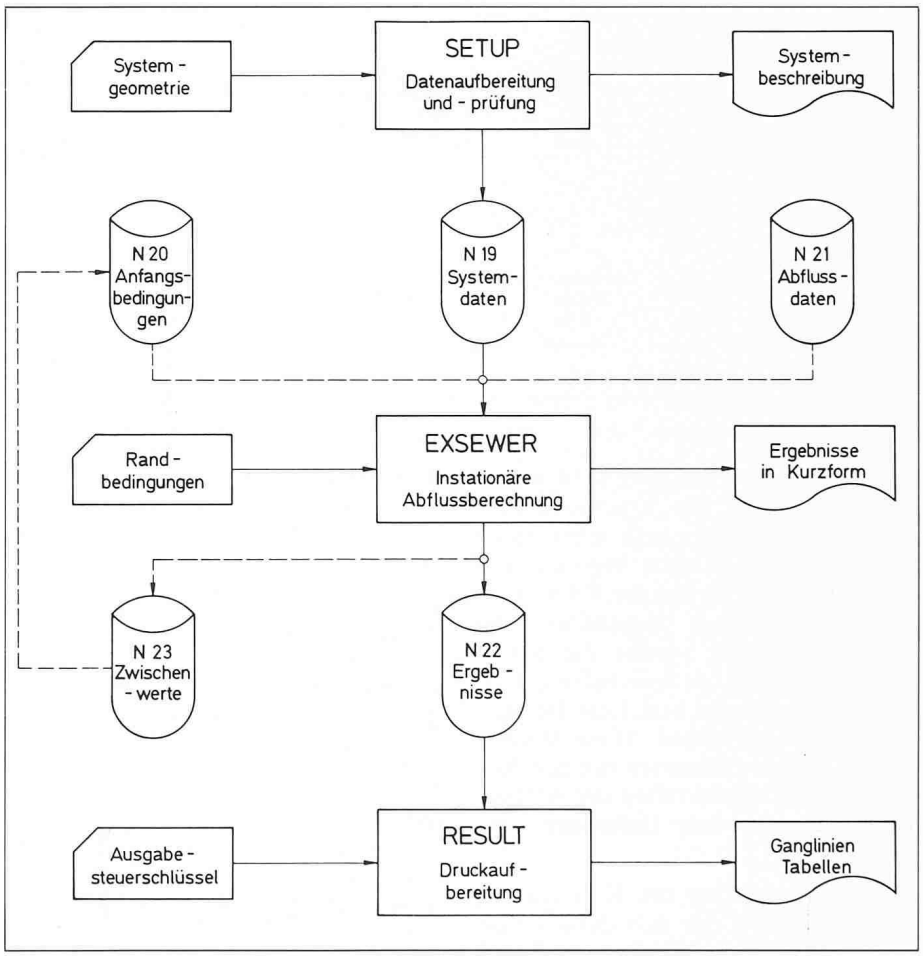
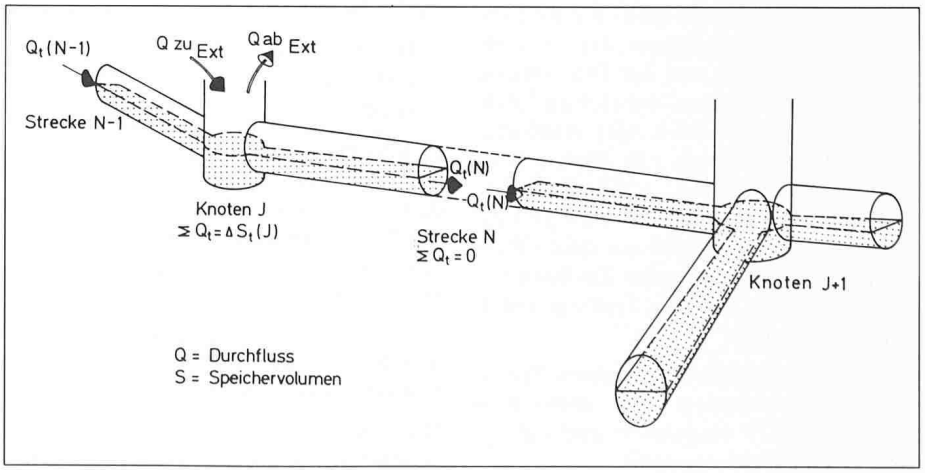


Bild 8. Modellidealisierung eines Transportsystems



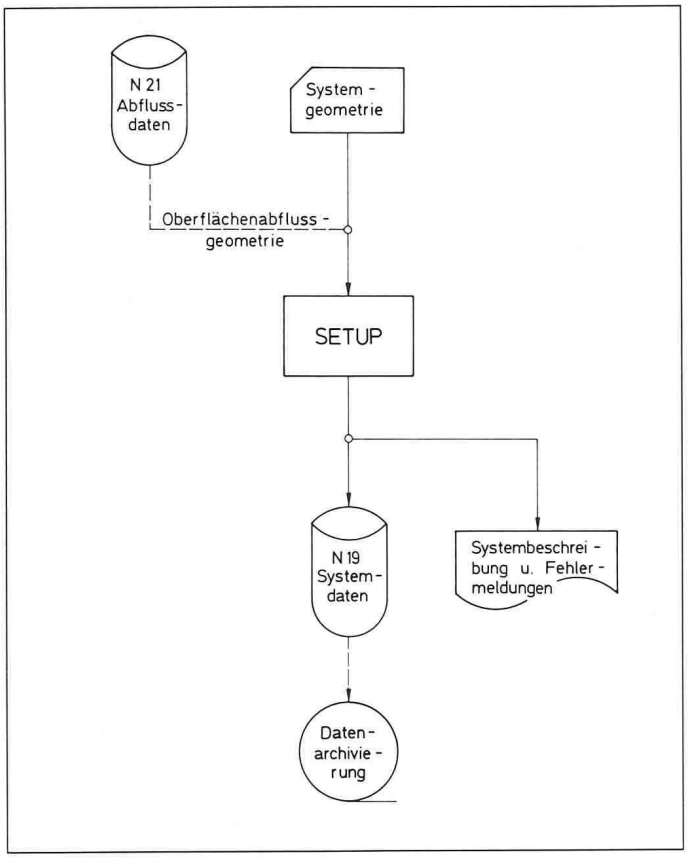


Bild 9. Datenflussplan SETUP

- Steuerbefehle
- Auftraggeber, Bearbeiter, Auftragnehmer, Datum, Dimensionen
- Ersatzwerte :
  - Streckenein - und Streckenaustrittsverluste
  - Fliessformel
  - Energieverlustbeiwert
  - Knotenfläche
  - Faktor Speicherflächen
- Rechenstreckendaten :
  - Streckennummer, Knotennummer
  - Querschnittstyp, Querschnittsfläche, - Höhe, - Breite
  - Länge, Sohlenhöhe
  - Enegieverlustbeiwerte, Verlustbeiwert
  - Seitenneigung
  - Dämpfungswert
- Querschnittsdaten für nicht klassifizierte offene Rechenstrecken
- Knotendaten :
  - Nummer, Geländehöhe, Basiszufluss
  - Knotenfläche, Strassenbezeichnung
  - X/Y - Koordinate
- Durchflussöffnungsdaten :
  - Nummer, Knotennummer
  - Sohlenhöhe, Querschnittsfläche, Überfallbeiwert, Durchflussbeiwert
- Wehrdaten :
  - Nummer, Knotennummer
  - Wehrtyp, Schwellenhöhe, Schwellenlänge, Scheitelhöhe
  - Überfallbeiwert, Durchflussbeiwert
- Pumpdaten :
  - Nummer, Knotennummer
  - Pumpensumpffläche, Einschaltwasserstand, Förderleistung
- Schnittstellen - Knoten :
  - Eingabe der Knotennummer
- Speichervolumendaten :
  - Nummer, Speicherfläche, Speichersohlenhöhen, Speicherscheitelhöhe

Bild 10. Datenbank zum Programm SETUP

gen, Wehre und Pumpen werden programmtechnisch wie Strecken behandelt. Ein Sonderbauwerk muss daher ebenfalls von 2 Knoten begrenzt werden. Im Modell werden den Knoten Volumeneigenschaften zugeordnet. Das Lösungsverfahren wendet die Kontinuitätsgleichung mit Speicherung in jedem Knoten an und berechnet die zugehörigen Wasserspiegel. Diese Wasserspiegel dienen zusammen mit den Reibungs- und Impulskräften der Abflussberechnung in den Haltungen oder Strecken.

Durch Anwendung der Kontinuitätsgleichung sowie der sich daraus ergebenden Wasserspiegelhöhen und Fliessverhältnisse in den Strecken kann die Fortpflanzung von Rückstaueffekten durch das System erfasst werden. Ausserdem macht die Benützung dieses expliziten Lösungsverfahrens die Reihenfolge der Berechnungen der Wasserspiegel an Knoten und der Durchflüsse durch Verbindungen unwichtig. Alle Zuflüsse in das System oder Ausflüsse aus dem System, wie z.B. Wehre oder Durchflussöffnungen zu Trockenwetterabflusssammlern, Pumpstationen, Auslässe, Zuflüsse aus dem Oberflächenabflusssystem oder Zuflüsse aus einem anderen Teil des Systems, erfolgen über Knoten.

Systemeigenschafts-Daten eines Transportsystems werden mit dem Programm SETUP eingelesen und auf systematische Fehler geprüft.

Bild 9 zeigt den Datenflussplan, Bild 10 eine Zusammenfassung der notwendigen Datenbank zum Programm SETUP.

Problemdaten, d.h. Belastungen und Randbedingungen der zu simulierenden Zustände werden im Programm EXSEWER eingelesen und bearbeitet. Bild 11 zeigt den Datenflussplan zum Programm EXSEWER.

Die Daten für das Programm RESULT dienen der Stellendefinierung zur detaillierten tabellarischen und graphischen Ausgabe der Simulationsergebnisse. Bild 12 zeigt den Datenflussplan zum Programm RESULT.

Unterstützungsprogramme zu INSTAT

Das Programmpaket INSTAT besitzt verschiedene Unterstützungsprogramme im Bereich der

- Datenvorbereitung,
- Datenverarbeitung,
- Graphischen Darstellung von Daten.

Es können Ganglinien von Wasserständen und Durchflüssen geplottet werden. Ebenso kann das Strecken-Knoten-Netz graphisch dargestellt werden. Längsschnitte durch ausgewählte Strekkenstränge können gezeichnet werden.

Vorflutermodell RMA-12 Umweltschutzkonzepte

Das Vorflutermodell ist ein allgemeines Modell zur Simulation von Gewässertemperaturen und Gewässerökologie. Dieses Modell ermöglich es, stationäre oder dynamische Simulationen der verschiedensten Wasserinhaltsstoffe eindimensional-horizonal durchzuführen. [9, 10].

Diese Fähigkeit des Vorflutermodells ermöglicht dem Benützer sowohl Aussagen über die Auswirkungen verschiedener Einleitungen auf die Wassergüte eines Gewässers für den Istzustand als auch Vorhersagen über die Auswirkungen alternativer Umweltschutzkonzepte. Ebenso ist es möglich, die Mindestanforderungen für Einleitungen mit Hilfe dieses Simulationsmodells zu bestimmen.

Andere, ähnlich aufgebaute Vorflutermodelle können folgende Fliess- und Gütebedingungen auch nachbilden:

- Eindimensional-vertikal: Seen
- Zweidimensional-vertikal: Seen und Flüsse
- Zweidimensional-horizontal: Flüsse
- Dreidimensional: Seen und Flüsse
- Durch Temperatur, Sediment oder gelöste Salze bedingte Schichtungen
- Sedimentausspülung, -transport und -ablagerung.

Bild 13 stellt ein vereinfachtes Konzept der Vorgänge in einem wässrigen ökologischen System dar. Diese Prozesse sind im Modell deterministisch nachgebildet. Das Modell ermittelt durch numerische Integration eine Massenbilanz auf Grundlage von Advektion und

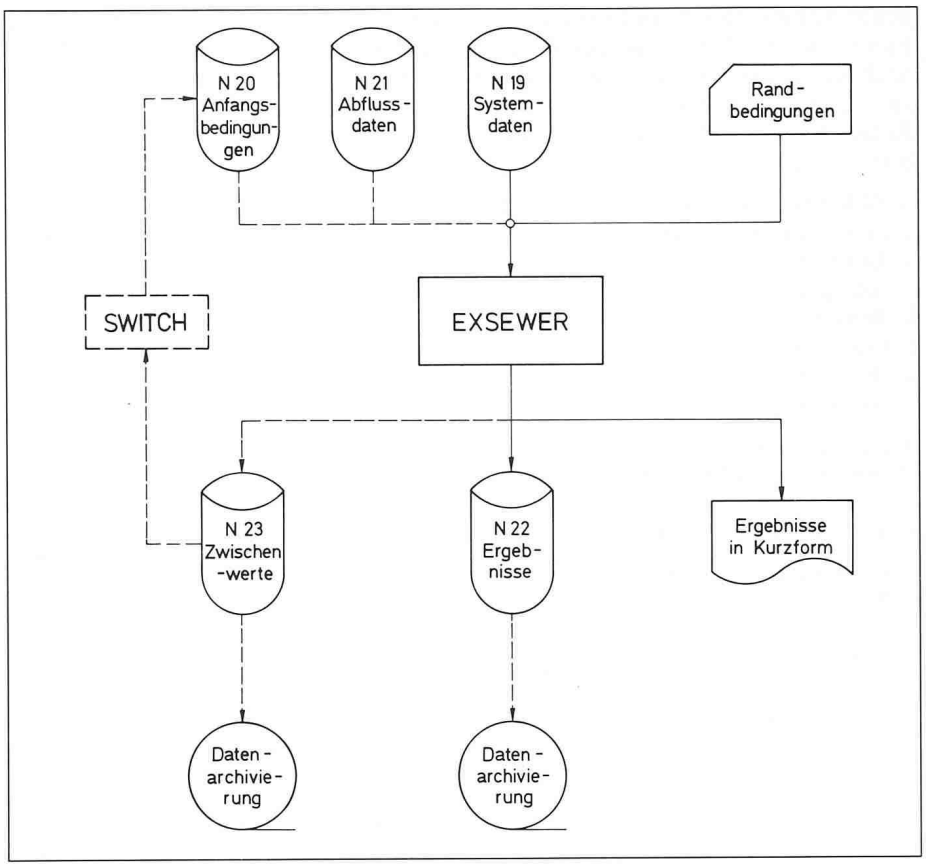


Bild 11. *Datenflussplan EXSEWER*

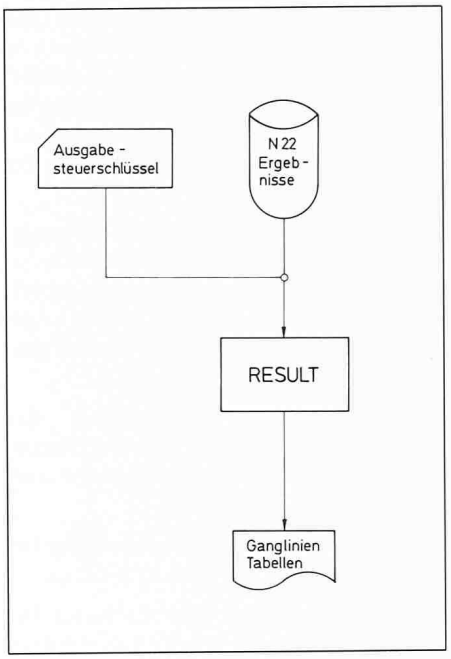


Bild 12. *Datenflussplan RESULT*

Dispersion für alle betrachteten Wasserinhaltsstoffe.

Die Belastungen des betrachteten Flusssystems können folgenden Quellen entnommen werden:

- Zuflüsse von ausserhalb, Haupt- und Nebenflüsse
- direkte Einleitungen
- Entnahme aus dem System
- diffuse Quellen.

Modelleichung

Viele Parameter (Länge, Gefälle usw.) können direkt bestimmt werden. Andere Parameter (Abflussrauhigkeit usw.) können bezüglich ihrer physikalischen Basis zunächst nur geschätzt werden und ihre endgültigen Werte müssen durch eine Eichung bestimmt werden. [6, 7, 8].

Zur Eichung werden simulierte und gemessene Zustandsvariabeln für dasselbe Ergebnis verglichen und die Modellparameter werden solange angepasst, bis die Differenz zwischen simulierten und gemessenen Werten ein Minimum erreicht. Eine Betrachtung der Modellgleichungen führt zu folgenden wichtigen Bemerkungen:

□ Die detaillierte Aufteilung des Einzugsgebietes und der Transportelemente führt zu einem rapiden Anwachsen der Anzahl der unbekannten Parameter.

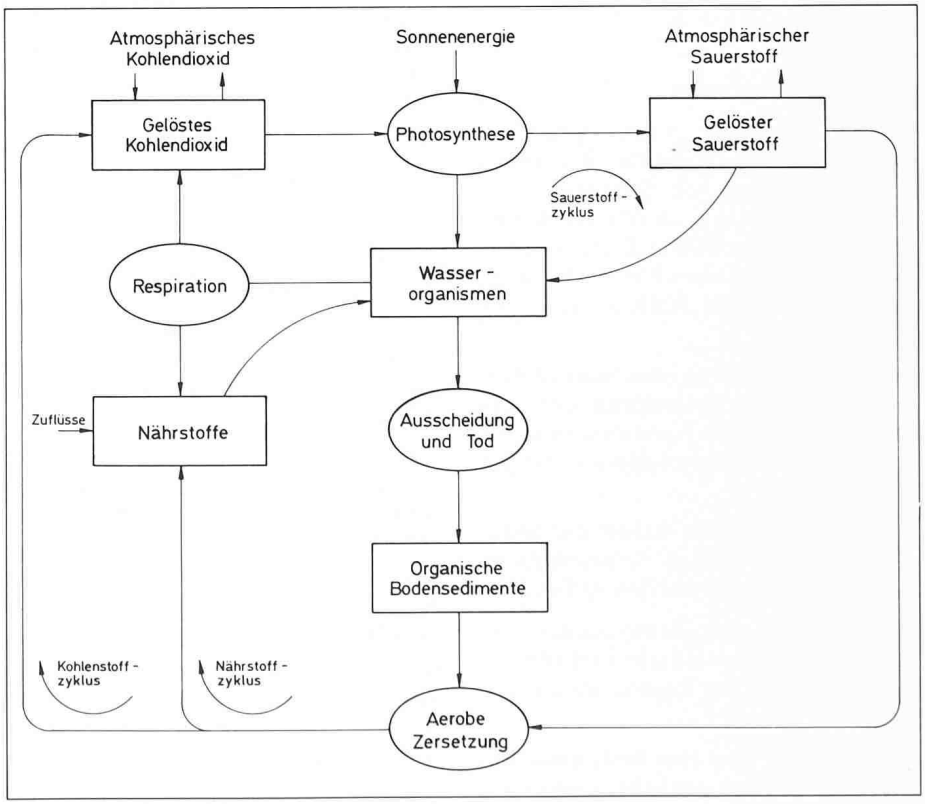
□ Alle unbekannten Parameter müssen mit Messungen aus einer begrenzten Anzahl von Ereignissen bestimmt werden, die der Abfluss aus zahlreichen Teilgebieten und Transportelementen enthalten.

□ Unsichere Niederschlagsmessungen haben eine dominierende Wirkung sowohl auf die Abflussvorhersage als auch auf die Parameterbestimmung.

Folgende Punkte sollten deshalb bei einer Modelleichung berücksichtigt werden:

□ Die räumliche Anordnung der

Bild 13. *Vereinfachte Darstellung des ökologischen Systems*



Messstelle sollte so gewählt sein, dass die Anzahl der während der Eichung zu bestimmenden Parameter reduziert wird. Möglichst weit oberhalb gelegene Messstellen in Teilgebieten mit einheitlicher Landnutzung sollte der Vorzug gegeben werden.

□ Innerhalb einzelner Abflussereignisse sollten kürzere Messintervalle in der Phase des sich jeweils am schnellsten ändernden Systemzustandes angestrebt werden, d.h. für die Wassergüte am Beginn des Ereignisses.

□ Eine genaue Beschreibung der räumlichen und zeitlichen Niederschlagsverteilung sollte angestrebt werden.

□ Die mehrfache Probenentnahme bezüglich Zeit und Ort ist sehr wichtig.

□ Es sollten nur solche Paramter bestimmt werden, die tatsächlich aus dem ausgewerteten hydrologischen Ereignis signifikant sind. Mit anderen Worten, die unempfindlichen Parameter sollten während der Eichung nacheinander herausgenommen werden, bis nur noch die Parameter verbleiben, die sich den Messungen gegenüber empfindlich erweisen.

Vor der Modelleichung sollte die Messserie geteilt werden. Mit dem ersten Teil der Messwerte sollten die Modelle geeicht werden, der zweite Teil hingegen sollte der Verifikation dienen. Bei der Verifikation werden die Ereignisse einfach simuliert und die Ergebnisse mit den Messungen verglichen. Die Verifikation liefert ein statistisches Mass für die Vorhersagegenauigkeit des Abfluss- und Transportmodells.

Der Bemessungsregen

Bedingt durch die grosse Variabilität der Niederschlagsvorgänge ist man bei der Verwendung von Simulationsmodellen oft unsicher, ob das als Bemessungsregen ausgewählte Ereignis, auch für alle Strecken eines Netzes den sogenannten kritischen Abfluss liefert [14, 15].

Für die Anwendung von Simulationsmodellen zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit von Kanalnetzen ist daher die Beantwortung folgender Fragen wichtig:

□ Welchen Einfluss haben die zeitlichen und räumlichen Schwankungen der Regenintensität auf den Abfluss?

□ Wie lassen sich Bemessungen formulieren, die die zeitliche und räumliche Variabilität des Regens berücksichtigen?

Die Tatsache, dass eine bestimmte Regenmenge je nach zeitlicher und räumlicher Verteilung unterschiedliche Abflüsse erzeugen kann, und der Wunsch nach einem Bemessungsereignis führen zur Entwicklung von Verfahren für die Regenverteilung in einem Einzugsgebiet wie z.B.:

- Ableitung von Regenspenden-Regendauer-Häufigkeitskurven
- Ermittlung von Gebietsniederschlagskurven
- Bestimmung der zeitlichen Intensitätsverteilung
- Aufstellen einer räumlichen Intensitätsverteilung

Eine andere Möglichkeit besteht in der Annahme von 4 Bemessungsregen, welche durch meteorologische Gesichtspunkte begründet werden:

- 60-Minuten-Starkregen.
- Konvektiver 120-Minuten-Schauerregen, der durch das Entstehen und Zusammenbrechen einzelner Schauerzellen über einem Stadtgebiet entsteht.
- Advektives 4-Stunden-Niederschlagsereignis.
- 6-Stunden dauernder, typischer Aufgleitregen mit relativ gleichmässiger Niederschlagsverteilung.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass die Auftrittshäufigkeit eines simulierten Ereignisses, *nicht* der Auftrittshäufigkeit des Niederschlags entspricht.

Modellanwendung

Ein Entwässerungssystem eines Gebietes besteht aus Haltungen und Schächten sowie gegebenenfalls aus Sonderbauwerken [3, 4]. Die Länge der Haltungen wird aus dem Abstand der Schächte bestimmt, die am oberen und unteren Ende der Haltung angeordnet sind.

Zur mathematischen Simulation eines bestehenden Kanalnetzes müssen Vereinfachungen aus folgenden Gründen getroffen werden:

□ Wird jede Haltung als Berechnungsstrecke verwendet, so entsteht eine sehr grosse Datenmenge, die mit einem entsprechenden Rechenaufwand in der Rechenanlage verarbeitet werden muss.

□ Die Genauigkeit der Ergebnisse wird mit steigender Datenmenge keineswegs grösser. Zu feine Modelle zeigen Schwierigkeiten in der Numerik des Modells, die auf Kosten der Genauigkeit gehen.

Der mit dem Modell arbeitende Ingenieur muss in der Lage sein, den Abflussvorgang gedanklich nachzuvollziehen. Zudem muss er beurteilen können, ob die Ergebnisse physikalisch sinnvoll sind. Aus diesem Grunde sollte das System nicht mehr als 400 Berechnungsstrecken enthalten.

Jede Berechnungsstrecke sollte 100 bis 200 m lang sein. Diese Forderung bedingt, dass bestehende Haltungen mit gleichem Querschnittstyp- und gleicher Querschnittfläche sowie mit gleichem Sohlengefälle, zusammengeschlossen werden. Die Rechenstrecke darf auf keinen Fall kleiner als 10 m sein.

Die Abflüsse und Wassergüten aus städtischen und ländlichen Einzugsgebieten werden simuliert, um Hochwasser- oder Wassergüteprobleme an abwärtsliegenden Querschnitten zu lösen, die durch den Abfluss hervorgerufen oder beeinflusst werden. Abfluss oder Inhaltskonzentation dürfen ein kritisches Niveau nicht öfter als einmal in «n» Jahren überschreiten. Ein derartiger statistischer Ansatz zur Lösung von Umweltschutzproblemen ist realistisch.

Verschiedene Techniken liegen zur Benutzung von Vorhersagesimulationsmodellen in Planungsstudien vor:

□ Ereignissimulation von Planungsalternativen wie Daten aus kritischen historischen Ereignissen.

□ Ereignisssimulation von Planungsalternativen mit unabhängigen Variablen, die aus statistischen Untersuchungen bestimmt werden.

□ Langzeitsimulation von Planungsalternativen mit einer historischen oder stochastischen Eingabefolge. Die Ergenisse der Simulation werden darum statistisch analysiert, um ein Mass der Projektwirksamkeit zu erhalten.

Die ersten beiden Ansätze geben die Reaktion auf die Spezifizierung von Randbedingungen, ermöglichen jedoch keine quantitative Aussage über die statistische Wirksamkeit eines Projektes.

Es können nur Schritte dahingehend unternommen werden, zu garantieren, dass die Randbedingungen einer ereignisorientierten Simulation physikalisch so repräsentativ wie möglich bezüglich verschiedener Ereignisse im Einzugsgebiet sind.

Der dritte Ansatz ist die einzige Möglichkeit, die Wirksamkeit einer Planungsalternative statistisch zu quantifizieren.

Beispiel

Testberechnung des GKP Zürich City Altstadt links der Limmat vom See bis zur Augustinerkirche [16].

Gegeben:

- Daten des Testgebietes (Flächen/Befestigungsgrad),

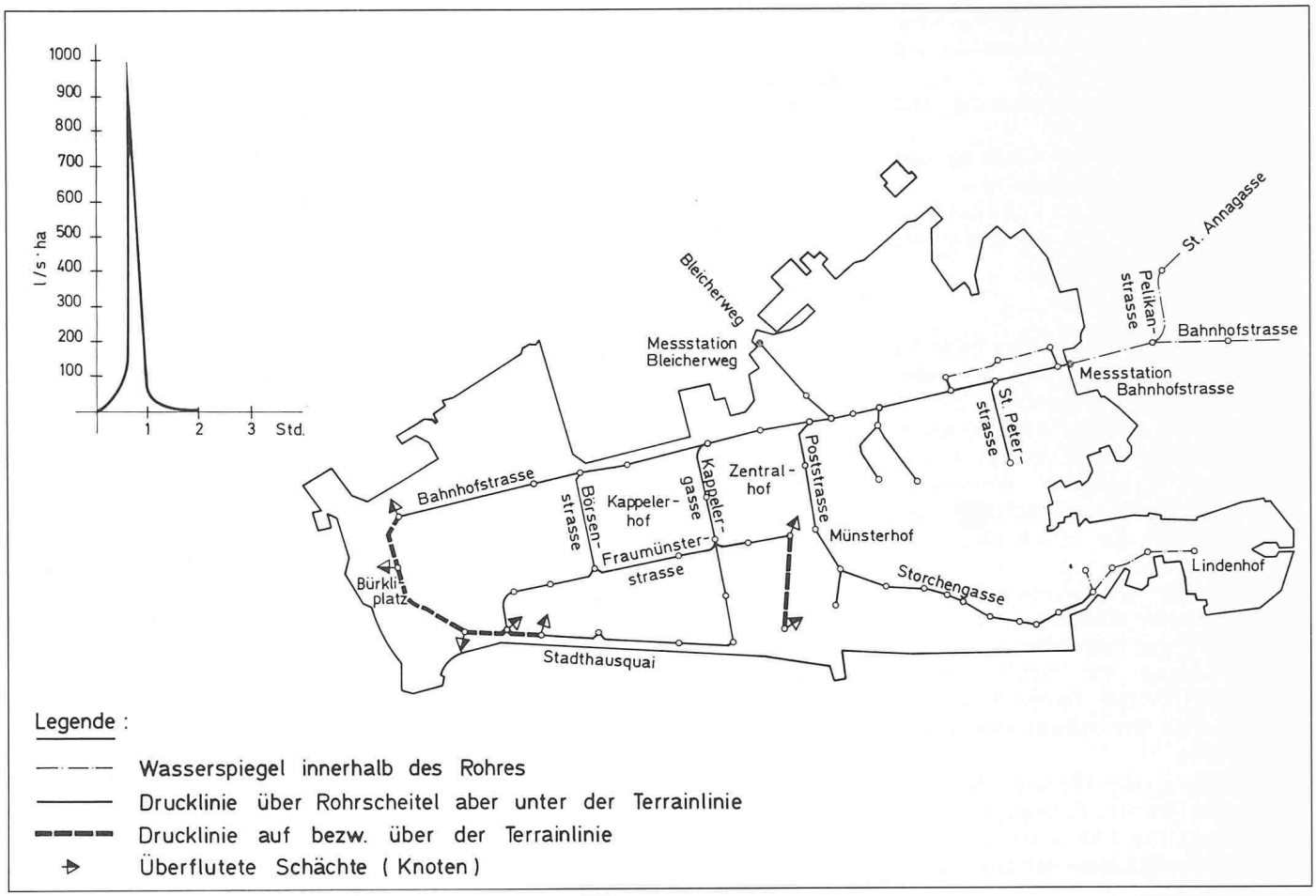
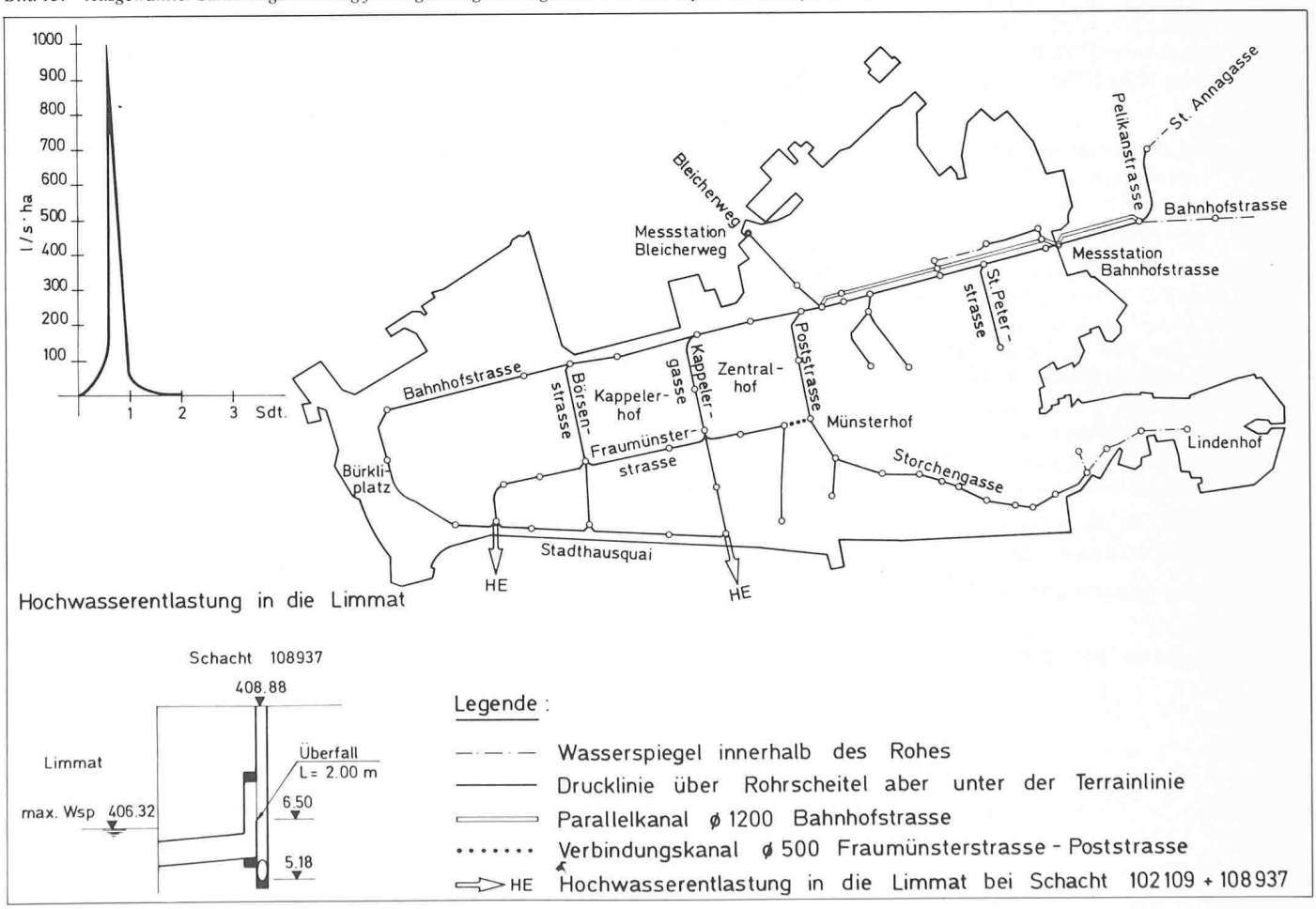


Bild 14. Ist-Zustand für Regenereignis mit grosser Intensitätsspitze, Bahnhofstrasse, Zürich

Bild 15. Ausgewählter Sanierungsvorschlag für Regenereignis mit grosser Intensitätsspitze, Bahnhofstrasse, Zürich



- Daten des Kanalnetzes (Schachtkoten, Kanallängen, -durchmesser und -gefälle),
- Regenereignisse zur Eichung und Testberechnung,
- Zuflussganglinie zur Eichung und Testrechung am Bleicherweg,
- Abflussganglinien am Ende des Testgebietes in der Bahnhofstrasse zur Eichung der Berechnung.

Gesucht:

- Ganglinie des Abflusses am Ende des Testgebietes in der Bahnhofstrasse für verschiedene Regenereignisse.
- Berechnung des GKP über das ganze Testgebiet in Form von EDV-Ausdrucken, Ganglinien, Wasserspiegellagen usw., entsprechend dem Pflichtenheft für verschiedene Regenereignisse.
- Berechnung des Netzes mit fiktiv verkleinerten Kanälen in der Kapelergasse und Bahnhofstrasse.
- Ausarbeitung von Sanierungsvorschlägen für das fiktive Netz und nochmalige Berechnung des sanierten Netzes.
- Berechnung einer theoretischen Aufgabe mit fiktivem Einzugsgebiet und Kanalnetz mit Drosselstrecken und Überläufen für ausgewählte Regenereignisse.

Zur Darstellung der Möglichkeiten des hydrodynamischen Simulationsmodells INSTAT werden die Untersuchungen und Berechnungen für ein Regenereignis mit ausserordentlich hoher Intensitätsspitze von etwa 1000 l/s × ha ausgewählt.

Bild 14 zeigt den Ist-Zustand für das intensive Regenereignis. Die Höhe der Drucklinie sowie die überfluteten Schächte sind speziell gekennzeichnet.

Das sehr intensive Regenereignis zeigt, dass in vielen Strecken zeitweise Rückfluss stattfindet. Dies ist erklärbar, da sich das ganze Netz während der kurzen, grossen Regenintensität füllt, unter Ausnützung aller Kapazitäten, Rückflussmöglichkeiten und Vermaschungen und der eigentliche Abfluss erst nach einiger Zeit einsetzt.

Bild 15 zeigt die Berechnungen einer vorgeschlagenen Sanierungsvariante.

Die geplanten Massnahmen sind:

- Parallelkanal, Durchmesser 1200 mm, in der Bahnhofstrasse,
- Zusätzliche Vermaschung Fraumünsterstrasse–Poststrasse mit Rohr, Durchmesser 500 mm,
- Hochwasserentlastungen in die Limmat am Stadthausquai.

Trotz des hohen Wasserspiegels der Limmat gegenüber dem Kanalnetz bringen diese Entlastungen gegenüber dem Ist-Zustand entscheidende Verbesserungen. Diese Sanierungsvariante ist zudem äusserst kostengünstig.

Schlussbemerkung

Das hydrodynamische Simulationsmodell INSTAT kann die dynamische *Wasserbewegung* und *Wassergüte* durch ein Kanalnetz oder ein Gerinnesystem simulieren. Das zu simulierende System, in dem Rückstau, Fliessumkehr oder Vollfüllung auftreten können, darf jede beliebige verästelte oder vermaschte Geometrie haben. Verschiedene Sonderbauwerke, wie Wehre oder Pumpen, können simuliert werden. Es handelt sich um ein deterministisch gegliedertes Modell, das hydrodynamische Abflussgleichungen mit Hilfe eines expliziten *Finitdifferenz-Lösungsverfahren* löst. Die Zustandsvariabeln sind *Wasserstände* und *Abflüsse sowie Schmutzfrachten.*

Das sehr genaue Berechnungsverfahren des Modells begrenzt aus wirtschaftlichen Gründen seine Benutzung auf die Simulation von Einzelereignissen oder lediglich kurzen hydraulischen Perioden.

Die GKP verschiedener Städte, wie z.B. der *Stadt Luzern,* oder verschiedener ländlicher Einzugsgebiete werden mit dem Simulationsmodell INSTAT überarbeitet. Zu gegebener Zeit werden die Resultate dieser Arbeiten aufgezeigt.

Adressen der Verfasser: *Marcel Desserich,* dipl. Bauing. ETH/SIA, *Georg Desserich,* Dr.sc.techn., dipl. Bauingenieur ETH/SIA, Desserich + Funk, Ingenieurbureau für Brücken-, Hoch-, Tief-, Wasserbau, Umweltschutztechnologien, Langensandstr. 74, 6005 Luzern, und Instatik Data Center-IDC-, Rechenzentrum und Computersysteme, Langensandstr. 74, 6005 Luzern, und *T. Clark Lyons,* B. Sc., M. Sc., P.E., Resource Management Associates Switzerland, 6353 Weggis.

Literatur

[1] *M. Desserich,* HP-Hydraulik zu HP 97/41/85/87
[2] *Metcalf and Eddy,* Inc., et al.: «Storm Water Management Model», Water Pollution Control Research Series 11024D9C07, 10/71, Juli 1971
[3] *Otto Schmidt,* et al.: «Erfahrungen bei der Sanierung der Mischwasserkanalisation mit einem hydrodynamischen Modell und dem Flutplanverfahren», Wasserwirtschaft 72 (12282) 11
[4] *J. Bach* und *T. C. Lyons:* «Anwendung eines EDV-Kanalnetz-Simulationsmodells am Beispiel von Wangerooge», Korrespondenz Abwasser, Band 27, Heft 7, Juli 1980
[5] *C. Abraham,* et al.: «Zur instationären Berechnung von Abwasserabfluss, Teil 1», Korrespondenz Abwasser, Band 23, Heft 3, März 1976
[6] *T. C. Lyons,* et al.: «Zur instationären Berechnung von Abwasserabfluss, Teil 2», Korrespondenz Abwasser, Band 23, Heft 6, Juni 1976
[7] *T. C. Lyons,* et al.: «Zur instationären Berechnung von Abwasserabfluss, Teil 3», Korrespondenz Abwasser, Band 23, Heft 10, Oktober 1976
[8] *T. C. Lyons:* «Simulation of Runoff Quality from Rural Watersheds», Environmental Management of Agricultural Watersheds, IIASA, Laxenburg, Austria 1983
[9] *T. C. Lyons,* und *J. Bach:* «Gewässergüte – Simulationsmodell RMA 12», RMA Deutschland, Mai 1978
[10] «Zwischenbericht Wassergütemodell für Fliessgewässer», TU München, Dezember 1978
[11] RMA: «Benützerhandbuch für das Oberflächenabflussmodell RUNOFFU», Mönchengladbach und Weggis, Mai 1986
[12] RMA: «Benützerhandbuch für das INSTAT Transport Modell», Mönchengladbach und Weggis, März 1985
[13] RMA: Benützerhandbuch für die INSTAT – Unterstützungsprogramme», Mönchengladbach und Weggis, März 1985
[14] *C. Abraham,* et al.: «Zur instationären Berechnung von Abwasserabfluss, Teil 4», Korrespondenz Abwasser, Band 24, Heft 7, Juli 1977
[15] *C. Abraham,* et al.: «Selection of a Design Storm», Proceedings National Symposium on Urban Hydrology, Hydraulics, and Sediment Control, July 27–29, 1976
[16] *Schindler + Schindler* Zürich, *Desserich + Funk,* Zürich, RMA, Weggis: «Neuberechnung GKP der Stadt Zürich, Testrechnung», Juli 1983