

Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

## Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Planung\*

### Prise en compte des incertitudes lors de la planification de mesures de protection

Le comportement d'un système d'assainissement par temps de pluie est très complexe. Il doit tenir compte d'une dynamique temporelle et de processus aléatoires qualifiés de «stochastiques». En conséquence, la modélisation d'un système, les réactions d'un bassin versant et la planification de mesures de protection sont empreintes d'incertitudes. Ces incertitudes ont une grande importance dans le choix de mesures de protection. Les procédures existantes de planification tiennent compte seulement en partie de ces incertitudes. C'est pourquoi une nouvelle méthode est présentée dans cet article pour faire face aux effets des incertitudes sur la procédure de planification.

### Consideration of Uncertainties in Planning

During wet weather situations, the urban drainage system is highly complex. Furthermore, it is characterized by temporal dynamics and by «random» so called stochastic processes. As a consequence, modeling, forecasting system's behavior, and planning water protection measures are associated with uncertainties. With regard to investments in measures, uncertainties have a profound impact. Existing planning procedures are only partly adapted for coping with uncertainties. Thus, the new method, as presented in this article, is adapted for coping with the impact of uncertainties on the planning process.

\* Dieser Artikel ist der vierte einer Serie des EAWAG- und BUWAL-Projektes «STORM».

Simon Kreikenbaum



Das System «Siedlungsentwässerung bei Regenwetter» ist sehr *komplex*. Es verhält sich zeitlich hoch *dynamisch* und zeichnet sich durch «zufällige» so genannte *stochastische* Prozesse aus. Als Folge davon sind die Modellierung, die Prognose des Systemverhaltens und die Planung von Gewässerschutzmassnahmen geprägt durch Unsicherheiten. Unsicherheiten sind hinsichtlich Investitionen in Massnahmen von grosser Relevanz. Da herkömmliche Planungsverfahren nur bedingt geeignet sind, mit Unsicherheiten umzugehen, wird hier eine neue Methode vorgestellt, mit der die Auswirkungen von Unsicherheiten auf den Planungsprozess berücksichtigt werden können.

### 1. Prinzip der Dimensionierung technischer Systeme

Technische Systeme (z.B. Talsperren, Gewässerschutzmassnahmen etc.) werden im Allgemeinen basierend auf einer *Risikoabschätzung* dimensioniert. Dabei wird die tolerierbare *Versagenswahrscheinlichkeit* des technischen Systems dem *Sicherheitsbedürfnis* an dasselbe gegenübergestellt. Je höher das Sicherheitsbedürfnis, desto seltener kann ein Systemversagen toleriert werden. Prinzipiell kann das Versagen eines Systems als der Zustand definiert werden, bei welchem die (äussere) Belastung die (innere) Tragkraft des Systems überschreitet.

Zur Planung und Dimensionierung von technischen Systemen müssen also einerseits das

## Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

Sicherheitsbedürfnis an das System, oder anders formuliert, die Anforderungen an dessen Zuverlässigkeit bekannt sein, und andererseits muss die Wahrscheinlichkeit des Systemversagens ermittelt werden. Die Anforderungen an die Zuverlässigkeit sind in unserem Fall die Anforderungen an die Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter [1]. Das Systemversagen ist somit im Folgenden als die Nichterfüllung der Anforderungen definiert.

Bei der Dimensionierung von Massnahmen zur Behandlung von Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter nach dem Immissionsansatz ist praktisch jede Situation einmalig. Gut untersuchte Referenzobjekte sind in der Regel nicht vorhanden. Deshalb muss die Wahrscheinlichkeit des Systemversagens mittels *Modellrechnungen* und *-prognosen* ermittelt werden.

### 2. Modelle und Unsicherheiten

Für die Planung von neuen und Beurteilung von existierenden Massnahmen im Bereich Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter muss eine Prognose über das erwartete Systemverhalten erstellt werden. Ein Weg, diese Prognose durchzuführen, ist die *Modellierung* und *Simulation*. Dazu wird die reale Situation in mehreren Schritten abstrahiert (Abb. 1). Bei dieser Abstraktion komplexer Systeme, wie z.B. Umweltsysteme, muss immer ein Kompromiss gefunden werden zwischen Aufwand und Nutzen der Modellierung. Idealerweise wird der Detaillierungsgrad angestrebt, bei dem der Nettotonutzen am grössten ist (Abb. 2).

Von der realen Welt wird in einem ersten Schritt ein Teil abgegrenzt: das untersuchte System. Das reale, untersuchte System wird vereinfacht

und idealisiert. In diesem abstrahierten System werden als nächstes die relevanten Prozesse mit mathematischen Gleichungen formuliert. Im letzten Schritt werden die mathematischen Gleichungen in einem Computerprogramm implementiert, das mit den entsprechenden Eingabedaten und Modellparametern das untersuchte System nachbildet.

Jeder dieser Schritte stellt eine Vereinfachung der Wirklichkeit dar. Die Modellierung komplexer Systeme ist aufgrund der Vereinfachungen, aber auch der nicht völlig umfassenden Kenntnis der Prozesse, zwangsläufig immer mit Unsicherheiten verbunden. Werden diese Unsicherheiten nicht explizit berücksichtigt, täuscht die Prognose des Systemverhaltens eine Präzision vor, die mit der Realität nicht im Einklang steht.

In der *Siedlungsentwässerung* werden heute aufgrund von Modellprognosen ohne Kenntnisse über Unsicherheiten Massnahmen geplant und finanziell bedeutsame Entscheide gefällt. Nicht berücksichtigte Unsicherheiten in der Modellprognose können zu nicht oder wenig optimalen Lösungen hinsichtlich Kosten und Wirksamkeit der Massnahmen führen. Deshalb ist es sinnvoll und notwendig, die Auswirkungen von Unsicherheiten auf *Modellprognosen* in Entwässerungssystemen zu ermitteln.

Die folgenden Ausführungen über Unsicherheiten beruht auf der Annahme, dass alle Werkzeuge bezüglich Verwendungszweck sowie Anwendungsbereiche und -grenzen richtig und optimal eingesetzt werden.

### 3. Verschiedene Kategorien von Unsicherheiten

Unsicherheiten können in die folgenden Kategorien unterteilt werden (nach [2]):

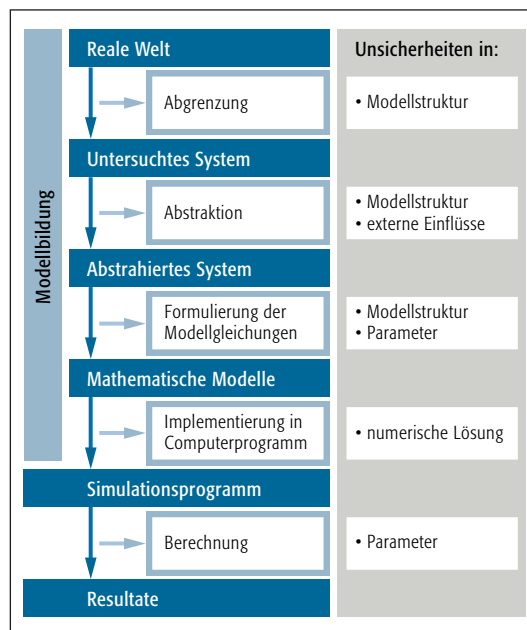


Abb. 1 Vereinfachung der Realität zum modellierten System und die dabei auftretenden Unsicherheiten.

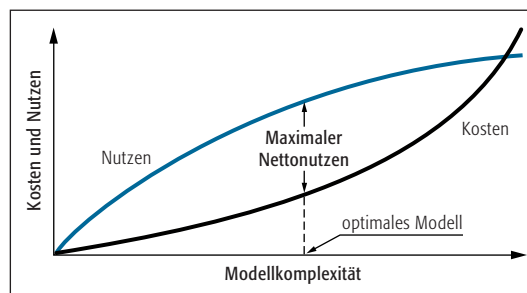


Abb. 2 Kompromiss zwischen Kosten und Nutzen eines Modells in Bezug auf dessen Komplexität.

- I) Unsicherheiten in den Modellparametern,
- II) Unsicherheiten in der Modellstruktur,
- III) Unsicherheiten in der Prognose externer Einflussgrössen und
- IV) Unsicherheiten in der numerischen Lösung der Modellgleichungen. Diese Kategorien werden in den nachfolgenden Abschnitten erklärt.

#### 3.1 Unsicherheit in den Modellparametern

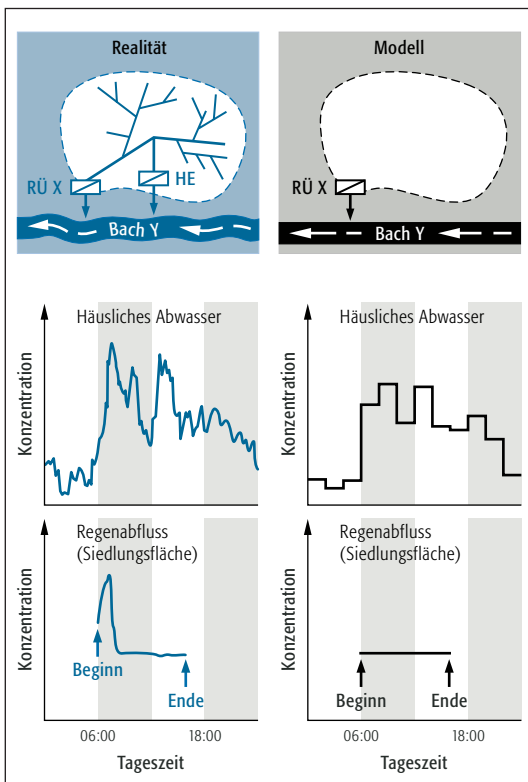
Unsicherheiten in den Modellparametern sind auf Ungenauigkeiten und Fehler in Messung und Erhebung der Modellparameter und -variablen zurückzuführen. Diese Art von Unsicherheiten lässt sich nicht vermeiden, da Ungenauigkeiten bei jeder Erhebung und Messung auftreten, insbesondere wenn Einflüsse der Siedlungsentwässerung bei Regen-

## Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

Methode	Befestigungsgrad [-]
Digitalisieren des Plans	0,32 (keine Angabe)
Arealstatistik	0,33 (± 0,11)
statistische Luftbilddauswertung	0,44 (± 0,04)
Maximum Likelihood *)	0,27 (± 0,04)
Binärhierarchisch *)	0,36 (± 0,05)
empirische Funktion *)	0,43 (± 0,06)
*) Satellitenbilddauswertung	

**Tab. 1** Parameterunsicherheiten. Aufgrund unterschiedlicher Erhebungsmethoden können für ein und denselben Parameter unterschiedliche Werte resultieren, wie beim Befestigungsgrad eines Einzugsgebiets [3].

wetter auf Gewässer ermittelt werden sollen. Die Grössenordnung von Messungenauigkeiten ist von der Messmethode abhängig. *Tabelle 1* zeigt dies am Beispiel der Ermittlung des Befestigungsgrades eines Einzugsgebiets. Die Werte weichen aufgrund unterschiedlicher Erhebungsmethoden z.T. stark voneinander ab. Unsicherheiten in den Modellparametern ist die am einfachsten bestimmbare Art von Unsicherheiten. Die Unsicherheit eines Modellparameters entspricht der Ungenauigkeit des Fehlers bei seiner Erhebung oder Messung.



**Abb. 3** Unsicherheiten in der Modellstruktur infolge Schematisierung (oben) und Prozessvereinfachung (unten) in der Modellbildung [3].

### 3.2 Unsicherheit in der Modellstruktur

Unsicherheiten in der Modellstruktur umfassen

- I) Unsicherheiten in der Berücksichtigung der wichtigsten Variablen und Prozesse,
- II) Unsicherheiten in den Prozessformulierungen sowie
- III) Unsicherheiten in der Angemessenheit der räumlichen und zeitlichen Auflösung des untersuchten Entwässerungssystems (Systemdefinition).

Unsicherheiten in der Modellstruktur sind wesentlich schwieriger bestimmbar als beispielsweise Unsicherheiten der Parameterwerte. Die einzige Möglichkeit, die Grössenordnung struktureller Fehler abzuschätzen, besteht darin, konkurrierende Modelle und Computerprogramme untereinander zu vergleichen.

In der Siedlungsentwässerung beziehen sich Unsicherheiten in der Modellstruktur vor allem auf die Vereinfachung und Idealisierung des realen Systems zum abstrahierten System und auf die Formulierung der relevanten Prozesse in mathematischen Gleichungen (*Abb. 3, 4 und 5*). Aus *Punkt I*) der oben aufgeführten Aufzählung wird klar, dass Unsicherheiten in der Modellstruktur mit Unsicherheiten in den Modellparametern zusammenhängen. Je nach Modell werden unterschiedliche Parameter verwendet. Deshalb treffen wir die vereinfachende Annahme, dass wir im Folgenden die Unsicherheiten der Modellstruktur über die Unsicherheiten der Modellparameter berücksichtigen.

### 3.3 Unsicherheiten der Einflüsse externer Einflussgrössen

Externe Einflussgrössen beschreiben den Einfluss der Umgebung auf

das mit dem Modell beschriebene System. Die Ursache von veränderten externen Einflussgrössen ist nicht im untersuchten System selbst begründet.

Unsicherheiten in der Prognose externer Einflussgrössen umfassen z.B. die zukünftige Entwicklung in einem betrachteten Gebiet. Beispiele dieser Art von Unsicherheiten sind die Entwicklung der Anzahl Einwohner, der zukünftige Wasserverbrauch resp. Abwasseranfall, die Abwasserzusammensetzung, die Auswirkung technischer Neuerungen etc. Eine unrealistische Annahme für die Entwicklung eines betrachteten Gebiets kann die Modellprognose erheblich beeinflussen.

Die Abschätzung der Auswirkung von Unsicherheiten in den externen Einflussgrössen auf die Modellprognose kann nur über den Vergleich von verschiedenen Szenarien ermittelt werden.

### 3.4 Unsicherheiten in der numerischen Lösung der Modellgleichungen

In der Regel müssen Modellgleichungen numerisch gelöst werden, da nur in sehr speziellen Fällen eine analytische Lösung möglich ist. Die durch die numerische Lösung verursachte Unsicherheit von Modellprognosen ist in der Regel gegenüber den anderen Ursachen von Unsicherheiten vernachlässigbar [2]. Auf diese Art von Unsicherheiten hat der Normalanwender in der Regel keinen Einfluss.

### 4. Umgang mit Unsicherheiten in verschiedenen Typen von Modellen

Unsicherheiten in Parametern und die Variabilität gewisser Einflussgrössen, wie z.B. des Niederschlags, werden von den verschiede-

## Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

nen Typen von Modellen auf unterschiedliche Art und Weise berücksichtigt. Wir unterscheiden hier zwischen «statischen» und dynamischen Modellen und präzisieren bei den dynamischen weiter, indem wir diese in deterministische und in stochastisch-probabilistische Modelle unterscheiden.

### 4.1 «Statische Modelle»

«Statische Modelle» in der Siedlungsentwässerung wie sie z.B. bei der hydraulischen Bemessung der Kanalisation anhand der *Fliesszeitmethode* («Listenrechnung») oder bei der Bemessung von Regenüberlaufbecken nach «AfU 1977» [4] verwendet werden, berücksichtigen weder Variabilitäten noch Unsicherheiten explizit. Zeitlich variable Größen wie der Niederschlag werden in Form von statistischen Auswertungen verwendet. Unsicherheiten können über die Modellparameter wie z.B. den *Spitzenabflussbeiwert* implizit berücksichtigt werden, indem man diese konservativ schätzt, um auf der «sicheren Seite» zu sein.

«Statische Modelle» lagen zur Zeit ihrer Einführung mit grosser Wahrscheinlichkeit in der Nähe des Optimums zwischen Aufwand und Nutzen (maximaler Nettonutzen, *Abb. 2*). Sie wurden damals der Einfachheit halber eingeführt, in erster Linie aus Mangel an Rechenkapazität, aber auch mangels Kenntnissen der Prozesse und Daten. Mit der Entwicklung in der Computertechnik wurde das Hauptproblem, der Mangel an Rechenkapazität, allerdings behoben, weshalb heute Variabilitäten mit dynamischen Modellen behandelt werden können und sollen.

### 4.2 Dynamische, deterministische Modelle

Deterministische Modelle ordnen bei bekannten Anfangs- und Rand-

bedingungen sowie bekannter zeitlicher Änderung der Modellinputs (z.B. Niederschlag) jedem Zeit- und Ortspunkt ein eindeutiges Resultat zu [5]. Unsicherheiten werden nicht explizit berücksichtigt. Über die Auswirkungen von Unsicherheiten auf die Prognose deterministischer Modelle kann eine Sensitivitätsanalyse einen Eindruck vermitteln (*Abb. 6*). Dynamische, deterministische Modelle, wie sie in (Langzeit-) Simulationsprogrammen der Siedlungsentwässerung wie z.B. SASUM, REBEKA, SWMM, MOUSE, SAMBA, HYSTEM-EXTRAN, KOSIM etc. implementiert sind, berücksichtigen Variabilitäten über historische Regen oder Regenserien. Werden die Modellresultate der Grösse nach sortiert, ergibt sich eine Kurve, die den Modelloutput der Frequenz seines Auftretens gegenüberstellt (blaue Summenkurve im mittleren Teil von *Abb. 7*).

### 4.3 Dynamische, stochastisch-probabilistische Modelle

Ein Weg, um den Einfluss von (Parameter-)Unsicherheiten auf eine Modellprognose zu quantifizieren, besteht darin, herkömmliche deterministische Modelle zu stochastisch-probabilistischen Modellen zu erweitern. Ein stochastisches Modell ist ein Modell, das zufällige Elemente enthält [5]. Probabilistisch bedeutet: die Wahrscheinlichkeit berücksichtigend. Diese Erweiterung kann z.B. mittels einer «Monte Carlo»-*Simulationsroutine* geschehen.

Bei der «Monte Carlo»-Simulation werden Unsicherheiten mathematisch mit Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (Verteilungsfunktionen) abgebildet, aus denen eine zufällige Stichprobe gezogen wird. Danach wird das Simulationsprogramm aufgerufen und die Resultate berechnet. Dieses Vorgehen wird in einer Vielzahl von Durchläufen

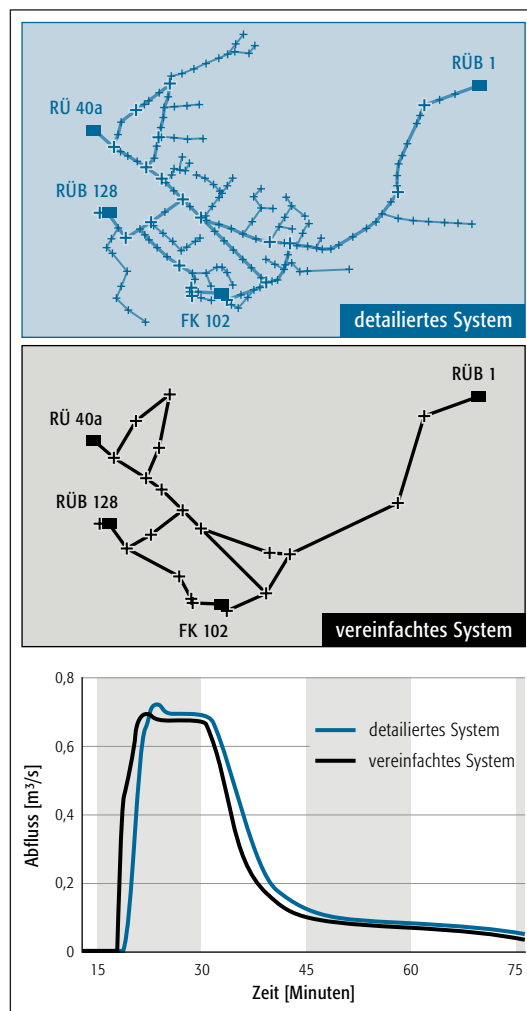


Abb. 4 Einfluss der räumlichen Auflösung auf die Modellprognose (Zufluss zum RÜB 128 [3]).

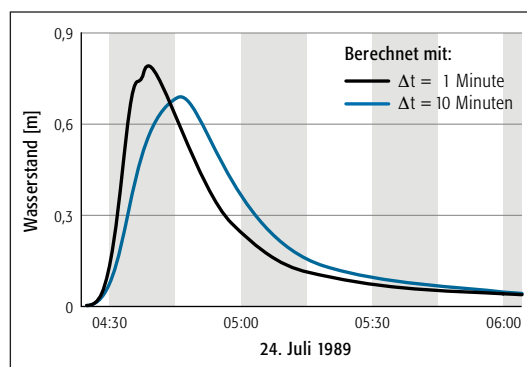


Abb. 5 Einfluss der zeitlichen Auflösung von Regendaten auf die Modellprognose (Wasserstand in einem Regenwasserkanal in Zürich-Schwamendingen [3]).

wiederholt, wobei sich pro Durchlauf gleich wie bei der deterministischen Berechnung eine Kurve (z.B. Durchfluss,  $\text{NH}_3$ -Konzentration im Vorfluter etc.) ergibt, welche die Inten-



Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

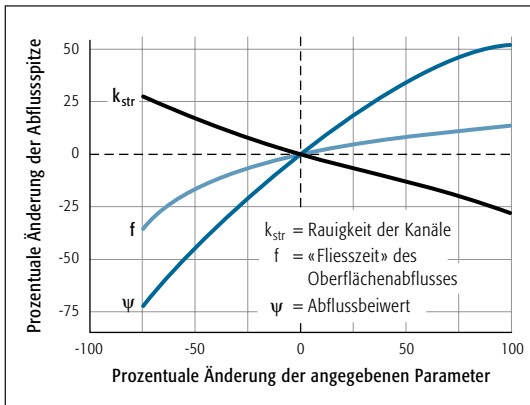
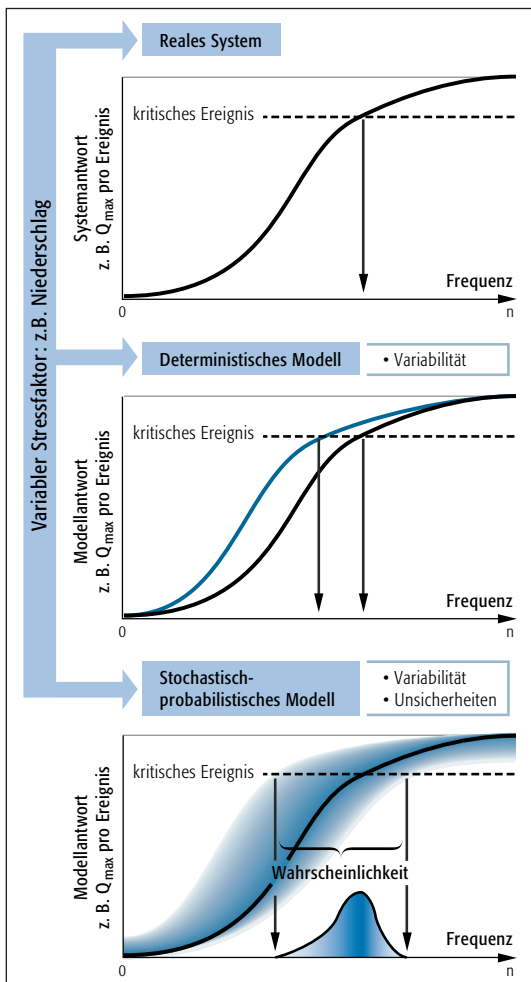


Abb. 6 Dieses Beispiel einer Sensitivitätsanalyse zeigt, dass der Abflussbeiwert größeren Einfluss auf den Modelloutput (Abflussspitze) hat, als die Rauigkeit der Kanäle [6]. Je sensibler ein Modellresultat auf Änderungen eines Parameters reagiert, desto sorgfältiger sollte er erhoben werden.

sität des Modelloutputs der Frequenz seines Auftretens gegenüberstellt. Gesamthaft resultiert aus der «Monte Carlo»-Simulation die gleiche Anzahl solcher Kurven, wie Durchläufe ausgeführt wurden. Diese Kurvenschar wird



im unteren Teil von *Abbildung 7* durch den blauen Bereich repräsentiert, der die Wahrscheinlichkeit darstellt, mit der ein Resultat eintritt (z.B. maximal zehn Geschiebetriggerereignisse pro Jahr). Diese Wahrscheinlichkeit (engl. *probability*) prägt den zweiten Teil des Namens von stochastisch-probabilistischen Modellen.

Bezogen auf die Anforderungen an Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter prognostiziert das stochastisch-probabilistische Modell, dass ein gewisser Teil der Resultate die Anforderungen erfüllt, während das System bei den restlichen Resultaten gemäss der Definition in Kapitel 1 versagt. Dieser Anteil kann auch als Wahrscheinlichkeit ( $0 \leq P \leq 1$ ) ausgedrückt werden (*Abb. 7*). Ein stochastisch-probabilistisches Modell liefert als Antwort also eine prognostizierte Wahrscheinlichkeit, mit der die Anforderungen eingehalten werden. Die stochastisch-probabilistische Planungsmethode ist Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten [7].

Abb. 7  
 a) Frequenz kritischer Ereignisse in einem realen System, auf das ein variabler Stressfaktor, z.B. Regen, einwirkt.  
 b) Frequenz kritischer Ereignisse im deterministischen Modell. Da die Modellierung mit Unsicherheiten behaftet ist, weicht die Antwort des Modells (blaue Kurve) von der des realen Systems (schwarze Kurve) ab.  
 c) Frequenz kritischer Ereignisse im stochastisch-probabilistischen Modell. Die Berücksichtigung von Unsicherheiten führt zu einem Bereich von möglichen Systemantworten (blaues Feld), in dem die Antwort des realen Systems (schwarze Kurve) gefunden werden sollte. Die Frequenz kritischer Ereignisse kann als Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion dargestellt werden. Wird diese Funktion integriert, ergibt sich eine kumulative Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, aus der sich die Wahrscheinlichkeit des Systemversagens – hier definiert als Nichteinhalten der Anforderungen an Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter – ablesen lässt.

5. Planung und Beurteilung von Massnahmen mit stochastisch-probabilistischen Modellen

Die Planung von neuen und die Beurteilung von bestehenden Massnahmen mit stochastisch-probabilistischen Modellen läuft iterativ und in mehreren Schritten ab. Diese Schritte werden im Folgenden erläutert:

I. Modellbildung

In einem ersten Schritt muss die reale Situation abstrahiert und die Prozesse mit geeigneten Modellen abgebildet werden. Bei der Verwendung von kommerziellen Simulationsprogrammen ist die Wahl der Modelle in der Regel vorgegeben. Es stellt sich jedoch oftmals die Frage, wie ein gegebenes komplexes Entwässerungssystem auf optimale Weise vereinfacht und idealisiert werden kann.

*Beispiel:* Im Simulationsprogramm MOUSE kann ein Entwässerungssystem grundsätzlich mit allen Einzelheiten abgebildet werden. Bei REBEKA [8] stellt sich die Frage, wie ein komplexes Einzugsgebiet vereinfacht werden kann.

II. Datenerhebung

Sind die zu verwendenden Modelle bekannt respektive festgelegt, müssen die zur Planung und Beurteilung benötigten Daten erhoben werden. Zusätzlich zur Datenerhebung wie in herkömmlichen Planungsverfahren, müssen Messungenauigkeiten und -fehler quantifiziert werden. Diese dienen der mathematischen Beschreibung der Unsicherheiten in der stochastisch-probabilistischen Planung und Beurteilung.

*Beispiel:* Bei der Ermittlung des Befestigungsgrads eines Einzugsge-

## Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

biets mit Luftbildauswertung ist nicht nur der eigentliche Parameterwert von Interesse, sondern auch die Aussage über Messungengenauigkeit oder -fehler (z.B.  $0.44 \pm 0.04$ ).

### III. Sensitivitätsanalyse

Die Erhebung der Modellparameter kann effizienter gestaltet werden, wenn diese zunächst grob ermittelt werden und eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt wird. Diese Analyse gibt Aufschluss über den Einfluss der verschiedenen Modellparameter auf das berechnete Resultat. Sensitive Parameter sind mit besonderer Sorgfalt zu erheben, so dass die Unsicherheiten dieser Parameter möglichst stark verringert werden können. Basierend auf den Resultaten der Sensitivitätsanalyse können die Daten mit einem Aufwand erhoben werden, der ihrem Einfluss auf das berechnete Resultat Rechnung trägt.

*Beispiel:* Der Abflussbeiwert hat einen grösseren Einfluss auf den Spitzenabfluss als die Rauigkeit der Kanäle (Abb. 6). Bei der Parametererhebung ist es deshalb sinnvoll, dem Abflussbeiwert grössere Beachtung zu schenken als der Rauigkeit der Kanäle.

### IV. Mathematische Beschreibung der Unsicherheiten

Sind die Daten erhoben, müssen für die stochastisch-probabilistische Modellierung die Unsicherheiten mathematisch formuliert werden. Dies geschieht, indem Typ und Parameter einer Verteilungsfunktion (z.B. Normal-, Gleich-, Dreiecksverteilung etc.) zwischen den Parametern so gewählt werden, dass man eine treffende Beschreibung der Unsicherheiten erhält.

Um die Unsicherheiten präzise zu beschreiben, müssen Abhängigkeiten (Korrelationen) zwischen den

einzelnen Parametern berücksichtigt werden. Die Informationen dazu sind im Bereich Siedlungsentwässerung momentan allerdings noch nicht vorhanden respektive Gegenstand der Forschung. Der Einfachheit halber werden Korrelationen deshalb zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht behandelt.

*Beispiel:* Aus der Datenerhebung mittels Luftbildauswertung resultiert für den Befestigungsgrad ein Wert von 0.44. Die Messungengenauigkeit beträgt  $\pm 0.04$ . Die Unsicherheiten für diesen Parameter im Modell können z.B. mit einer Gleichverteilung beschrieben werden. D.h. in der «Monte Carlo»-Simulation wird der Befestigungsgrad aus einem Bereich von 0.4–0.48 zufällig ausgewählt.

### V. Ausscheidung und Untersuchung von Szenarien

Jetzt folgt die Ausscheidung von Szenarien. Dies geschieht, um externe Unsicherheiten wie die Entwicklung der Einwohnerzahl eines Siedlungsgebiets etc. zu beschreiben. Mit diesen Szenarien werden zusätzlich auch Ist-Zustand und Varianten mit möglichen Massnahmen untereinander verglichen. In der Untersuchung der Varianten werden für Optimierungsgrössen, welche die Massnahmen repräsentieren, die der Ingenieur plant, keine Unsicherheiten berücksichtigt. Optimierungsgrössen sind Parameter wie das Beckenvolumen, die abflusswirksame Fläche zur Berücksichtigung von Versickerungsmassnahmen, Drosselabflüsse etc.).

*Beispiel:* Eine mögliche Variante, die Gewässerschutzprobleme einer Gemeinde zu lösen, besteht darin, das Beckenvolumen von  $120 \text{ m}^3$  auf  $520 \text{ m}^3$  zu vergrössern. D.h. analog zu herkömmlichen Verfahren muss

in einem ersten Durchgang der Ist-Zustand ( $120 \text{ m}^3$ ) berechnet werden. Die Ausbauvariante ( $520 \text{ m}^3$ ) wird durch eine separate Berechnung ermittelt.

### VI. Berechnung, Auswertung und Interpretation der Resultate

Nachdem eine geeignete Anzahl von Durchläufen bestimmt wurde, beginnt die Berechnung mittels «Monte Carlo»-Simulation, die Auswertung und die Interpretation der Resultate. Dabei interessieren in erster Linie die (berechneten) Wahrscheinlichkeiten, mit denen die verschiedenen Varianten die Anforderungen an die Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter mutmasslich einhalten werden.

*Beispiel:* Das Resultat der «Monte Carlo»-Simulation entspricht einer Wahrscheinlichkeit. Eine bestimmte Variante erfüllt die Anforderungen hinsichtlich Geschiebetrieb, z.B. maximal zehn Geschiebetriebereignisse pro Jahr, in 74 % der Durchgänge einer «Monte Carlo»-Simulation, und in 36 % der Durchgänge erfüllt sie die Anforderungen nicht. Die prognostizierte Wahrscheinlichkeit, mit der die Variante die Anforderungen erfüllt, entspricht somit 74 %.

### VII. Entscheidungsfindung

Nachdem der Ingenieur alle Informationen für die Entscheidungsfindung vorbereitet hat, folgt eine Diskussion zwischen den unterschiedlichen Gewässerschutzakteuren. Dies sind Gewässerschutzbehörden, der Bauherr (Abwasserverband, Gemeinde) und der Planer (Ingenieur). Diese Diskussion gestaltet sich im hier vorgeschlagenen stochastisch-probabilistischen Planungsverfahren anders als in herkömmlichen deterministischen Verfahren. In den herkömmlichen Verfahren erfüllen die verschiedenen berechneten Varianten die Anforderungen oder aber sie erfüllen sie nicht. Im Gegensatz dazu erfüllen nach dem stochastisch-probabilistischen Ansatz die Varianten die Anforderungen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit. Um passende Massnahmen zu finden, müssen die involvierten Gewässerschutzakteure abwägen, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Anforderungen eingehalten werden sollen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass grössere Sicherheit in der Regel mit konkreten finanziellen Folgen verbunden ist. Die Beantwortung der *folgenden Fragen* kann hilfreich sein, um die Wahrscheinlichkeit festzule-

## Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

gen, mit der die Anforderungen eingehalten werden sollen [9]:

- Kann das Risiko in Kauf genommen werden, relativ günstige Massnahmen zu planen, die mit relativ kleinen Wahrscheinlichkeiten die Anforderungen erfüllen? *Falls sich später herausstellt, dass die Massnahmen die Anforderungen nicht erfüllen, muss nachgerüstet werden.*
- Oder sollen von Anfang an teurere Massnahmen implementiert werden, die mit grösserer Wahrscheinlichkeit die Anforderungen erfüllen? *Der Nachteil hierbei besteht darin, dass eventuell zu viel investiert werden könnte.*
- Sollen Mittel in weitere Untersuchungen des Systems investiert werden, um die Unsicherheiten zu reduzieren? *Dies würde ermöglichen, passendere Massnahmen zu realisieren und damit finanzielle Mittel zu sparen.*
- Oder soll eher in Massnahmen investiert werden, von denen man nicht genau weiss, wie gross ihr effektiver Nutzen sein wird?

### 6. Fazit

Die Betrachtung von Unsicherheiten stellt eine erweiterte Sichtweise und somit eine neue Herausforderung dar, mit der wir umzugehen lernen müssen. Wenn Unsicherheiten in der Planung von neuen und Beurteilung von bestehenden Massnahmen berücksichtigt werden, hat dies Änderungen auf den Ablauf und für die Aufgaben der verschiedenen, am Planungsprozess beteiligten Akteure zur Folge. Die Planungsverfahren, die Unsicherheiten berücksichtigen, haben gegenüber herkömmlichen Verfahren gewisse Vorteile. Dies obwohl sie einen Mehraufwand bedeuten, auf den ersten Blick weniger konkret aussehen mögen und die an der Planung beteiligten Akteure herausfordern, mehr Verantwortung zu tragen als bisher. Die Vorteile werden ersichtlich, wenn die heute bekannten Planungsverfahren mit der hier vorgeschlagenen stochastisch-probabilistischen Methode verglichen werden.

#### 6.1 Emissionsorientierte, deterministische Planungsverfahren

Emissionsorientierte, deterministische Planungsverfahren [10] entsprechen vorgegebenen Verfahrensabläufen, welche häufig die Art der Massnahme sowie deren massgebende Kenngrösse vorschreiben. Dies kann beispielsweise der Bau eines gewissen Speichervolu-

mens pro Hektare versiegelter Fläche (z.B. 20 m<sup>3</sup>/ha<sub>red</sub>) in Form von Regenüberlaufbecken sein.

Der Vorteil dieser Verfahren besteht darin, dass sie eindeutig sind, einfach in der Anwendung und dass für alle planenden Gemeinden die gleichen Voraussetzungen gelten. Die Nachteile dieser Methode liegen darin, dass sie weder problem- noch lokalspezifisch ist und dass sie die Verantwortung und die Entscheidungsfreiheit der an der Planung beteiligten Akteure stark einschränkt.

#### 6.2 Immissionsorientierte, deterministische Planungsverfahren

Immissionsorientierte Planungsverfahren [10] definieren einen Zustand im Gewässer, der eingehalten werden muss. Mit welchen Massnahmen die Anforderungen an Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter eingehalten werden sollen, ist nicht vorgeschrieben. Ein vielfach erwähnter Nachteil dieses Verfahrens besteht darin, dass unter allen planenden Gemeinden keine Gleichbehandlung besteht. Eine grosse Gemeinde mit empfindlichem Vorfluter muss voraussichtlich grössere Investitionen pro Einwohner in Massnahmen tätigen als eine kleine Gemeinde mit einem belastbaren Vorfluter. Ein Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass Entscheidungsträger und Planer eine gewisse Freiheit, einen Ermessensspielraum bei der Wahl der Massnahmen haben. Ein weiterer Vorteil ist, dass es problem- und lokalspezifisch ist und somit die Gefahr von nicht oder wenig optimalen Lösungen verringert.

#### 6.3 Immissionsorientierte, stochastisch-probabilistische Planungsverfahren

Die beiden deterministischen Verfahren berücksichtigen Unsicher-

heiten nicht explizit. Dies täuscht eine Genauigkeit dieser Verfahren vor, die mit der Realität nicht im Einklang steht. Das heisst, der Entscheidungsträger muss basierend auf nicht sicheren Modellprognosen Entscheide fällen, die von grosser finanzieller Relevanz sein können. Die im Rahmen des Projektes STORM vorgeschlagene Methode zur Planung von neuen und Beurteilung von bestehenden Massnahmen gibt den Gewässerschutzakteuren die Möglichkeit, die Auswirkungen der Unsicherheiten zu quantifizieren und die Freiheit, differenziert auf diese Unsicherheiten zu reagieren.

Der Entscheidungsträger kann die Wahrscheinlichkeit selber festlegen, mit der die Anforderungen erfüllt werden sollen. Er kann frei entscheiden, ob er auf der sicheren Seite sein möchte, indem er mehr in Massnahmen investiert oder durch weitere Untersuchungen die Unsicherheiten verringert sehen möchte. Dabei wird er durch den Planer (Ingenieur) und die Behörden in beratender Weise unterstützt. Dies bietet die Möglichkeit, flexiblere Lösungen zu finden, als bei den deterministischen Planungsverfahren. Aus den genannten Gründen ist die hier vorgeschlagene Betrachtung von Unsicherheiten in der Planung und Beurteilung von Gewässerschutzmassnahmen bezüglich Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter gegenüber den deterministischen Planungsverfahren vorzuziehen.

Die hier konzeptuell vorgestellte Methode zum Umgang mit Unsicherheiten wird in mehreren folgenden Publikationen dieser Artikelreihe auf konkrete Beispiele angewendet. Dabei wird der Berechnungsgang der stochastisch-probabilistischen Modellierung vorgestellt und auf die Beurteilung und

## Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

Gewichtung der Unsicherheiten in den verschiedenen Problembereichen (suspendierte Stoffe, gelöste Stoffe, Geschiebetrieb, Hygiene, Grobstoffe) näher eingegangen. Im letzten Artikel dieser Serie wird das immissionsorientierte, stochastisch-probabilistische Planungsverfahren auf ein praktisches Fallbeispiel angewendet.

#### 6.4 Zusammenfassung der wichtigsten Gedanken

Für die Planung und Dimensionierung neuer und die Beurteilung bestehender Entwässerungsanlagen wird eine Prognose des Systemverhaltens benötigt.

- Dazu muss die Realität in Modellen abgebildet werden, die die Frage nach zukünftigen Belastungen beantworten können.
- Die Idealisierung und Vereinfachung der Realität zu einem Modell ist zwangsläufig mit Unsicherheiten verbunden.
- Da traditionelle statische und dynamische Bemessungsverfahren Unsicherheiten nicht explizit behandeln, erlauben diese Verfahren keine Aussage über die Auswirkungen von Unsicherheiten im System «Siedlungsentwässerung» auf die Planung und Beurteilung von Massnahmen.
- Da Unsicherheiten einen erheblichen Einfluss auf die Kostenwirksamkeit von Entwässerungsanlagen haben, sollen sie mit den erwähnten Methoden, d.h. mit stochastisch-probabilistischer Modellierung und Simulation explizit behandelt werden.
- Die Berücksichtigung von Unsicherheiten zur Planung neuer

und Beurteilung bestehender Massnahmen stellt zwar einen zusätzlichen Aufwand und eine neue Herausforderung dar, bietet allerdings dafür einen neuen Freiheitsgrad bei der Entscheidungsfindung. Dies kann dazu beitragen, dass zukünftig den lokalen Gegebenheiten angepasste Lösungen gefunden werden können.

- Zudem können mit dieser Methode neue Erkenntnisse zum Management der Siedlungsentwässerung gewonnen werden.
- Die stochastisch-probabilistische Planungsmethode ist Gegenstand gegenwärtiger Forschungsarbeiten z.B. [7].
- Die stochastisch-probabilistische Planungsmethode stellt eine neue Herausforderung dar, mit der wir erst umzugehen lernen müssen.

#### Literaturverzeichnis

- [1] Rossi, L., Krejci, V., Kreikenbaum, S. (2004): Anforderungen an die Abwassereinleitungen bei Regenwetter. gwa 6, S. 431–438.
- [2] Reichert, P. (2001): Umweltsystemanalyse – Identifikation von Umweltsystemen, Schätzung der Unsicherheit von Modellprognosen und Anwendung der Methoden in einem Entscheidungskontext. Skript zur Vorlesung 03-304 ETH Zürich, Sommersemester 2001, ETH Zürich.
- [3] Krejci, V., Fankhauser, R., Gammeter, S., Grottker, M., Harmuth, B., Merz, P. und Schilling, W. (1994). Integrierte Siedlungsentwässerung – Fallstudie Fehraltorf. Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, EAWAG, Dübendorf.
- [4] AfU (1977): Empfehlungen für die Bemessung und Gestaltung von Hochwasserentlastungen und Regenüberlaufbecken. Eidgenössisches Amt für Umweltschutz, Bern.
- [5] Carstensen, J., Vanrolleghem, P., Rauch, W., and Reichert, P. (1997): Terminology and Methodology in Modelling for Water Quality Management – A Discussion Starter. Wat.Sci.Tech. 36:157–168.

- [6] Nix, S.J. (1994): Urban Stormwater Modeling and Simulation. Lewis, cop.
- [7] Neumann, M., Ort, C., and Daebel, H. (2004): Legal Criteria, Variability and Uncertainty in the Design of CSO Detention. Proceedings of the Novatech 2004 Conference, Lyon.
- [8] Rauch, W., Krejci, V. und Gujer, W. (2000): REBEKA – Ein Simulationsprogramm zur Abschätzung der Beeinträchtigung der Fließgewässer durch Abwassereinleitungen aus der Siedlungsentwässerung bei Regenwetter. Schriftenreihe EAWAG Nr. 16, Dübendorf-Zürich.
- [9] Kreikenbaum, S., Krejci, V., Rauch, W., and Rossi, L. (2002): Probabilistic Modeling as a New Planning Approach to Stormwater Management. Proceedings of the Ninth International Conference On Urban Drainage, 9ICUD, editors E.W. Strecker and W.C. Huber., 8–13th September, 2002, Portland OR, USA.
- [10] Krejci, V. und Kreikenbaum, S. (2004): Konzepte des Gewässerschutzes bei Regenwetter, gwa 6, S. 423–430.

#### Keywords

Unsicherheiten – Planung – deterministisch – stochastisch-probabilistisch – Modelle

#### Adresse der Autoren

Simon Kreikenbaum, Dipl. Ing. ETH  
EAWAG  
CH-8600 Dübendorf  
Tel. +41 (0)1 823 50 95  
Fax +41 (0)1 823 53 89  
simon.kreikenbaum@eawag.ch

Vladimir Krejci, Dr. sc. tech.  
Lindenstrasse 90  
CH-8738 Uetliburg  
Tel. +41 (0)55 280 33 92  
Fax +41 (0)55 280 36 61  
hydrokrejci@tiscalinet.ch

Rolf Fankhauser, Dr. phil.  
IHW ETH Zürich-Hönggerberg  
CH-8093 Zürich  
Tel. +41 (0)1 633 25 07  
Fax +41 (0)1 633 10 61  
rolf.fankhauser@eawag.ch

Wolfgang Rauch, Prof. Dr.  
Universität Innsbruck  
Institut für Umwelttechnik  
Technikerstrasse 13  
A-6024 Innsbruck  
Tel. +43 512 507 69 20  
Fax +43 512 507 29 11  
wolfgang.rauch@uibk.ac.at