

Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

REBEKA II – Software zur Unterstützung der Massnahmenplanung*

REBEKA II – Un logiciel pour l'aide à la planification de mesures de protection par temps de pluie

Le logiciel REBEKA a été à l'origine développé pour estimer l'impact des déversoirs d'orage et des rejets pluviaux sur les milieux récepteurs et pour tester différentes mesures permettant de réduire cet impact. L'utilisation de ce logiciel est largement répandue dans le cadre du plan général d'évacuation des eaux (PGEE). Un aspect du projet «STORM» est de développer ce logiciel en appliquant une routine stochastique. Ceci permet de prendre en compte les incertitudes dans les paramètres du modèle et de quantifier l'impact de celles-ci sur les résultats. La version stochastique développée, REBEKA II, est présentée dans cet article. Elle permet la prise en compte, en plus des incertitudes sur les données, des matières en suspension.

REBEKA II – Software to Assist the Planning of Wet-Weather Control Measures

The software REBEKA was originally developed to estimate the impact of combined sewer overflows and stormwater discharges on receiving waters and to test measures with respect to reduce the impairments. It is widely used for the SWISS Master Plan of Urban Drainage (GEP). One aspect of the project «STORM» is to extend this software by implementing a stochastic routine. This enables it to handle uncertainties in model parameters and to quantify their impact on the results. The enhanced stochastic version, REBEKA II, is presented in this paper. This version handles, in addition to parameter uncertainties, impacts by total suspended solids.

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

Rolf Fankhauser



Das Simulationsprogramm REBEKA ermöglicht abzuschätzen, ob Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter die Fließgewässer beeinträchtigen und welche Massnahmen diese Beeinträchtigungen reduzieren. Es wird bei der Bearbeitung des Generellen Entwässerungsplans (GEP) eingesetzt. Im Rahmen des Projekts «STORM» wurde REBEKA mit einer stochastischen Routine zu REBEKA II erweitert, das Unsicherheiten in den Modellparametern berücksichtigen und deren Auswirkung auf die Resultate aufzeigen kann. Die erweiterte, stochastische Version REBEKA II wird hier vorgestellt, die neu auch Belastungen durch GUS (gesamte ungelöste Stoffe) berücksichtigt.

1. Einführung

Die Einführung von REBEKA als *Screening Tool* zur Abschätzung von Vorfluterbeeinträchtigungen durch die Siedlungsentwässerung sollte den Wandel von der emissions- zur immissionsorientierten Planung von Massnahmen zur Lösung akuter stofflicher und hydraulischer Gewässerprobleme unterstützen [1, 2]. Werden verschiedene Massnahmen verglichen, so ist es nicht möglich zu berechnen, mit welcher Wahrscheinlichkeit die verschiedenen Massnahmen die Immissionsbedingungen erfüllen. REBEKA kann nur berechnen, ob die Bedingungen erfüllt sind oder nicht. Deshalb wurde nun das Programm durch Einführung einer stochastischen Simulation erweitert. Dabei wird jeder Modell-

Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

parameter als Zufallsvariable mit einem bestimmten Mittelwert, einer Streuung und einer Verteilungsfunktion betrachtet [3]. Mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation werden die Häufigkeitsverteilungen der folgenden *Resultate* berechnet:

- Anzahl Ereignisse mit kritischer Ammoniak-Belastung, Geschlechtsbetrieb oder kritischer Trübung durch GUS
- Zeit pro Jahr mit kritischer GUS-Akkumulation auf der Gewässersohle

Diese Immissionskriterien und ihre Grenzwerte für die Schweiz sind im dritten Artikel dieser Serie «Anforderungen an die Abwassereinleitungen» detailliert besprochen [4].

2. Modellbeschreibung

2.1 Einzugsgebiete

Das Modell basiert auf einer fest eingestellten Konzeption der technischen *Entwässerungsanlage*, bestehend aus je einer Misch- und Trennkanalisation. Das *Trennsystem* entwässert direkt in den Vorfluter. Dabei ist ein Regenbecken mit einem konstanten Drosselabfluss vorgeschaltet, dessen Notentlastung aber ebenfalls in den gleichen Vorfluter einmündet (*Abb. 1*). Dieser Typ von Regenbecken kommt vor allem in der Strassenentwässerung zum Einsatz und dient zum Abschwächen der Abflussspitzen und zur Zurückhaltung von Feststoffen. Das *Mischkanalisationssystem* weist ein Regenüberlaufbecken auf, welches sich bei einer Überschreitung der Zulaufkapazität der Kläranlage zuerst füllt und später Mischwasser in den Vorfluter entlastet. Das Regenbecken vom Trennsystem und das Regenüberlaufbecken vom Mischsystem können als Durchlauf- oder Speicher-

becken im Haupt- oder Nebenschluss definiert werden.

Der *Oberflächenabfluss* der einzelnen Einzugsgebiete wird jeweils durch einen Linearspeicher berechnet. Für jedes Einzugsgebiet können Anfangsverluste definiert werden. Dauerverluste müssen in der Angabe der abflusswirksamen Fläche berücksichtigt werden. Der Trockenwetteranfall wird als zeitlich konstant angenommen. Beim Mischsystem besteht die Möglichkeit, einen externen Zufluss zu definieren, der entweder kontinuierlich fließt (z. B. Industrieabwasser) oder nur während der Niederschlagsdauer. Diese zweite Wahl ermöglicht in einfacher Form ein oberwasserseitiges, vor-entlastetes Gebiet zu berücksichtigen.

Beide Kanalisationsanlagen entwässern in einen *Vorfluter*, dessen Gesamtabfluss aus der Kombination von Basisabfluss und Abfluss aus dem definierten «natürlichen» Einzugsgebiet berechnet wird. Im Modell wird angenommen, dass es im Vorfluter zu einer sofortigen und vollständigen Durchmischung der Einleitungen kommt. Die Berechnung der Gewässerbeeinträchtigung erfolgt punktförmig anhand der Stoffkonzentration und des Abflussverhaltens des Vorfluters unmittelbar unterhalb der Einleitungsstelle.

2.2 Regendaten

Für die Simulation des Systemverhaltens werden langjährige Messungen des Niederschlags als Eingabedaten benötigt. Um die Benutzung des Programms zu erleichtern, werden fünf verschiedene zehnjährige *Regenreihen* angeboten. Diese Regenreihen repräsentieren die wichtigsten meteorologischen Gebiete der Schweiz (Basel für die Nordwestschweiz, Zürich für die Mittel- und Ostschweiz, Lausanne

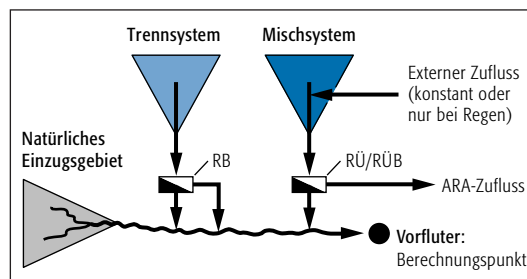


Abb. 1 Schematischer Überblick des im Programm REBEKA implementierten urbanen Entwässerungssystems.

für die Westschweiz, Sitten für das Wallis und Locarno für das Tessin). Es können auch eigene Regendaten im KMD-Format eingelesen werden. Die zeitliche Auflösung sollte zehn Minuten betragen und der zeitliche Abstand zwischen zwei Regenereignissen mindestens eine Stunde.

2.3 Stofftransport

Der Stofftransport von $\text{NH}_4\text{-N}$ wird im gegenwärtigen Modell sehr vereinfacht durch eine blosse Mischrechnung berücksichtigt. Dazu sind für den Trockenwetterabfluss im Siedlungsgebiet und das Regenwasser jeweils die zeitlich konstanten *Ammoniumkonzentrationen* (bzw. die einwohnerbezogene Fracht) anzugeben. Gleichermassen kann eine Vorbelastung des Vorfluters mit $\text{NH}_4\text{-N}$ angegeben werden. Diese Vorbelastung bezieht sich aber nur auf den Basisabfluss. Der Regenabfluss aus dem natürlichen Einzugsgebiet wird als unbelastet angesehen. Bezüglich des Ammoniums werden im Programm REBEKA mit Ausnahme der Verdünnung keine weiteren Reaktionen berücksichtigt.

Im Regenbecken ergibt sich durch den Zufluss des Regenwassers aus der Trennkanalisation definitionsgemäss eine konstante $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration. $\text{NH}_4\text{-N}$ wird im Modell als gelöster, konservativer Stoff behandelt.

Der Anfall, Transport und die Entlastung der *gesamten ungelösten Stoffe* (GUS) werden mit Hilfe eines stochastischen Ansatzes [5] berechnet. Die Modellparameter (GUS-Konzentration im Abwasser und Regenwasser, Firstflush-Koeffizienten, Effizienz der Regenbecken, Erosion der Sedimente im Mischsystem) werden für jedes Regenereignis variiert. Für jeden Simulationsdurchlauf der zehnjährigen Regenreihe berechnet das Programm daraus die mittleren GUS-Frachten pro Jahr zur Kläranlage und in den Vorfluter sowie den Anteil, der in den Regenbecken verbleibt. Die Sum-

Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

menhäufigkeit dieser Frachten werden am Schluss der Monte-Carlo-Simulation dargestellt.

2.4 Behandlungsanlagen

REBEKA II bietet die Möglichkeit, neben Regenbecken auch andere Behandlungsanlagen wie Wirbelabscheider, Lamellenabscheider und Bodenfilter zu modellieren. Die Modellparameter der Behandlungsanlage müssen entsprechend angepasst werden.

2.5 Belastungen im Vorfluter

Welche Belastungen durch Abwassereinleitungen bei Regenwetter relevant und welche Grenzwerte maximal zulässig sind, wurde in einem vorhergehenden Artikel dieser Serie ausführlich diskutiert [4]. In REBEKA II werden von diesen Belastungen folgende abgeschätzt:

- Erhöhung der Geschiebetriebereignisse durch entlastetes Wasser
- NH_3 -Belastung des Vorfluters durch Einleitung von Ammonium
- Belastung durch ungelöste Stoffe aus den Entlastungen:
 - Kolmation der Gewässersohle
 - Akkumulation von nicht- oder schwerabbaubaren partikulären Stoffen auf der Gewässersohle
 - Trübung des Vorfluters
 - Sauerstoffzehrung im Bereich der Sohle und im hyporheischen Interstitial infolge des Abbaus von leicht abbaubaren partikulären organischen Substanzen

Geschiebetrieb und NH_3 -Belastung sind schon in REBEKA implementiert. Wie diese Belastungen ermittelt werden, ist in der REBEKA-Dokumentation beschrieben [1]. Deshalb werden hier nur die Belastungen durch GUS beschrieben, die neu in REBEKA II abgeschätzt werden können.

REBEKA II beschreibt *Akkumulation* und *Erosion* der gesamten ungelösten Stoffe (GUS) [5]. Modellparameter für die Akkumulation sind die Sinkgeschwindigkeit der GUS und die Grenzschleppspannung. Für die Erosion ist ein Erosionskoeffizient und die Grenzschleppspannung massgebend. Der Abbau der organischen Stoffe wird durch einen Abbaukoeffizienten beschrieben. Das Modell berücksichtigt keine Sedimentation entlang der Fliessrichtung, sondern es wird angenommen, dass Akkumulation, Erosion und Abbau an einem fiktiven Punkt im Vorfluter stattfinden [5].

Die resultierende GUS-Dichte [g/m^2] auf der Gewässersohle wird aufgrund der beschriebenen Prozesse für jeden Zeitschritt berechnet. Diese Dichte wird mit den definierten Grenzwerten für kritische Kolmation (Dichte $> 625 \text{ g}/\text{m}^2$) und für Toxizität (Dichte $> 25 \text{ g}/\text{m}^2$) verglichen. Für jeden Simulationsdurchgang wird nun der Anteil der Zeit berechnet, während dem die Grenzwerte überschritten sind. Sind die Grenzwerte während weniger als 20 % für Kolmation bzw. 5 % für Toxizität überschritten, so wird angenommen, dass keine Auswirkung auf den Vorfluter vorliegt [4]. Die Trübung des Vorfluters wird ähnlich behandelt wie Geschiebetrieb und kritische NH_3 -Belastung: REBEKA II berechnet pro Simulationsdurchgang die mittlere Anzahl Ereignisse pro Jahr, bei denen eine kritische Trübung überschritten wurde. Die kritische Trübung wird aufgrund des gewählten Auswirkungsgrades auf die Fische bestimmt [4]. Nach Ausführung der gesamten Monte-Carlo-Simulation wird eine Summenkurve dieser Anzahl kritischer Ereignisse dargestellt.

3. Vorbereitung der Daten

3.1 Vereinfachung des zu simulierenden Systems

Wie im Artikel «Unsicherheiten» [3] beschrieben, muss vor der Simulation das zu simulierende System abstrahiert und vereinfacht werden. Aufgrund der einfachen Modellstruktur von REBEKA II müssen die komplexen Systeme der Misch- und Trennkanalisation mit je einem Linearspeicher-Modell mit Entlastungsbauwerk abgebildet werden. Erfahrungsgemäss bereitet die Handhabung mehrerer Entlastungsbauwerke am meisten Mühe. Dazu bieten sich zwei verschiedene *Lösungsansätze*:

- I. Durchführung einer separaten Analyse mit einem deterministischen Simulationsprogramm, um festzustellen, welche Entlastungsbauwerke relevant sind und wie sie zusammengefasst werden können. Beim Beispiel von Russikon, das im Artikel «Akute stoffliche und hydraulische Beeinträchtigungen» in dieser Ausgabe behandelt wird, wurde dieser Ansatz gewählt (siehe [6], *Tab. 1*). Oft können Angaben zu den Entlastungsbauwerken auch aus dem GEP entnommen werden.
- II. Modellierung des Kanalsystems mit REBEKA II in mehreren Schritten von oben nach unten, jeweils bis zu einem Entlastungsbauwerk. Der Drosselabfluss des obenliegenden Kanalnetzes kann jeweils als konstanter Zufluss (nur bei Regen) definiert werden. Dieser Ansatz wurde bei der Fallstudie Möhlental [7] gewählt. Er ist anspruchsvoll, da auch die Stofffrachten im konstanten Zulauf abgeschätzt werden müssen.

3.2 Bestimmung der Modellparameter und deren Unsicherheiten

Nachdem das System abstrahiert und vereinfacht ist, müssen die Werte für die Modellparameter bestimmt und in REBEKA II eingegeben werden. *Tabelle 1* zeigt alle Modellparameter von REBEKA II. Für die fett gedruckten Parameter werden im fünften und sechsten Artikel dieser Serie [5, 6] Standard-Werte mit Angabe der Unsicherheiten und Verteilungsfunktionen vorgeschlagen. Zusätzliche Hinweise zur Bestimmung der Modellparameter können der REBEKA-Dokumentation [1] entnommen werden. Falls die Unsicherheiten unbekannt oder nur schwer abschätzbar sind, empfiehlt sich eine Sensitivitätsanalyse. Falls diese zeigt, dass gewisse

Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

Parameter, bei denen Standard-Werte angenommen wurden, grossen Einfluss auf die Resultate haben, empfiehlt sich eine Überprüfung und evtl. bessere Bestimmung dieser Werte.

4. Simulation und Darstellung der Resultate

4.1 Deterministische Simulation

Nachdem die Daten eingegeben sind, kann eine Simulation durchge-

führt werden. Als erster Schritt ist die Durchführung einer deterministischen Simulation (wie mit REBEKA I) empfehlenswert, um die Eingabe der Mittelwerte zu überprüfen und zu testen, ob die Resultate plausibel sind. Ein Ausdruck der Resultate liefert auch die zugehörigen Eingabegrößen. Auf diese Weise können sie gut überprüft werden.

Bei der deterministischen Berechnung wird die Simulation mit der

zehnjährigen Regenreihe einmal durchgeführt. Als Parameterwerte werden die eingegebenen Mittelwerte der Parameter verwendet. *Tabelle 2* zeigt, welche Kenngrößen berechnet werden.

4.2 Sensitivitätsanalyse

Wie schon erwähnt, kann eine Sensitivitätsanalyse am Anfang der Bearbeitung helfen, zu bestimmen, welche Parameter grossen Einfluss haben und deshalb deren Werte möglichst genau erfasst werden müssen. Zur Durchführung der Sensitivitätsanalyse müssen Unter- und Obergrenzen der Parameter wie bei einer normalen stochastischen Simulation eingestellt werden. Allerdings kann hier der Bereich gross gewählt werden, da ja der Einfluss des Parameters interessiert. REBEKA II führt eine lokale Sensitivitätsanalyse durch, d. h. jeder Parameter wird innerhalb des gewählten Bereichs variiert, während alle anderen Parameter bei ihrem Mittelwert festgehalten werden. Die Anzahl Berechnungspunkte pro Parameter kann vom Benutzer eingestellt werden. Sie reicht von 3.0 bis 11.0; Standardwert ist 5.0. Wenn z. B. als Untergrenze 9.0 und als Obergrenze 11.0 gewählt wurde, werden die folgenden fünf Berechnungspunkte gewählt: 9.0, 9.5, 10.0, 10.5 und 11.0. Werden p Parameter variiert und n Berechnungspunkte gewählt, so müssen $p \cdot n$ Simulationen für die Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden.

Es muss betont werden, dass die Sensitivitätsanalyse bei anderen Mittelwerten wieder neu durchgeführt werden muss. *Abbildung 2* zeigt ein Beispiel für die Veränderung der Sensitivität bei geändertem Mittelwert für das Beispiel von Russikon [6]: Für einen pH-Wert von 7.5 des entlasteten Wassers hat nur dieser Parameter einen Einfluss auf die Anzahl kritischer NH_3 -Ereignisse (*Abb. 2a*). Alle anderen Parameter haben keinen Einfluss. Wird die Sensitivitätsanalyse bei einem pH-Wert von 7.7 durchgeführt (*Abb. 2b*), so haben andere Größen auch einen Einfluss (z. B. die NH_4 -N-Konzentration des Regenwassers (*Abb. 2c*)). Die Sensitivitätsanalyse erzeugt für jeden variierten Parameter und jedes Resultat eine Graphik wie in *Abbildung 2b*. In der Graphik ist die Abhängigkeit des Resultats vom betreffenden Parameter sichtbar. Zusätzlich ist auch der Einfluss der anderen Parameter sichtbar (vertikal übereinander liegende Punkte beim Mittelwert des betreffenden Parameters). Füllt der vertikale Bereich der übereinander liegenden Punkte nicht die ganze Graphik aus,

	Mischsystem	Trennsystem	Vorfluter
Hydraulik, Geschichtsbetrieb	<ul style="list-style-type: none"> Abflusswirksame Fläche Anfangsverlust Speicherkonstante Anzahl Einwohner Trockenwetteranfall ARA-Zufluss Konstanter Zufluss Volumen des Regenüberlaufbeckens (RÜB) 	<ul style="list-style-type: none"> Abflusswirksame Fläche Anfangsverlust Speicherkonstante Volumen des Regenbeckens (RB) Drosselabfluss des Regenbeckens 	<ul style="list-style-type: none"> Abflusswirksame Fläche Anfangsverlust Speicherkonstante Basisabfluss Q_{347} Sohlgelälle Breite Böschungsnäigung Stricklerkoeffizient Mittlerer und 90%-Korndurchmesser vom Geschiebe
$\text{NH}_4^+ / \text{NH}_3$	<ul style="list-style-type: none"> pH im Mischwasser ¹ NH_4-N-Konz. im Regenabfluss NH_4-N-Fracht Alkalinität im Mischwasser NH_4-N-Konz. im konst. Zufluss 	<ul style="list-style-type: none"> NH_4-N-Konzentration im Regenabfluss 	<ul style="list-style-type: none"> NH_4-N-Konzentration pH-Wert Alkalinität Min. Temperatur (Februar) Max. Temperatur (August)
GUS	<ul style="list-style-type: none"> GUS-Konz. im Abwasser GUS-Konz. im Regenwasser GUS-Konz. im konst. Zufluss First Flush Koeffizient Sedimentanteil Abscheidegrad des RÜB 	<ul style="list-style-type: none"> GUS-Konzentration im Regenwasser First Flush Koeffizient Abscheidegrad des RB 	<ul style="list-style-type: none"> Sinkgeschwindigkeit der GUS Erosionskoeffizient Koeffizient der Grenzschleppspannung Abbaureate der organischen Stoffe

Tab. 1 Modellparameter von REBEKA II: Die kursiv gedruckten Parameter werden vor jedem Regenereignis zufällig variiert, die restlichen vor jedem Simulationsdurchgang. Für die fett gedruckten Parameter werden in [5] und [6] Standard-Werte vorgeschlagen.

¹ Es wird angenommen, dass der pH-Wert des gesamten in den Vorfluter eingeleiteten Wassers (von Misch- und Trennsystem) gleich diesem pH-Wert ist.

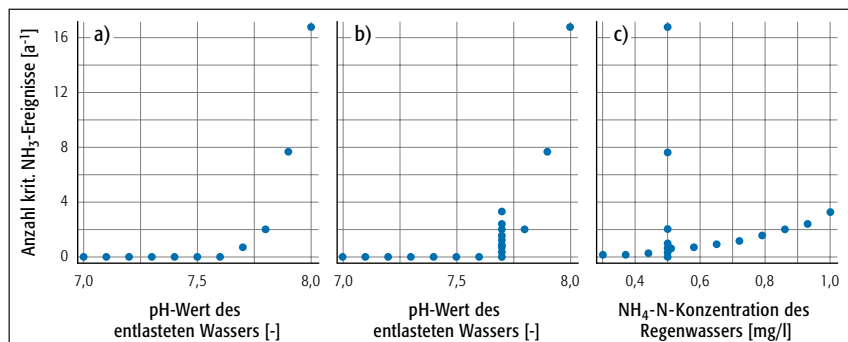


Abb. 2 Einfluss des Parameters «pH des entlasteten Wassers» auf die Anzahl kritischer NH_3 -Ereignisse. a) bei $\text{pH} = 7.5$; b) bei $\text{pH} = 7.7$. Die vertikal übereinander liegenden Punkte bei b) zeigen den Einfluss der restlichen Parameter. c) bei $\text{pH} = 7.7$ hat die NH_4 -N-Konzentration des Regenwassers einen Einfluss.

Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

Projektbeschreibung	Projektname, Projektdatei, Regendatei, Regenanfang, Regenende, eigener Kommentar
Kennwerte der Regenserie und des Vorfluters	<ul style="list-style-type: none"> Regenhöhe pro Jahr Anzahl Regenereignisse pro Jahr Grenzabfluss für Geschiebetrieb Wasserstand bei Q_{347} NH_4-N bei Q_{347} und max. Temperatur
Kennwerte der Mischwasserentlastung	<ul style="list-style-type: none"> Entlastungshöhe pro Jahr Entlastungsvolumen pro Jahr Anzahl Entlastungen pro Jahr Dauer der Entlastungen pro Jahr Entlastete GUS pro Jahr
Kennwerte der Einleitungen aus der Trennkanalisation	<ul style="list-style-type: none"> Höhe der Einleitungen pro Jahr Volumen der Einleitungen pro Jahr Anzahl Einleitungen pro Jahr Dauer der Einleitungen pro Jahr Entlastete GUS pro Jahr
Kritische NH_3 , GUS und Geschiebetriebereignisse	<ul style="list-style-type: none"> Kritische NH_3-Ereignisse pro Jahr Geschiebetriebereignisse gesamt pro Jahr Geschieb. durch SE-Einleitungen pro Jahr Zeit mit kritischer GUS-Kolmation Zeit mit toxischer GUS-Akkumulation Zeit mit kritischer Sauerstoffzehrung Für Trübung kritische Ereignisse pro Jahr
Extremwertstatistik: Mittelwerte pro Ereignis	<ul style="list-style-type: none"> Q_{max}, NH_3_{max} und Anteil Mischwasser am Gesamtabfluss für Jährlichkeit $z = 0,1; 1$ und 10

Tab. 2 Kenngrößen, die bei der deterministischen Simulation bestimmt werden. Die fett gedruckten Größen werden neu in REBEKA II angezeigt.

so hat der betreffende Parameter den grössten Einfluss (Abb. 2a und b). Andernfalls hat der betreffende Parameter einen geringeren Einfluss (Abb. 2c). Abbildung 3 in [6] zeigt ein analoges Beispiel für die Geschiebetrieb-Ereignisse. Dort hat der mittlere Korndurchmesser d_m den grössten Einfluss, gefolgt von Gefälle und d_{90} .

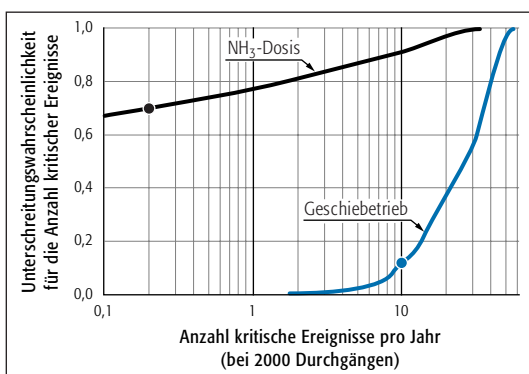


Abb. 3 Beispiel einer Resultatdarstellung in REBEKA II für die Anzahl kritischer Ereignisse für Geschiebetrieb, kritische NH_3 -Belastung. Die Anforderung von höchstens 0.2 kritischen NH_3 -Ereignissen pro Jahr werden in diesem Beispiel mit einer Wahrscheinlichkeit von 0.71 eingehalten, die Anforderung von höchstens zehn Geschiebetriebsereignissen pro Jahr mit einer Wahrscheinlichkeit von nur 0.12.

Die Graphiken werden in einer Matrix angeordnet. In den Spalten die einzelnen Parameter, in den Zeilen die Resultat-Größen (Anzahl kritische Ereignisse, Zeit mit kritischer GUS-Akkumulation, GUS-Frachten, Entlastungsvolumen, -dauer und -anzahl).

4.3 Stochastische Simulation

Bei der stochastischen Simulation wird die deterministische Simulation viele Male wiederholt. Bei jedem solchen Durchlauf werden die Modellparameter aufgrund des Mittelwertes, der Unter- und Obergrenze und der Verteilungsfunktion zufällig verändert, so dass jede Simulation einen anderen Satz von Parameterwerten beinhaltet. Als Verteilungsfunktionen können Gleich-, Normal-, Lognormal- und Dreiecksverteilung gewählt werden. Daneben existieren noch die Optionen «konstant» und «Extreme». Wird die Option «konstant» gewählt, dann wird der betreffende Parameter nicht variiert, sondern bei seinem Mittelwert konstant gehalten. Bei der Option «Extreme» wird nur zwischen Mittelwert, Unter- und Obergrenze zufällig ausgewählt. Bei jedem Durchlauf wird die gleiche zehnjährige Regenserie verwendet. Für jedes Regenereignis (bei zehn Jahren ca. 2000) wird bestimmt, ob es hinsichtlich der verschiedenen Belastungen kritisch ist. Am Schluss des Durchlaufs wird für jede Belastung eine durchschnittliche Anzahl kritischer Ereignisse pro Jahr berechnet. Nachdem alle Durchläufe durchgeführt sind, werden die Anzahl kritischer Ereignisse der Grösse nach sortiert und jeder Anzahl eine Unterschreitungswahrscheinlichkeit $p = 1 - m/n$ zugeordnet, wobei n die Anzahl Simulationen bzw. Durchläufe und m der Rang des Durchlaufs bedeutet (der Durchlauf mit der grössten Anzahl kritischer Ereignisse hat

den Rang 1, der mit der zweitgrössten den Rang 2 usw.). Die Darstellung dieser Unterschreitungswahrscheinlichkeit p gegen die Anzahl kritischer Ereignisse ergibt die Summenhäufigkeitskurve. Sie wird in REBEKA II als Resultat aufgezeichnet (Abb. 3).

Die Anzahl der Simulations-Durchläufe kann vom Benutzer gewählt werden. Für die Simulation der Abbildung 3 wurden 2000 Durchgänge gewählt. Die Unsicherheit für die Wahrscheinlichkeitswerte liegt dann unter 0.005. Bei 1000 Durchgängen liegt sie unter 0.01, bei 500 unter 0.02 und bei 200 zwischen 0.03 und 0.04. Diese Unsicherheit ist so zu interpretieren, dass bei Wiederholung der stochastischen Simulation mit gleich vielen Durchgängen und denselben Parametereinstellungen die Wahrscheinlichkeitswerte mit 95%iger Wahrscheinlichkeit wieder in diesem Bereich liegen. Die Rechenzeit für eine Simulation mit 200 Durchgängen (200 mal zehn Jahre) liegt bei ungefähr zwei Minuten (Pentium 3, 450 MHz).

In Tabelle 3 ist der ganze Ablauf der Monte-Carlo-Simulation, so wie er in REBEKA II ausgeführt wird, nochmals dargestellt.

5. Folgerungen

Die Anwendung von REBEKA II zwingt die Ingenieure in der Praxis, sich mit Unsicherheiten bei der Massnahmenplanung zu befassen. Die Resultate werden nicht als «harte Zahlen» präsentiert wie bei deterministischen Simulationsprogrammen, sondern als Wahrscheinlichkeiten, die den Einfluss der Unsicherheiten der Modellparameter widerspiegeln. Die eingebaute Sensitivitätsanalyse erweist sich als sehr hilfreich um zu entscheiden, welche Modellparameter für die vorliegende Fragestellung von Be-

Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

Ausführungsschritte		Ort
Systemdaten (Mittelwerte, Unter- und Obergrenze und Verteilung der Parameter) einlesen		
Regendaten einlesen		
Für jeden Durchlauf:		
Zufällige Modell-Parameter (inkl. GUS-Parameter im Vorfluter) erzeugen		
Grenzabfluss für Geschiebtrieb berechnen		
Für jedes Regenereignis:		
Zufällige GUS-Parameter (ohne Vorfluter-Parameter) erzeugen		
Oberflächenabfluss für Mischsystem (MS), Trennsystem (TS) und natürliches Einzugsgebiet berechnen	NH ₄ -N- und GUS-Konzentrationen berechnen	im Einzugsgebiet
Entlastete Wassermenge für MS, eingeleitete Wassermenge für TS berechnen	NH ₄ -N- und GUS-Konzentrationen im entlasteten Wasser, GUS-Frachten berechnen	im Bauwerk
Gesamter Abfluss im Vorfluter berechnen	NH ₃ -Immission und GUS-Akkumulation berechnen	im Vorfluter
Ist Abfluss > Grenzabfluss, dann Geschiebtriebereignisse um 1 erhöhen	Ist Ereignis kritisch? Wenn ja, Anzahl kritische Ereignisse um 1 erhöhen Zeit, während dem die kritische GUS-Akkumulation überschritten ist, bestimmen	Belastungen
	Mittlere GUS-Frachten pro Jahr berechnen	Entlastungen
Mittlere Anzahl kritischer Ereignisse pro Jahr bestimmen	Mittlere Zeit pro Jahr, während dem die kritische GUS-Akkumulation überschritten ist, bestimmen	Belastungen
	Summenkurven der GUS-Frachten darstellen	Entlastungen
Summenkurven der Anzahl kritischer Ereignisse darstellen	Summenkurven der Zeit pro Jahr, während dem die kritische GUS-Akkumulation überschritten ist, darstellen	Belastungen

Tab. 3 Ablauf-Diagramm (Struktogramm) der Monte-Carlo-Simulation in REBEKA II.

deutung sind und deshalb sorgfältig bestimmt werden müssen. Die Benutzung von REBEKA II ist sicher komplexer als beim deterministischen Vorgänger REBEKA. Der Benutzer sollte die implementierten Modelle kennen und gewisse Grundkenntnisse in Statistik und im Umgang mit Unsicherheiten mitbringen, damit er die Resultate verstehen und interpretieren kann. Dann ermöglicht ihm die stochastische Simulation mit REBEKA II ein tieferes Verständnis für die Massnahmenplanung in der Siedlungsentwässerung. Dies wird anhand der Beispiele in [6] und [7] anschaulich demonstriert. Der Wandel von einer emissions- zu einer immissionsorientierten Sichtweise und die Implementierung der Prozesse zur Modellierung von

Fliessgewässerbeeinträchtigungen sind sehr wichtig, um die Massnahmen zu finden, die für den Vorfluter den grössten Nutzen bringen. In der Zukunft können zusätzliche Prozesse, die sich für eine realistische Modellierung der Gewässerbelastung als wichtig erweisen, hinzugefügt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Rauch, W., Krejci, V., 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.
- [2] Rauch, W., Krejci, V., Gujer, W. (2002): REBEKA – a software tool for planning urban drainage on the basis of predicted impacts on receiving water, Urban Water 4, p. 355–361.

- [3] Kreikenbaum, S., Krejci, V., Fankhauser, R., Rauch, W. (2004): Berücksichtigung von Unsicherheiten bei der Planung, gwa Nr. 8, p. 587–594.
- [4] Rossi, L., Krejci, V., Kreikenbaum, S. (2004): Anforderungen an die Abwassereinleitungen, gwa Nr. 6, p. 431–438.
- [5] Rossi, L., Gujer, W., Kreikenbaum, S., Fankhauser, R. (2004): Modélisation des matières en suspension (MES) dans les rejets urbains en temps de pluie, gwa No 10, p. 753–761.
- [6] Krejci, V., Kreikenbaum, S., Fankhauser, R. (2004): Akute stoffliche und hydraulische Beeinträchtigungen, gwa Nr. 9, p. 671–679.
- [7] Krejci, V., Suter, K., Schmid, H., Hoehn E. (2004): Fallstudie Möhlinbach, gwa Nr. 11, p. 833–843.

Das Programm REBEKA II ist im Moment in der Beta-Testphase. Es kann ab Ende 2004 über Internet bezogen werden (www.gepdata.ch). Es kann in deutsch, englisch, französisch und italienisch betrieben werden. Zur Betreuung des Programms wird ein Benutzerforum auf dem Internet eingerichtet. Zudem werden Einführungskurse angeboten.

Keywords

Simulationsprogramm – stochastisch-probabilistisch – Unsicherheiten – Planung – Massnahmen

Adresse der Autoren

Rolf Fankhauser, Dr.phil.
IHW ETH Zürich-Hönggerberg
Wolfgang-Pauli-Strasse 15
CH-8093 Zürich
Tel. +41 (0)1 633 25 07
Fax +41 (0)1 633 10 61
rolf.fankhauser@eawag.ch

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

Luca Rossi, Dr.sc.tech.
EAWAG, CH-8600 Dübendorf
Tel. +41 (0)1 823 53 78
luca.rossi@eawag.ch

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