

Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

## Akute Ammoniak- und hydraulische Beeinträchtigungen\*

### Impacts aigus liés à l'ammoniaque et au stress hydraulique

Les déversements par les canalisations en temps de pluie peuvent causer des atteintes aiguës sur l'écologie des cours d'eau, notamment en termes de pollution ( $\text{NH}_3$ ) et de stress hydraulique. Ces problèmes font précisément l'objet de cet article. Par le biais d'un exemple pratique, une procédure de planification de mesures de protection pour le cours d'eau est présentée, d'un point de vue immission. Cette procédure permet de trouver une solution à ces problèmes aigus. De plus, la construction du modèle, l'obtention des données, le choix des mesures de protection et l'interprétation des résultats sont également présentés.

### Acute Ammoniac and Hydraulic Impacts

Acute pollution ( $\text{NH}_3$ ) and hydraulic impairments caused by sewage discharges from canalisations during rain weather can play an important role regarding water ecology. Therefore these problems will be specifically detailed in this publication. On the basis of a practical example, a procedure is presented (immission based planning) to solve acute  $\text{NH}_3$  pollution and hydraulic problems. In addition to this procedure, the data acquisition, the choice of the measures and the interpretation of the results are presented.

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

Vladimir Krejci



**Akute Ammoniak- ( $\text{NH}_3$ ) und hydraulische Beeinträchtigungen verursacht durch Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter können hinsichtlich Gewässerökologie eine bedeutende Rolle spielen. Deshalb wird hier auf dieses Problemfeld genauer eingegangen. Im Folgenden wird anhand eines praktischen Beispiels das Vorgehen bei der immissionsorientierten Planung von Massnahmen zur Lösung akuter  $\text{NH}_3$ - und hydraulischer Gewässerprobleme dargestellt. Dazu wird die Modellbildung, die Datenbeschaffung, Wahl der Massnahmen und die Interpretation der Resultate vorgestellt.**

### 1. Einleitung

In der vorliegenden Publikation wird die Planungsmethode, die im Rahmen des Projektes «STORM» entwickelt wurde, auf das Beispiel von akuten Ammoniak- und hydraulischen Problemen angewendet. Für das Verständnis wird die Lektüre der in dieser Serie veröffentlichten Artikel [1, 2, 3, 4, 5] vorausgesetzt.

Am Beispiel eines Wohngebietes mit 3400 Einwohnern, das im Einzugsgebiet eines kleinen Fließgewässers liegt, werden die Planungsaufgabe, die Modellbildung (Systemdefinition), die Auswahl von Berechnungsdaten, die Durchführung der notwendigen Berechnungen und die Resultate bezüglich der Leistung und der Kosten von ausgewählten Mass-

# Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

nahmen aufgezeigt. Die meisten Grundlagen für diese Informationen stammen aus der EAWAG – Studie «Fehraltorf» [6], aus einer Dissertation [7] und aus dem GEP Russikon [8].

## 2. Identifizierte Probleme und Handlungsbedarf

Der unnatürlich häufig auftretende Geschiebetrieb unterhalb der Kanalisationseinleitungen im Rohrbach (Russikon/ZH) führt zu Erosion des Flussbettes und zu regelmässigen Abschwemmungen der benthischen Organismen. Im Rahmen der EAWAG-Studie [6] wurde das überlaufende Mischwasser und der Regenabfluss aus der Trennkanalisation als Hauptversacher dieser Probleme identifiziert. Aufgrund näherer Untersuchungen [7] konnte der Schwellenwert für das Einsetzen des Geschiebetriebes auf ca. 250 l/s geschätzt werden. Dieser Wert wurde im Jahre 1992 oberhalb der Kanalisationseinleitungen fünfmal pro Jahr überschritten ( $Q_{max} \approx 500 \text{ l/s}$ ), nach Einleitung des Regenwassers aus dem Trennsystem zehnmal pro Jahr ( $Q_{max} \approx 1500 \text{ l/s}$ ), nach Einleitung des Mischwasserüberlaufs 25-mal pro Jahr ( $Q_{max} \approx 2500 \text{ l/s}$ ). Aus Berechnungen der kritischen  $\text{NH}_3$ -Belastungen im Rohrbach [9] folgt, dass bei gegenwärtiger Entwässerungssituation nur eine geringe Belastung zu erwarten ist. Allerdings soll gemäss dem GEP aus dem Jahre 1996 [8] die momentane Drosselung im wichtigsten Mischwasserüberlauf (RÜB Morgental) von ca.  $5 Q_{TW}$  auf  $2 Q_{TW}$  reduziert werden. Durch diese kurzfristig realisierbare Massnahme und durch die stetige Zunahme der Bevölkerung wird die  $\text{NH}_3$ -Belastung des Rohrbaches deutlich grösser werden und die tolerierbare  $\text{NH}_3$ -Belastung könnte gemäss den vorgeschlagenen «Anforderungen» [3] überschritten werden [9].

## 3. Planungsgebiet

Die ländliche Gemeinde Russikon/ZH liegt zwischen den Städten Zürich und Winterthur. Im untersuchten Ortsteil, der im Einzugsgebiet des Rohrbaches liegt, wohnen 2400 Einwohner. Die Siedlungsfläche beträgt ca. 80 ha, ein Drittel davon ist befestigt. In der Gemeinde wurden hauptsächlich Wohnhäuser gebaut, der Anteil der Industrie und des Gewerbes ist gering. Die im Misch- und im Trennsystem entwässerten Siedlungsflächen, die wichtigsten Kanäle und die Sonderbauwerke sind in der *Abbildung 1* und *Tabelle 1* dargestellt. Die wichtigste Kanalisationseinleitung in den Rohrbach ist

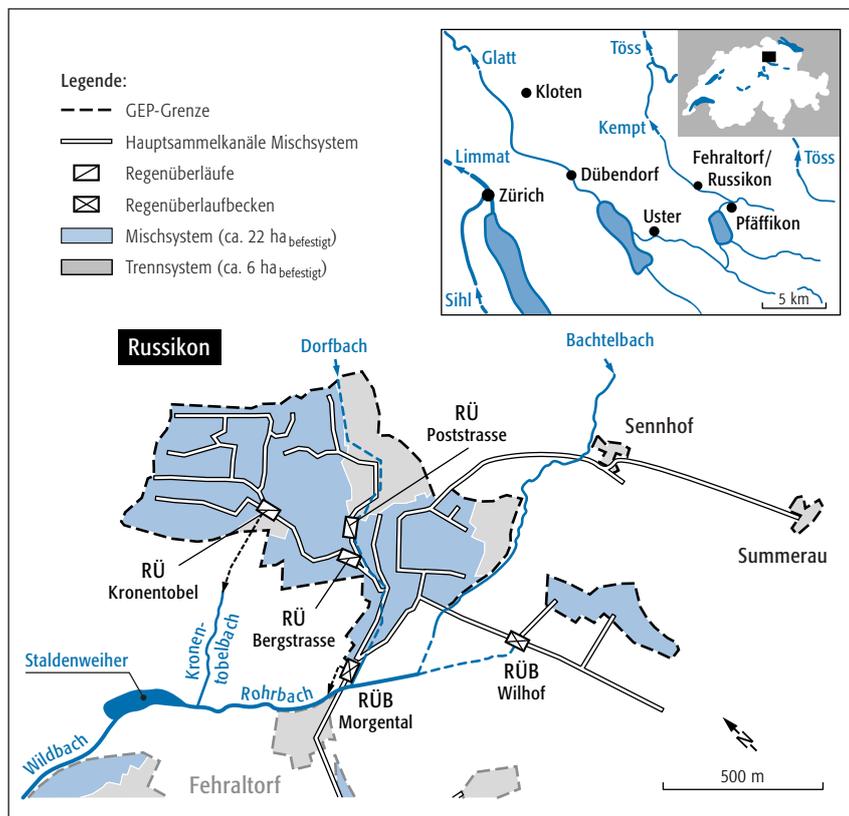


Abb. 1 Schema des Entwässerungssystems in Russikon.

	RÜ Kronentobel	RÜ Bergstrasse	RÜ Poststrasse	RÜB Wilhof	RÜ Morgental	RÜB Morgental
<b>→ EINGABEDATEN</b>						
Einwohner [-]	600*)	400*)	500*)	300*)	2400**)	2400**)
Trockenwetterabfluss [ $\text{l E}^{-1} \text{d}^{-1}$ ]	250	250	250	250*)	250	250
Befestigte Fläche [ha]	4*)	2*)	3*)	2*)	22**)	22**)
Dauerverluste [%]	10	10	10	10	10	10
Anfangsverluste [mm]	2	2	2	2	2	2
Linearspeicherkonstante [min]	10	10	10	10	20	20
Speichervolumen [ $\text{m}^3$ ]	0	0	0	165	0	120
Drosselung [ $\text{l/s}$ ]	$\geq 150$	$\geq 200$	$\geq 200$	500	1200	120-160
<b>→ RESULTATE</b>						
Entlastungsmenge [ $\text{m}^3 \text{a}^{-1}$ ]	$\leq 2300$	$\leq 350$	$\leq 900$	0	400	40000
Entlastungsdauer [ $\text{h a}^{-1}$ ]	$\leq 4$	$\leq 0,7$	$\leq 1,6$	0	1,3	57
Anzahl der Entlastungen [ $\text{a}^{-1}$ ]	$\leq 13$	$\leq 2$	$\leq 6$	0	2	36
	*) direkt angeschlossen (ohne Vorentlastung)			**) mit (Hochwasser)-Vorentlastung		

Tab. 1 Funktion der einzelnen Entlastungsbauwerke (Zustand 1994) in Russikon (berechnet [9]). Regendaten: Zürich – SMA 1986–95, mittlere Regenhöhe 1160 mm/a.

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

der *Mischwasserüberlauf Morgental*. Das Regenwasser aus der *Trennkanalisation* ist in den Dorfbach und in den Bachtelbach eingeleitet. Der *Rohrbach* ist das wichtigste Gewässer in Russikon. Der Niederwasser-Durchfluss im Rohrbach beträgt ca. 5 bis 10 l/s. Der Bach ist teilweise begradigt, jedoch nicht stark verbaut. Die Ufer sind teils von Hecken gesäumt und v. a. unterhalb der wichtigsten Einleitungen der Siedlungsentwässerung stark erodiert. Die Bachsohle besteht aus kiesig-sandigem Material mit wenigen, moosbewachsenen Steinen und ist in geringem Masse mit Algen bewachsen. Die Fläche des Einzugsgebietes vom Rohrbach bis zu den wichtigsten Einleitungen der Siedlungsentwässerung beträgt ca. 300 ha. Mit ca. 22 ha<sub>befestigt</sub> aus dem Mischsystem und ca. 6 ha<sub>befestigt</sub> aus dem Trennsystem beträgt der Anteil der befestigten Flächen in Russikon an der Einzugsgebietsfläche des Rohrbaches ca. 9,3 %.

### 4. Anforderungen an die Abwassereinleitungen

Zur Festlegung der jährlichen Anzahl (Frequenz) kritischer *mechanisch-hydraulischer Beeinträchtigungen* werden gemäss [10] Angaben über die Refugialräume (im Bachabschnitt unterhalb der Kanalisationseinleitungen) und Angaben über das Potential der Wiederbesiedlung (aus dem Bachabschnitt oberhalb der Kanalisationseinleitungen) benötigt.

Für die Beurteilung der Refugialräume ist die Breitenvariabilität des Rohrbachs unterhalb der Kanalisationseinleitungen massgebend. Die Verfügbarkeit der Refugialräume kann als *mittelmässig* bezeichnet werden (Tab. 2). Für die Beurteilung des Wiederbesiedlungspotentials gelten die Abschnitte oberhalb der untersuchten Kanalisationseinleitung. Im Hinblick auf den grossen Anteil der Klasse I (in der Distanz von 500 bis 1000 m oberhalb der bedeutenden Einleitung) und im Hinblick auf die Verfügbarkeit der Refugialräume unterhalb der Einleitungen werden in der untersuchten Bachstrecke 16–19 gemäss [10] im Durchschnitt *höchstens zehn geschiebetreibende Ereignisse pro Jahr* toleriert [3].

Die *kritische Ammoniakdosis* (LD<sub>10</sub>) darf gemäss [3] *höchstens einmal in fünf Jahren* überschritten werden.

### 5. Planungsmethode

Zur Unterstützung der Planung wird ein geeignetes *Simulationsprogramm* verwendet,

Abschnitt Nummer	Länge [m]	Morphol. Klasse	Verfügbarkeit der Refugialräume
16	150	I	hoch
17	50	III	gering
18	200	II	mittel
19	150	II	mittel

Tab. 2 Morphologische Charakterisierung des Rohrbaches unterhalb der Kanalisationseinleitungen in Russikon [11].

das eine Langzeitsimulation erlaubt und die *Immissionsaspekte* in einem *kleinen Fliessgewässer* berücksichtigt. Die *Planungsunsicherheiten* sind quantitativ zu dokumentieren. Bei der Bereitstellung der notwendigen *Berechnungsdaten* ist die Qualität der Daten und ihr Einfluss auf die Resultate zu berücksichtigen. Bei der Auswahl von *Massnahmen* ist das ganze Spektrum geeigneter Massnahmen in Betracht zu ziehen. Die *Kosten* der ausgewählten Massnahmen sind anhand von vereinfachten Kalkulationen zu ermitteln. Den Ausgangspunkt für die Bearbeitung dieser Aufgabe bildet die rechnerische Erfassung einer Basisvariante, des «Ist-Zustandes». Die Auswahl von verschiedenen Planungsszenarien beruht auf lokalen Kenntnissen und Erfahrungen des Planers. Als Resultat werden die *wahrscheinliche Leistung* (Erfüllung der lokalspezifischen Anforderungen) und die *Jahreskosten* der untersuchten Massnahmen zur weiteren Interpretation bereitgestellt. Die Wahl von Massnahmen erfolgt aufgrund einer *Interpretation der Resultate*.

### 6. Bearbeitung der Planungsaufgabe

#### 6.1 Modellbildung

In einem ersten Schritt wird geprüft, welche *Teileinzugsgebiete* und *Entlastungsbauwerke* zu einem Einzugsgebiet und zu einem Mischwasserüberlauf zusammengefasst wer-

den dürfen. Zu diesem Zweck wurde die Funktion der einzelnen Mischwasserentlastungen in diesem Einzugsgebiet mit einer einfachen Langzeitsimulation untersucht. Die Resultate (Tab. 1) identifizieren den Regenüberlauf Morgental als die wichtigste Quelle der Mischwasser-einleitungen in Russikon. Die übrigen Mischwasserüberläufe funktionieren als Hochwasserentlastungen. Die Zusammenfassung aller Entlastungsanlagen zu einem Entlastungsbauwerk (Morgental) hat deswegen bei der Berechnung der NH<sub>3</sub>- und der mechanisch-hydraulischen Belastung keinen bedeutenden Einfluss auf die Resultate, weil die kritischen NH<sub>3</sub>-Ereignisse bei schwächeren Regenfällen auftreten, die nicht zum Anspringen der Hochwasserentlastungen führen. Umgekehrt treten die kritischen mechanisch-hydraulischen Belastungen bei starken Regenfällen auf. Bei der geringen Distanz zwischen den einzelnen Einleitungsstellen kann deren Zusammenfassung im Modell zu einer Einleitung toleriert werden.

#### 6.2 Wahl der Berechnungsmodelle und des Simulationsprogramms

Die Wahl der Berechnungsmodelle ist eng mit der gestellten Planungsaufgabe verknüpft. Im Zusammenhang mit der gestellten Aufgabe werden Regen-Abfluss-Modelle gebraucht, welche die wichtigsten Prozesse im Hinblick auf die benötigte Aussagekraft der Resultate abbilden. Die für diese Aufgabe gewählten Modelle sind ausführlich im Handbuch zum Simulationsprogramm REBEKA beschrieben [12] und werden in dieser Publikation nicht näher vorgestellt.

Für die Berücksichtigung der Unsicherheiten wurde eine Kombination der deterministischen Langzeitsimu-

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

lation mit der Monte-Carlo-Methode gewählt. Diese Art der Berechnung wird z.B. durch das Simulationsprogramm REBEKA II angeboten, das als Arbeitsmittel für diese Aufgabe gewählt wurde. Die Grundlagen für die Berücksichtigung von Unsicherheiten sind im vierten Artikel dieser Serie aufgeführt [4], das Simulationsprogramm REBEKA II wird in einem folgenden Artikel dieser Serie vorgestellt [5].

### 6.3 Sensitivitätsanalyse

Im Hinblick auf die *gezielte Erfassung* der Unsicherheiten sollen möglichst präzise Variationsbereiche der Daten für die Berechnungen angegeben werden. Für Daten, die relativ genau ermittelt werden können und/oder einen geringen Einfluss auf die berechneten Resultate haben, reicht die Angabe des Mittelwertes für die Berechnung aus. Variationsbereiche zur Beschreibung der Unsicherheiten müssen für diese Daten nicht angegeben werden. Sinnvolle Variationsbereiche können mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse bestimmt werden (in REBEKA II implementiert, für Details siehe [5]).

Folgendes Beispiel soll die Nützlichkeit der Sensitivitätsanalyse erläutern: Für den pH-Wert im Mischwasser wurde eine Sensitivitätsanalyse bei einem Mittelwert von 7,5 und einem Variationsbereich von 7,0 bis 8,0 durchgeführt (d.h. dieser Parameter wurde innerhalb des Variationsbereichs variiert und alle anderen Parameter bei ihren Mittelwerten festgehalten). Das Resultat zeigt, dass bis zum pH-Wert von ca. 7,6 kein kritischer  $\text{NH}_3$ -Wert im Vorfluter auftritt. Im pH-Bereich zwischen 7,6 bis 8,0 nimmt der Einfluss auf die Überschreitung des kritischen  $\text{NH}_3$ -Wertes im Vorfluter zu. Eine analoge Sensitivitätsanalyse für den pH-Wert im Vorfluter

(Mittelwert = 8,2 Variationsbereich 8,0–8,7) hat ergeben, dass diese relativ hohen pH-Werte praktisch keine kritischen  $\text{NH}_3$ -Werte im Vorfluter verursachen. Der Grund liegt v. a. am relativ kleinen Anteil des Basisabflusses ( $Q_{347}$ ) am Gesamtabfluss im Vorfluter, der bei Regenwetter v. a. vom Mischwasser und vom Regenwasseranfall aus der Trennkanalisation dominiert wird (Abb. 2).

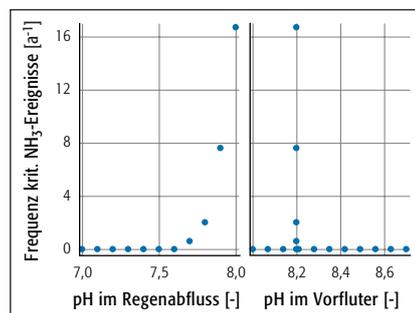


Abb. 2 Abhängigkeit der Frequenz kritischer  $\text{NH}_3$ -Ereignisse vom pH-Wert des Mischwassers (links) und des Vorfluters (rechts) aufgrund einer Sensitivitätsanalyse.

Die Abbildung 3 zeigt eine analoge Untersuchung des Einflusses von ausgewählten Modellparametern auf die Frequenz (Anzahl pro Jahr) kritischer mechanisch-hydraulischer Ereignisse.

Ähnliche Informationen können auch aus der Monte-Carlo-Simulation mit REBEKA II gewonnen werden (Abb. 4 u. 5). Im Vergleich zur Sensitivitätsanalyse werden in diesen Berechnungen alle Modellparameter gleichzeitig variiert, für welche ein Variationsbereich angegeben wurde.

Die Informationen aus den Abbildungen 2 bis 5 geben wichtige Hinweise zum Einfluss der einzelnen Modellparameter auf die berechneten Resultate und stellen damit eine wichtige Grundlage für die Festle-

gung der Modelldaten und deren Variationsbereiche in dieser Fallstudie dar.

### 6.4 Bereitstellung der notwendigen Daten

#### Regendaten

Als Regendaten wurde eine zehnjährige Regenreihe (1986–1995) von Zürich (SMA) mit einer zeitlichen Auflösung von zehn Minuten gewählt (ANETZ-Daten). Durch die gewählte Länge der Regenreihe von zehn Jahren kann die *Variabilität* der einzelnen Regenfälle und deren Einfluss auf die untersuchten Verhältnisse im Vorfluter gut erfasst werden. Die Länge der Regenreihe bezüglich der gestellten Aufgabe genügt für die Untersuchung der mechanisch-hydraulischen Belastung, für die Untersuchung der akuten  $\text{NH}_3$ -Belastungen im Hinblick auf die tolerierbare Periodizität ( $p = 0,2$ ) ist sie eher zu kurz. Die Anwendung von Regendaten aus einer nicht weit entfernten Messstation (ca. 15 km) kann im Hinblick auf die wesentlich bedeutenderen Unsicherheiten in den Prozessen, die den Gewässerzustand beschreiben, akzeptiert werden. Die Tatsache, dass die Regendaten an einem Punkt gemessen wurden und die tatsächliche räumliche Auflösung des Niederschlags nicht berücksichtigen, kann im Hinblick auf die übrigen Unsicherheiten ebenfalls akzeptiert werden. Die zeitliche Auflösung der Regendaten (zehn Minuten) ist für die Lösung der gestellten Aufgabe genügend.

#### Einzugsgebiets-, Abwasser- und Kanalisationsdaten

Die *Einwohnerzahl* kann relativ genau bestimmt werden, deswegen wird bei der Berechnung kein Variationsbereich berücksichtigt. Unsicherheiten in der Prognose der Siedlungsentwicklung können anhand von Szenarien untersucht werden. Die Berechnungen sind für die absehbare Prognose (3400 Einwohner) durchgeführt worden. Der *Abwasseranfall* wurde mit  $250 \text{ l E}^{-1} \text{ d}^{-1}$  bewertet (keine Industrie). Die *Ammoniumfracht* ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) im häuslichen Abwasser beträgt  $6\text{--}8 \text{ g E}^{-1} \text{ d}^{-1}$  (Richtwert aus der EAWAG-Studie Gewässerschutz 2000 [14]). Durch einen höheren Wert können auch die Tagesspitzen berücksichtigt werden. Für die Berechnungen wurde ein Mittelwert  $9 \text{ g E}^{-1} \text{ d}^{-1}$  und der Variationsbereich von  $8\text{--}10 \text{ g E}^{-1} \text{ d}^{-1}$  gewählt.

Für die Berechnung der *Abflussbildung* wurde die Prozentwertmethode [13] verwendet. Deswegen wird neben den Anfangsverlusten auch der Dauerverlust berücksichtigt. Die Anfangsverluste wurden im Hinblick auf die Gelände-

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

topographie (Hanglage) mit 2 mm als obere Grenze der Benetzung und der Muldenverluste festgelegt. Da REBEKA nur den Anfangsverlust als separaten Parameter berücksichtigt, müssen Dauerverluste über eine Reduktion der *befestigten Fläche* berücksichtigt werden. Im Mischsystem (befestigte Fläche: 22 ha, davon 9 ha vorentlastet) beträgt der Reduktionsfaktor 0,9. Im Trennsystem (befestigte Fläche 6 ha) beträgt der Reduktionsfaktor 0,8. Daraus resultiert eine *abflusswirksame Fläche* (19,8 ha im Mischsystem und 4,8 ha im Trennsystem). Im Hinblick auf die Unsicherheiten wurde der Variationsbereich von  $\pm 15\text{--}20\%$  (gleich verteilt) gewählt.

Für die Berechnung der *Abflusskonzentration* (Linearspeichermodell) wurde ein realistischer Wert für Anlaufzeit und Fließzeit in der Kanalisation aus dem Situationsplan geschätzt (20 Min. für Mischsystem, 10 Min. für Trennsystem). Nach Erfahrungen mit Simulationsprogrammen gelten diese Werte in kleineren Kanalisationssystemen als relativ sicher, deswegen wurde für die Berechnung ein Mittelwert verwendet.

Die *Ammoniumkonzentration* ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) im Regenabfluss aus Schweizer Wohngebieten liegt zwischen ca. 0,3–1 mg  $\text{NH}_4\text{-N}/\ell$ . Der gewählte Mittelwert beträgt 0,5 mg  $\text{NH}_4\text{-N}/\ell$ , der Variationsbereich 0,3–1 mg  $\text{NH}_4\text{-N}/\ell$ . Für den *pH-Wert im Mischwasser* (im Modell gleich dem pH-Wert im Regenabfluss aus dem Siedlungsgebiet) wurde ein Variationsbereich aus Literatur [12] gewählt (Mittelwert: 7,5; der gewählte pH-Bereich: 7,0–8,0). Zur Festlegung der *Alkalinität* im Mischwasser (im Modell gleich wie die Alkalinität im Regenabfluss aus Wohngebieten) wurde der Bereich von: 3–4 mmol/ $\ell$  mit dem Mittelwert 3,5 mmol/ $\ell$  gewählt [12].

Das *Volumen des RÜBs Morgental* wurde mit einem Wert (120 m<sup>3</sup>) angegeben. Die *Kapazität der Drosselstrecke* wurde in diesem Falle ebenfalls mit einem Wert 68  $\ell/\text{s}$  (2 QTW) berücksichtigt.

Die gesamte Fläche des *natürlichen Einzugsgebiets* des Rohrbaches bis zum RÜB Morgental beträgt ca. 300 ha. Es handelt sich um ein hügeliges, v. a. landwirtschaftlich und z.T. auch forstwirtschaftlich genutztes Gebiet. Für die Abflussberechnung mussten grobe Annahmen getroffen werden. Abflusswirksame Fläche: 5–10 % der Gesamtfläche, Anfangsverluste: 5–10 mm, Linearspeicherkonstante: 2–3 h. Das verwendete Modell ist sehr einfach, der Abfluss aus dem natürlichen Einzugsgebiet hat in diesem Falle allerdings aufgrund der

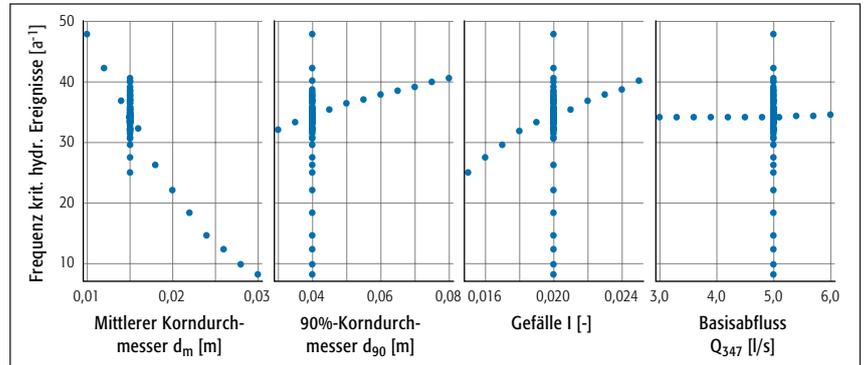


Abb. 3 Abhängigkeit der Frequenz von kritischen Geschiebetriebeereignissen von ausgewählten Vorfluterwerten (z.B. bedeutender Einfluss der mittleren Korngrößenverteilung der Sohle, praktisch kein Einfluss vom Basisabfluss im Vorfluter) aufgrund einer Sensitivitätsanalyse.

Sensitivitätsanalyse keinen besonderen Einfluss auf die Resultate.

### Gewässerdaten

Der *Basisabfluss im Rohrbach* ( $Q_{347}$ ) beträgt nach Durchflussmessungen der EAWAG [6] ca. 5–10  $\ell/\text{s}$ . Die Abflussmessungen der EAWAG im Rohrbach wurden nicht statistisch ausgewertet. Der beobachtete Wert entspricht jedoch dem spezifischen Abfluss bei Niederwasser in dieser topographischen und klimatischen Lage (1,5–2  $\ell \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ ). Im Hinblick auf den wesentlich grösseren Zufluss aus der Kanalisation bei Regenwetter ist dieser Parameter

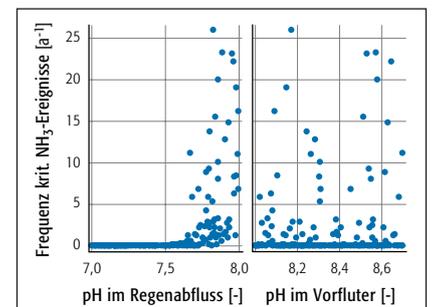


Abb. 4 Frequenz kritischer  $\text{NH}_3$ -Ereignisse in Abhängigkeit des pH-Werts des Mischwassers (links) und des Vorfluters (rechts). Grundlage der Abbildung ist eine «Monte Carlo»-Simulation mit 200 Durchläufen, bei der alle, mit einem Variationsbereich definierten Parameter zufällig variiert wurden. Der pH-Wert im Vorfluter hat einen geringen Einfluss auf das Resultat, während der pH-Wert im Mischwasser das Resultat stark beeinflusst.

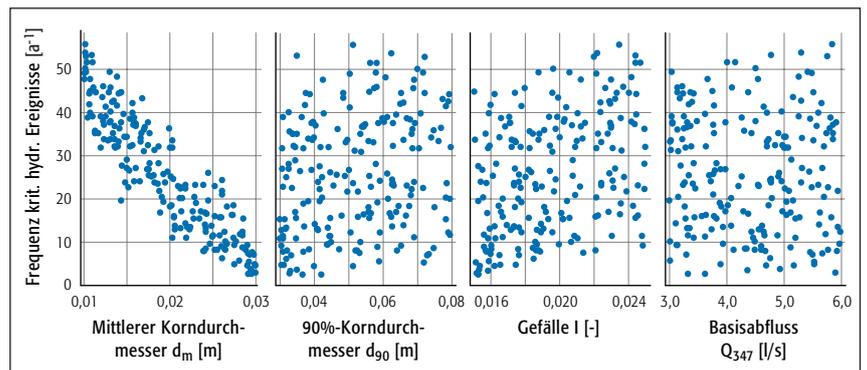


Abb. 5 Gleiche Untersuchung wie in der Abbildung 4: Frequenz kritischer hydraulischer Ereignisse in Abhängigkeit von verschiedenen Vorfluterparameter. Der Basisabfluss  $Q_{347}$  im Vorfluter hat einen geringen Einfluss auf das Resultat, während der mittlere Korndurchmesser  $d_m$  das Resultat stark beeinflusst.

Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

nicht besonders einflussreich. Der angenommene Mittelwert beträgt 5 l/s, der Variationsbereich 3–6 l/s. Für die *Wassertemperatur* im Rohrbach gibt es keine direkt gemessenen Angaben. Es handelt sich um einen Mittelland- bis Voralpenbach mit geringer Wassertiefe bei Trockenwetter, der wenig beschattet ist. Deswegen kann ein starker Einfluss der Lufttemperatur erwartet werden. Die geschätzte mittlere minimale Temperatur  $T_{\min}$  ist 5 °C (3–6 °C), die mittlere maximale Temperatur  $T_{\max}$  ist 20 °C (16–22 °C). Für den *pH-Wert im Rohrbach* gibt es keine systematisch gemessenen Angaben. Im Hinblick auf den geologischen Background, teilweise Eutrophierung, kein Abwasser und auf Untersuchungen in ähnlichen Verhältnissen kann der pH-Wert im Mittel auf 8,2 geschätzt werden [12]. Im Hinblick auf die existierenden Verdünnungsverhältnisse (grosser Mischwasseranteil) ist der Einfluss dieses Parameters klein (Abb. 2). Der geschätzte Mittelwert des pH ist 8,2 der Variationsbereich umfasst 8,0–8,7. Für die *Alkalinität im Rohrbach* gibt es ebenfalls keine gemessenen Angaben. Im Hinblick auf den geologischen Background, kein Abwasser oberhalb der ersten Einleitungen und aufgrund von Untersuchungen bei ähnlichen Verhältnissen kann die Alkalinität auf 3–4 mmol/l geschätzt werden. Diese Werte haben gemäss der Sensitivitätsanalyse keinen bedeutenden Einfluss auf die Resultate. Die *Ammoniumkonzentration im Rohrbach* ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) oberhalb der Kanalisationseinleitungen ist in der Regel sehr tief (kein Abwasser, nur Abschwemmungen aus landwirtschaftlichen Flächen). Die mittlere Konzentration wurde mit einem Wert von 0,2 und der Variationsbereich mit 0,1–0,5 mg  $\text{NH}_4\text{-N}$  festgelegt.

Das Gerinne des Rohrbachs unterhalb des RÜBs Morgental wurde mit Durchschnittswerten aufgrund eigener Untersuchungen charakterisiert. Die mittlere Gerinnebreite beträgt 2,5 m (2–3 m), das mittlere Gefälle beträgt ca. 2% und es variiert zwischen 1,5 und 2,5 %. Der Rauigkeitskoeffizient (Strickler) wurde auf 35  $\text{m}^{1/3}/\text{s}$  geschätzt. Der mittlere Korndurchmesser ( $d_m$ ) der Sohle beträgt nach Linienprobe [12] 0,015 m (0,01–0,03 m) und der 90%-Wert ( $d_{90}$ ) 0,03 m (0,02–0,08 m). Die Böschungsneigung beträgt ca.  $45^\circ = \text{tg } 45^\circ = 1$  (0,9–3).

6.5 Simulation des Ist-Zustandes

Für die Simulation mit REBEKA II wurden 2000 Durchläufe mit jeweils zufällig variierten Daten berechnet. Die Mittelwerte und Variationsbereiche für die einzelnen Parameter wurden wie in Kapitel 6.4 beschrieben gewählt. Jeder Durchlauf mit zufällig variierten Parametern ergibt eine mittlere Anzahl Ereignisse mit Geschiebetrieb und toxischen Ammoniakzuständen. Diese Werte werden der Grösse nach sortiert und jedem Wert wird eine Unterschreitungswahrscheinlichkeit  $p = 1 - m/n$  zugeordnet, wobei n die Anzahl simulierter Durchgänge bedeutet und m den Rang des Durchgangs ( $m = 1$  für den Durchgang mit der höchsten Anzahl kritischer Ereignisse,  $m = 2$  für den Durchgang mit der zweithöchsten Anzahl kritischer Ereignisse etc.).

Als Beispiel für die Resultate sind in der Abbildung 6 diese Unterschreitungswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit der jährlichen Anzahl kritischer Ereignisse aufgetragen. Die resultierende Kurve zeigt folglich die Wahrscheinlichkeit, mit der maximal eine gewisse Anzahl von kritischen Ereignissen pro Jahr eintritt [4]. Die Wahrscheinlichkeit für die Einhaltung der fest-

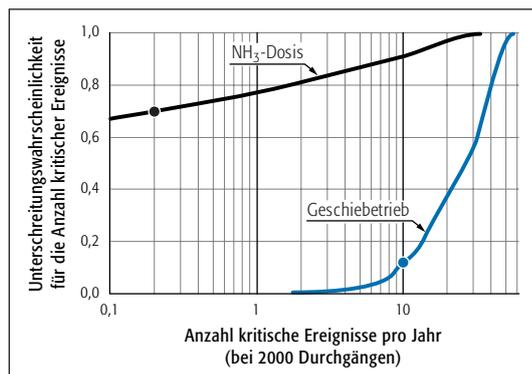


Abb. 6 Unterschreitungswahrscheinlichkeit für die jährliche Anzahl der kritischen  $\text{NH}_3$ - und der mechanisch-hydraulischen Ereignisse. Die Anforderung für kritische  $\text{NH}_3$ -Ereignisse liegt bei  $0,2 \text{ a}^{-1}$ , die für kritische mechanisch-hydraulische Ereignisse bei  $10 \text{ a}^{-1}$ .

gelegten Anforderungen bezüglich  $\text{NH}_3$  für den Ist-Zustand, (für 3400 Einwohner und der Reduktion der Kapazität der Drosselstrecke auf 2  $Q_{\text{TW}}$ ) liegt bei ca. 71%. Die Wahrscheinlichkeit für die Einhaltung der hydraulischen Anforderungen liegt für den Ist-Zustand bei 12%.

6.6 Massnahmen und ihre Leistung

Das Spektrum möglicher Massnahmen zur Reduktion der Beeinträchtigungen des Rohrbaches ist relativ klein. Die vorgeschlagenen Massnahmen sind in Tabelle 3 aufgelistet. Im Hinblick auf die beschränkten Möglichkeiten von Massnahmen werden im weiteren Planungsvorgehen nur mehrere Ausbauvarianten des bestehenden Regenüberlaufbeckens Morgental untersucht: Das bestehende Durchlaufbecken von 120  $\text{m}^3$  Nutzvolumen wird vergrössert (bei gleichzeitiger Reduktion der Kapazität der Drosselstrecke auf 68 l/s): Die Ausbauvariante auf 285  $\text{m}^3$  Nutzvolumen wurde durch die Generelle Entwässerungsplanung im Jahre 1996 [8] empfohlen. Die Ausbauvariante auf 520  $\text{m}^3$  Nutzvolumen entspricht der Dimensionierungspraxis nach AfU, 1977. Der Ausbau auf ein Retentionsvolumen von 1320  $\text{m}^3$  entspricht dem GEP-Vorschlag aus dem Jahre 1996 zur möglichen Reduktion der hydraulischen Belastung [8]. Die Leistungen der untersuchten Massnahmenvarianten sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Die Leistungen der vorgeschlagenen Massnahmen in Tabelle 4 deuten darauf hin, dass der Bau von Speichervolumen ungeeignet ist, die hydraulischen Probleme im Rohrbach zu lösen. Deshalb wurden Massnahmen am Vor-

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

fluter selber in Betracht gezogen und berechnet. Diese Massnahmen stellen eine Gefälleverminderung (Einbau von Schwellen) und die Stabilisierung der Gewässersohle im Bereich der Abwassereinleitung dar, die im Modell mit einer veränderten Korngrößenverteilung berücksichtigt wurde. Diese Variante wurde in erster Linie zur Demonstration der unterschiedlichen Wirkungen verschiedener Massnahmen eingeführt und muss hinsichtlich Realisierbarkeit noch näher untersucht werden.

### 6.7 Kosten der ausgewählten Massnahmen

Die *Investitionskosten* für den Ausbau des bestehenden RÜB wurden anhand einer vereinfachten Projektierung und Baukalkulation für die oben erwähnten Ausbauvarianten ermittelt (z.T. offene Becken). Die detaillierten Angaben zur Baukalkulation sind in [10] publiziert. Aus diesen Angaben konnten für den Fall Russikon einfache Kostenfunktionen ermittelt werden (Abb. 7). Die *Betriebskosten* wurden anhand von Betriebsangaben (Personal, Energie und Material) aus ähnlichen Anlagen ermittelt. Sie liegen zwischen CHF 4000.– pro Jahr (für Nutzvolumen von 120 m<sup>3</sup>) und CHF 12 000.– pro Jahr (für Nutzvolumen von 1320 m<sup>3</sup>).

Die *Jahreskosten* (Abb. 8) stellen üblicherweise die Basis für die meisten Kosten- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen dar. In diesem Beispiel wurde für die Ermittlung der Jahreskosten die Lebensdauer von Bauteilen auf 40 Jahre und von Maschinenteilen auf 15 Jahre geschätzt. Bei Realzins von 2% ergibt sich ein Diskontierungsfaktor von 27,62 % für Bauteile und 12,97 % für Maschinenteile [15]. Die Kapitalkosten in diesem Beispiel liegen zwischen CHF 12 000.– pro Jahr (Nutzvolumen von 120 m<sup>3</sup>) und CHF 35 000.– pro Jahr (Nutzvolumen 1320 m<sup>3</sup>), die Jahreskosten liegen zwischen CHF 16 000.– pro Jahr (Nutzvolumen von 120 m<sup>3</sup>) und CHF 47 000.– pro Jahr (Nutzvolumen 1320 m<sup>3</sup>).

## 7. Diskussion und Interpretation der Resultate

### 7.1 Akute NH<sub>3</sub>-Probleme

Sowohl die Resultate der deterministischen Berechnung (Screening) als auch der stochastisch-probabilistischen Simulation deuten darauf hin, dass im Rohrbach keine NH<sub>3</sub>-Probleme auftreten. Deterministisch gerechnet ergibt sich für alle Varianten für kritische NH<sub>3</sub>-Ereignisse eine Frequenz von 0 a<sup>-1</sup>. Bei der stochastisch-

Massnahme	Einsatzmöglichkeiten in Russikon	Kommentar
Retention in einem Becken	Machbar	Die bedeutendsten Einleitungen bei Regenwetter sind die RÜs und das RÜB Morgental. Im Bereich des bestehenden Beckens gibt es genug Raum für dessen Vergrösserung (Vorschlag GEP)
Speicherung in der Kanalisation	Ungeeignet	Steile, relativ kleine Kanäle, kein aktivierbares Retentionsvolumen
Versickerung	Ungeeignet	Steile Hanglage, schlecht durchlässiger Untergrund
Nutzung des Regenwassers und evtl. Dachbegrünung	Längerfristig geeignet	Viele Einfamilienhäuser und Gärten, allerdings kurzfristig nicht in grösserer Masse realisierbar
Massnahmen im Rohrbach	Zu prüfen	Eingeschränkte Raumverhältnisse im Siedlungsbereich

Tab. 3 Massnahmen und deren Einsatzmöglichkeiten in Russikon.

Nutzvolumen der Regenüberlaufbecken	Wahrscheinlichkeit der Einhaltung von Anforderungen bezüglich:	
	NH <sub>3</sub> -Toxizität	Mech.-hydraul. Belastung
120 m <sup>3</sup>	0,71	0,12
285 m <sup>3</sup>	0,76	0,13
520 m <sup>3</sup>	0,82	0,17
1320 m <sup>3</sup>	0,93	0,32

Tab. 4 Leistungen der untersuchten Massnahmenvarianten in Russikon.

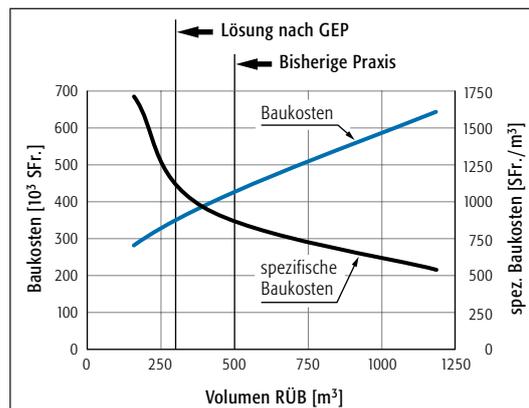


Abb. 7 Investitionskosten in Abhängigkeit vom Volumen des RÜBs Morgental (Erweiterung des bestehenden Beckens).

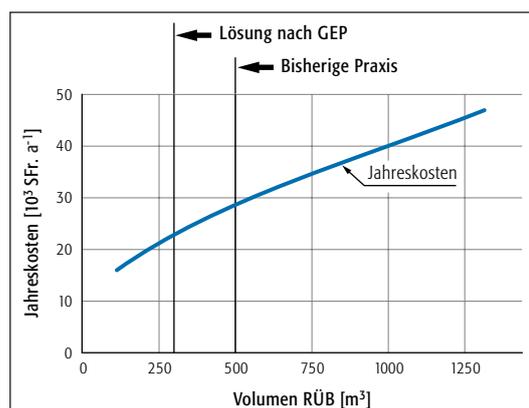


Abb. 8 Die Jahreskosten (Kapital- und Betriebskosten) in Abhängigkeit des Volumens des RÜBs Morgental (Erweiterung des bestehenden Beckens).

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

probabilistischen Simulation liegen die Wahrscheinlichkeiten, mit der die Anforderungen an die Einleitung eingehalten werden, in einem Bereich von 0,71–0,94. Im Zusammenhang mit der Situationsanalyse können  $\text{NH}_3$ -Probleme im Rohrbach mit grosser Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.

### 7.2 Mechanisch-hydraulische Probleme

Sowohl die Situationsanalyse als auch die Berechnungen mit deterministischer und stochastisch-probabilistischer Simulation weisen deutlich auf mechanisch-hydraulische Probleme im Rohrbach hin. Im Ist-Zustand treten kritische Ereignisse (Geschiebetrieb) mit einer berechneten Frequenz von  $34 \text{ a}^{-1}$  auf, die Wahrscheinlichkeit der Einhaltung der Anforderungen ( $10 \text{ a}^{-1}$ ) liegt bei 0,12. Eine Erweiterung des Speichervolumens auf  $285 \text{ m}^3$  ergibt die Resultate  $30 \text{ a}^{-1}$  (deterministische Simulation) und 0,13 (stochastisch-probabilistische Simulation),  $520 \text{ m}^3$  ergibt  $26 \text{ a}^{-1}$  und 0,17 und  $1320 \text{ m}^3$  ergibt  $18 \text{ a}^{-1}$  und 0,32.

Die Resultate der Berechnung verdeutlichen, dass die mechanisch-hydraulischen Probleme im Rohrbach mit herkömmlichen Massnahmen, wie Bau von Speichervolumen, nicht oder nur mit *unverhältnismässig* grossem Aufwand gelöst werden können (Abb. 9). Deshalb wurde in diesem Beispiel auch die Wirkung von Massnahmen im Vorfluter selber geprüft. Durch diese Massnahmen werden die mechanisch-hydraulischen Probleme im Rohrbach mit wesentlich grösserer Wahrscheinlichkeit gelöst (Abb. 10).

### 7.3 Interpretation der stochastisch-probabilistischen Berechnungsergebnisse

In der stochastisch-probabilistischen Planung sind die Kurven, in denen

die Unterschreitungswahrscheinlichkeiten gegen die Frequenzen kritischer Ereignisse aufgetragen ist (Abb. 6 u. 10), die Entscheidungsgrundlage. Deshalb ist der richtigen Interpretation dieser Kurve grosse Aufmerksamkeit zu schenken.

Ein zentraler Punkt ist die Steigung dieser Kurven. In Abbildung 10 ist im Ist-Zustand (Beckenvolumen =  $120 \text{ m}^3$ ) die Steigung sehr flach. In diesem Fall liegen ca. 95 % der Resultate zwischen 5 und 50 Geschiebetriebsereignissen pro Jahr. Welche Frequenz kritischer Ereignisse in der Realität anzutreffen ist, ist kaum vorhersagbar. Es ist sehr unsicher, einen Entscheid aufgrund einer so flachen Kurve zu fällen.

Aus einer steilen Kurve, wie z.B. jener für Massnahmen im Vorfluter (Abb. 10), kann geschlossen werden, dass die Anzahl kritischer Ereignisse in einem relativ schmalen Bereich liegt. Es kann mit grosser Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass die Anzahl kritischer Ereignisse nach Massnahmen am Vorfluter kleiner ist als  $10 \text{ a}^{-1}$ . Dies erleichtert die Entscheidungsfindung, die ja auf einer Risikoabschätzung beruht [4], massgeblich. Aus diesen Ausführungen wird Folgendes ersichtlich: Wenn die be-

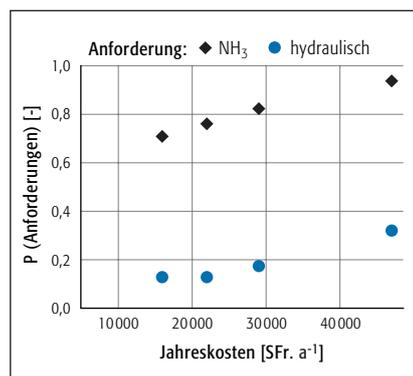


Abb. 9 Leistungen und Kosten von untersuchten Varianten mit herkömmlichen Massnahmen.

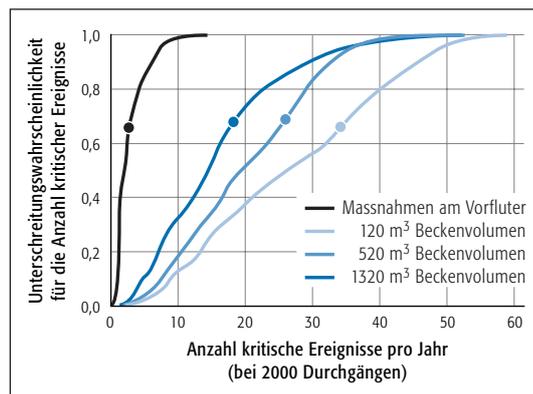


Abb. 10 Unterschreitungswahrscheinlichkeit für die jährliche Anzahl der kritischen mechanisch-hydraulischen Ereignisse (Anforderung =  $10 \text{ a}^{-1}$ ). Die Resultate der deterministischen Simulation sind durch die Punkte dargestellt.

rechneten Frequenzen kritischer Ereignisse in einem schmalen Bereich liegen, d.h. die Kurve der Beziehung *Unterschreitungswahrscheinlichkeit vs. Anzahl kritischer Ereignisse* steil ist, vereinfacht dies die Entscheidungsfindung massgeblich. Steile Kurven repräsentieren kleinere Unsicherheiten in der Wirkung von Massnahmen.

### 8. Folgerungen

Das hier vorgestellte Beispiel zeigt, dass im Vergleich zur existierenden Praxis die hier vorgeschlagene stochastisch-probabilistische Planungsmethode eine grössere Einsicht in die tatsächliche Problematik ermöglicht. Dadurch wird ein Gefühl für Unsicherheiten in der Modellierung und Simulation des Systems «Siedlungsentwässerung» vermittelt und das Systemverständnis gefördert. Davon versprechen wir uns längerfristig gewässer- und problem-spezifischere, d. h. effizientere Lösungen als dies mit den bisherigen Planungsgrundlagen der Fall war.

Der Arbeitsaufwand, der mit dieser Art der Massnahmenplanung verbunden ist, ist zwar grösser, aber bei genügenden Kenntnissen und Erfahrungen des Projektverfassers vertretbar. Die grösste Schwierigkeit bei dieser Planungsart stellt die Interpretation der Resultate im Hinblick auf die Auswahl von geeigneten Massnahmen dar. Insbesondere dort, wo «flache» Leistungs-Kosten-Funktionen resultieren, muss eine besonders sorgfältige Interpretation der berechneten Resultate erfolgen.

Eine Empfehlung, in welchem Wahrscheinlichkeitsbereich die Erfüllung der Anforder-

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

rungen liegen sollten, kann nicht gemacht werden. Momentan fehlen die entsprechenden Kenntnisse und Erfahrungen für eine zuverlässige Aussage. Allerdings werden mit zunehmender Anwendung Erfahrungen gewonnen, die die künftige Planung verbessern und erleichtern.

## Literaturverzeichnis

- [1] *Krejci V., Rossi L., Kreikenbaum S. und Fankhauser R. (2004)*: Einführung in das Projekt; in: Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter, Gas-Wasser-Abwasser, Nr. 6, p. 419–422.
- [2] *Krejci V. und Kreikenbaum S. (2004)*: Konzepte des Gewässerschutzes; in: Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter, Gas-Wasser-Abwasser, Nr. 6, p. 423–430.
- [3] *Rossi L., Krejci V. und Kreikenbaum S. (2004)*: Anforderungen an die Abwassereinleitungen; in: Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter, Gas-Wasser-Abwasser, Nr. 6, p. 431–438.
- [4] *Kreikenbaum S., Rauch W., Krejci V. und Fankhauser R. (2004)*: Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Planung; in: Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter, Gas-Wasser-Abwasser, Nr. 8, p. 587–594.
- [5] *Fankhauser R., Kreikenbaum S., Rossi L. und Rauch W. (2004)*: Simulationsmodell REBEKA II; in: Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter, Gas-Wasser-Abwasser, Nr. 11 (in Vorbereitung).
- [6] *Krejci V., Fankhauser R., Gammeter S., Grottker M., Harmuth B., Merz P. und Schilling W. (1994)*: Integrierte Siedlungsentwässerung, Fallstudie Fehrltorf, ISBN: 3-906484-09-2, EAWAG Dübendorf.
- [7] *Gammeter, S. (1996)*: Einfluss der Siedlungsentwässerung auf die Invertebraten-Zönose kleiner Fliessgewässer, Diss. ETH Zürich Nr. 11673.
- [8] *GEP Russikon (1996)*: Genereller Entwässerungsplan für die Gemeinde Russikon/ZH 1996, Ingenieurbüro Messmer und Schindler Uster.
- [9] *Frutiger A., Engler U., Gammeter S., Lüdi R., Meier W., Suter K. und Walsler R. (2002)*: Zustandsbericht Gewässer – Teil Gewässerschutz, Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute, Zürich.
- [10] *EAWAG-Peak-Kurs (2001)*: Der GEP-Zustandsbericht Gewässer, EAWAG PEAK A14/00 27.–29. Juni 2000.
- [11] *AWEL ZH*: Ökomorphologie der öffentlichen Gewässer – Angaben über die ökomorphologische Klassifizierung der Abschnitte (persönliche Mitteilungen von Dr. W. Meier, AWEL/ZH).
- [12] *Rauch W., Krejci V. und Gujer W. (2002)*: REBEKA: Ein Simulationsprogramm zur Abschätzung der Beeinträchtigung der Fliessgewässer durch Abwassereinleitungen aus der Siedlungsentwässerung bei Regenwetter, Schriftenreihe der EAWAG Nr. 16, ISBN: 3-906484-22-X, EAWAG Dübendorf.
- [13] *Lehrmittel ETH (2002)*: Grundlagen der Siedlungsentwässerung, Autoren: Rahel Gilg, Willi Gujer, Peter Krebs, Simon Kreikenbaum, Marc Neumann, Christoph Ort und Wolfgang Rauch. Vorläufige Ausgabe als Skript für die entsprechenden Vorlesungen an der ETH Zürich, TU Dresden und Universität Innsbruck, Stand April 2002.
- [14] *Krejci V., Conrad Th. und Koblet R. (1984)*: Natürliche und zivilisatorische Verunreinigungsquellen, Gas-Wasser-Abwasser, Sonderdruck Nr. 872. p.760–766.
- [15] *Munz W. (1985)*: Methodik der Kostenvergleiche, EAWAG Dübendorf.

## Keywords

Mischwasserüberläufe – NH<sub>3</sub>-Belastung – mechanisch-hydraulische Belastung – Planung von Massnahmen

## Adresse der Autoren

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

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

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