

# Verwendung von Emulatoren in der Stadtentwässerung

David Machac<sup>1,2)</sup>, Peter Reichert<sup>1,2)</sup> und Carlo Albert<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Eawag: Das Wasserforschungs-Institut des ETH-Bereichs, Systemanalyse und Modellierung, 8600 Dübendorf, Schweiz, david.machac@eawag.ch

<sup>2)</sup>ETH Zürich, Departement Umweltsystemwissenschaften, 8092 Zürich, Schweiz

## Kurzfassung

Emulation ist eine Methode, die ersetzt einen langsamen Simulator mit seiner stochastischen Approximation, die auf einer kleinen Menge Rechenläufe des Simulators basiert. Diese Approximation ist dann um Größenordnungen schneller als der ursprüngliche Simulator. Unser neues Vorgehen, der Mechanistische Emulator, benutzt unsere Kenntnis über die Mechanismen des Modells im Zusatz zu der Rechenläufe des Simulators. In dieser Arbeit, wir den Emulator auf einem realen Fallbeispiel anwenden und untersuchen seinen Zeitgewinn im Vergleich zu dem Simulator.

## Emulatoren

In der Ingenieurgenpraxis begegnen wir manchmal Situationen, in welcher wir ein Simulator berechnen müssen mehrmals als unsere Rechenkapazität erlaubt. Solche Fälle sind z.B. Kalibration oder Sensitivitätsanalyse des Simulators. In diese Situationen wollen wir ein Ersatzmodell, der *Emulator* genannt wird.

Emulation ist eine statistische Technik, die verwendet wird, um Ersatz-Modelle für komplexe und rechenintensive Simulationsmodelle (auch: Simulator) zu konstruieren. Diese Technik ist vor allem nützlich, wenn

1. wir viele iterative Berechnungen des Simulators brauchen und
2. die Berechnungen lange dauern.

In der Siedlungsentwässerung ist das z.B. der Fall für Langzeit-Simulationen mit aufwendigen hydrodynamischen Modellen, oder System-Analyse Techniken wie Sensitivitätsanalyse oder die Parameterschätzung mit komplexen Modellen. Die grundlegende Idee ist dabei, dass der Emulator die wesentlichen Charakteristiken des Simulators *emuliert*. Dazu werden zuerst einige Rechenläufe des Simulators mit unterschiedlichen Parameter-Werten durchgeführt und die Ergebnisse abgespeichert. In einem zweiten Schritt wird der Emulator dann anhand dieser Ergebnisse konditioniert. Die rechenintensive Konditionierung muss nur einmal durchgeführt werden.

Da der Emulator die Rechenergebnisse des Simulators nur für die durchgeführten Rechenläufe exakt reproduziert, die Ergebnisse für alle anderen Parameterkombinationen lediglich aus der vorhandenen Information interpoliert, ist ein Emulator im wesentlichen eine stochastische Approximation eines Simulators. Der große Vorteil ist, dass die Abfluss-Berechnungen mit einem Emulator extrem schnell sind.

Die Genauigkeit eines Emulators steigt mit der Anzahl der Parameterkombinationen für die Rechenläufe zur Konditionierung durchgeführt werden. Da diese im Einzelfall wiederum sehr rechenintensiv sein können, ist die Konditionierung letztendlich immer eine Abwägung von Rechenzeit und Unsicherheit der Berechnungsergebnisse.

In Bezug auf die Arten von Emulatoren werden in der (Umwelt)Modellierung bis jetzt vor allem rein statistische Emulatoren benutzt, die auf Gaußsche Prozessen beruhen. Diese Art der Emulatoren benutzt als einzige Informationsquelle über den Simulator die vorher durchgeführten Rechenläufe. Da der Analyst in den meisten Fällen weitergehende Information über die zugrundeliegenden natürlichen Prozesse, sowie über die

implementierten Modellgleichungen des Simulators hat, scheint es vorteilhaft, dieses Wissen auch zur Konstruktion des Emulators zu verwenden. Diese Art der Emulatoren werden als *mechanistische Emulatoren* bezeichnet.

Für die mechanistische Emulatoren ist es nützlich ein lineares Modell zu bauen in welchem wird unsere Kenntnis über den Simulator inbegriffen. Z.b in dem Fall des SWMMs bedeutet das Linearisierung von die nichtlinearen Saint Venant Gleichungen, die der Wasserablauf beschreiben.

Ein mechanistischer Emulator ist dann die Superposition des Gaußsche Prozess und des linearen Modells, der bringt die Kenntnis über einen Simulator. Der Mittelwert des folgende Gaußsche Prozess ist dann die Ergebnis des Emulators

$$\frac{\partial \xi}{\partial t}(t, x) = F(t, x, \partial_x, \theta) \xi(t, x) + b(t, x, \theta) + C(\theta) \eta(t, x), \quad (1)$$

wo  $\xi$  ist der Zustand des Modells (z.b. der Querschnitt des Ablaufs),  $t$  resp.  $x$  ist der zeit resp. die Position,  $\theta$  sind die Parameter in Beziehung zu denen wir Emulieren und  $F$  und  $b$  repräsentieren den linearen Modell. Den letzten Ausdruck repräsentiert weißes Rauschen, die an die vorherige Rechenläufe konditioniert ist.

## Anwendung

In diesem Beitrag beschreiben wir, wie diese Technik erfolgreich angewendet wird, um ein hydrodynamisches Kanalnetz zu emulieren, dass im Simulator SWMM implementiert ist. Als Fallbeispiel benutzen wir den Emulator zur Kalibration des Modells, wo wir eine große Anzahl von Simulationen für die Parameterschätzung benötigen.

Ein Rechenlauf des SWMM-Simulators für unseren 162 ha groß Einzugsgebiet, der sich im Adliswil, Schweiz findet, mit 460 Kanäle, 244 Subgebiete und ein 100-minuten dauernde Regenereignis mittlerer Intensität [Abbildung 1] dauert ungefähr 2 Sekunden. Dahingegen benötigt der Emulator Lauf dauert weniger als 1/1000 Sekunde, um den resultierenden Abfluss zu modellieren [Abbildung 2]. Das demonstriert die Anwendbarkeit von Emulatoren als Ersatz zu Siedlungsentwässerung Simulatoren.

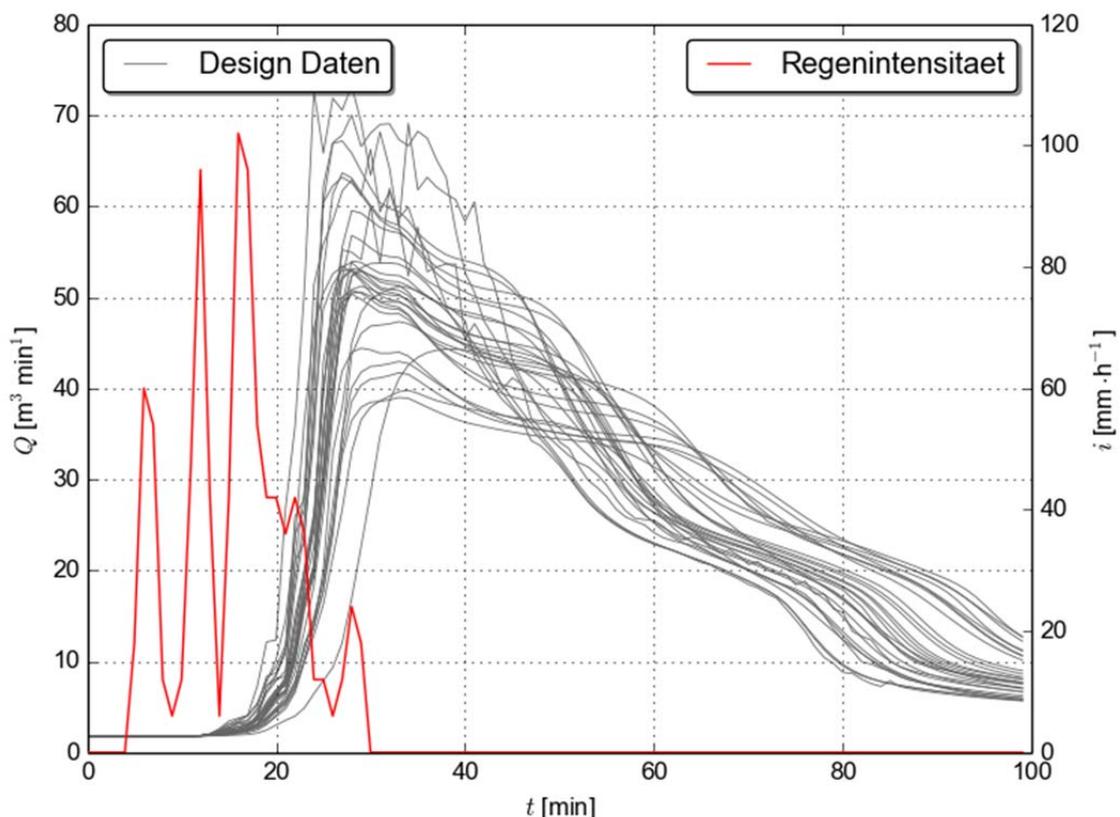


Abbildung 1: Regenereignis und 30 SWMM Rechenläufe für unterschiedliche Parameterwerten.

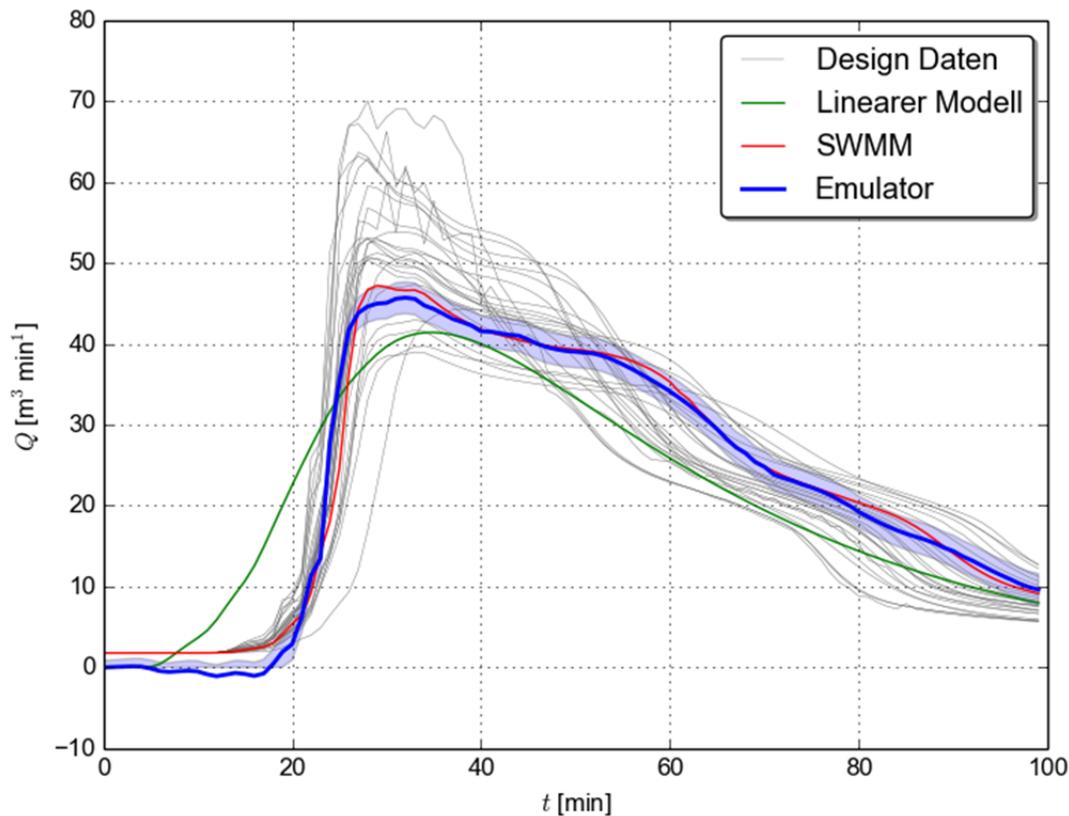


Abbildung 2: Diese Figur zeigt unterschiedliche Ergebnisse zwischen dem Simulator, dem Emulator und dem Linear Model an. Weiter ist das 95% Konfidenzintervall für den Emulator angezeigt.

## Anerkennungen

Wir danken Dr. Jörg Rieckermann (Eawag), Leiter des COMCORDE Projekts für die Unterstützung, und Andreas Scheidegger (Eawag) für nützliche Bemerkungen. Der COMCORDE Projekt wird finanziert bei dem Schweizerischer Nationalfonds.

## Literatur

### References

**Albert, C. (2012).** *A mechanistic dynamic emulator*, *Nonlinear Analysis: Real World Applications* 13 : 2747 - 2754.

**Conti, S. and O'Hagan, A. (2010).** *Bayesian emulation of complex multi-output and dynamic computer models*, *Journal of Statistical Planning and Inference* 140 : 640-651.

**Reichert, P.; White, G.; Bayarri, M. J. and Pitman, E. B. (2011).** *Mechanism-based emulation of dynamic simulation models: Concept and application in hydrology*, *Computational Statistics & Data Analysis* 55 : 1638-1655.