

## Vorhersage der Mecoprop-Dynamik im urbanen Regenwasserabfluss mit einem gekoppelten prozess-basierten Schmutzfrachtmodell

J.R. Devasia-Metzger<sup>1</sup>, J.Rieckermann<sup>2</sup>, C. Ort<sup>2</sup>, M. Burkhardt<sup>1</sup>

<sup>1</sup> HSR Hochschule für Technik Rapperswil, Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik (UMTEC),  
Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil, Schweiz

<sup>2</sup> Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz  
(Eawag), Überlandstrasse 133, CH-8600 Dübendorf

### Kurzfassung:

Bei Regenwetter werden viele potenziell toxische Schadstoffe aus Aussenhüllen von Gebäuden ausgewaschen und in die Gewässer eingetragen. Unklar ist allerdings, ob einfache lineare Auswaschfunktionen für Mikroschadstoffe aus Gebäudehüllen für Schmutzfrachtsimulationen ausreichend sind. Um Auswaschungen aus berechneten Gebäudehüllen dynamisch zu berechnen, wurde das „Construction Material LEaching Model“ (COMLEAM) entwickelt, mit dem Mikroverunreinigungen prozess-basiert beschrieben werden. COMLEAM berücksichtigt allerdings keine Transportprozesse in der Siedlungsentwässerung, so dass es bislang nicht möglich ist, Umwelteinflüsse von Gebäudehüllen abzubilden. In dieser Studie wurde daher COMLEAM an das hydrodynamische Niederschlags-Abfluss Modell SWMM gekoppelt. Insbesondere wurden die Unterschiede von dynamischen und linearen Auswaschmodellen untersucht. Für die Verknüpfung der Modelle wurde eine neue Schnittstelle für COMLEAM programmiert, die sowohl einen Export von SWMM-kompatiblen Schmutzfracht-Zeitreihen, als auch Batch-Simulationen ermöglicht. Die Ergebnisse für eine Fallstudie in Fehraltorf (CH), wo Schmutzfrachten und Konzentrationen des Durchwurzelungsschutzmittels Mecoprop vorhergesagt wurden, zeigen grundsätzlich eine befriedigende Übereinstimmung mit zeitlich hochaufgelösten Daten aus einer Messkampagne. Langzeitprognosen mit dem dynamischen COMLEAM Modell liefern in unserem Fall signifikant unterschiedliche Ergebnisse als lineare Auswaschfunktionen. Allerdings sind diese Unterschiede, in unserem Fallbeispiel, ab einem Gebäudealter von 10 Jahren allerdings vernachlässigbar. Sensitivitätsanalyse deuten weiterhin darauf hin, dass Informationen zum Gebäudebestand, und insbesondere das Alter der Gebäude, sehr sensitiv auf die Simulationsresultate sind.

**Key-Words:** COMLEAM, DIMES 2, Mikroschadstoffe, Auswaschungsfunktion, Mecoprop

### 1. Schmutzfracht-Modelle vereinfachen die Auswaschung und Auswasch-Modelle den Schmutzfracht-Transport

Bei Regen werden viele biologisch aktive Schadstoffe aus Aussenhüllen von Gebäuden vom Niederschlagswasser ausgewaschen und in die Gewässer eingetragen (Wittmer et al. 2011; Burkhardt, Junghans, et al. 2009). Dabei zeigen verschiedene Untersuchungen, dass vor allem durch Biozide akute und chronische Qualitätskriterien überschritten werden. Ein Grund dafür ist, dass viele Einleitungen aus Trenn- und Mischsystem in kleinen Fliessgewässern nur gering verdünnt werden (Walser et al. 2008; Burkhardt, Zuleeg, et al. 2009).

Wenig untersucht wurden bislang potentielle Gewässerbelastungen durch ausgewaschene Biozide aus Gebäudehüllen. Diese können durch Regen mobilisiert werden und über die Regenwasserkanalisation oder Mischwasserentlastungen in Gewässer eingetragen werden. Da Laboruntersuchungen von Mikroverunreinigungen sehr aufwändig und teuer sind, werden typischerweise Modelle zur Risikoabschätzung herangezogen. Herkömmliche Ansätze verwenden dafür jedoch lineare regenabhängige Auswaschungsfunktionen für die Mikroschadstoffe (Charbeneau, Barrett und Michael 1998), was nach bisherigen Erkenntnissen eine grobe Vereinfachung darstellt (Abb. 1). Um verlässlichere Prognosen aufzustellen wurde daher das „Construction Material LEAching Model“ (COMLEAM) entwickelt (Rohr, Tietje, and Burkhardt 2018), welches den Transportpfad vom berechneten Bauteil bis zum Umweltkompartiment mit detaillierten Prozessen in den vier Modulen i) Geometrie, ii) Baumaterial, iii) Emissionen und iv) Wetter beschreibt. Allerdings berücksichtigt COMLEAM keine Transportprozesse in der Kanalisation, so dass es zur Zeit nicht möglich ist, wichtig urbanhydrologische Prozess realistisch abzubilden, wie z.B. Verdünnungseffekte durch nicht verschmutztes Regenabwasser, oder die Abflachung von Konzentrationsspitzen während des Abflusstransportes. Diese lassen sich wiederum mit dem hydrodynamischen Kanalnetz-Modell SWMM (US EPA 2015) beschreiben, das als quelloffene Version verfügbar ist.

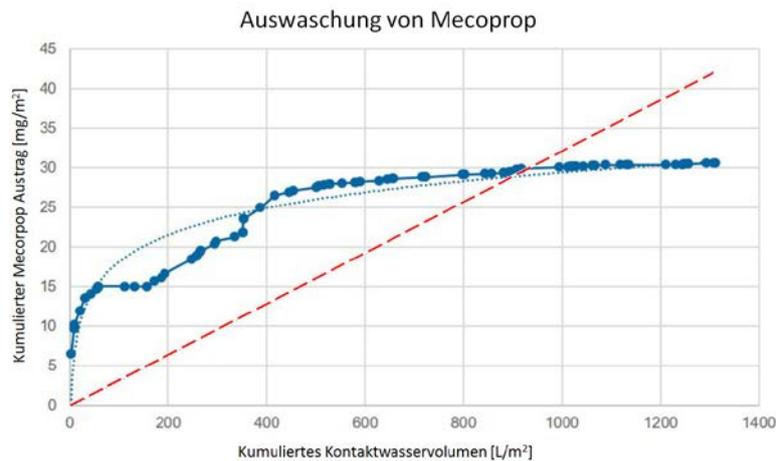


Abbildung 1: Vergleich der gemessenen Auswasch-Charakteristik des Durchwurzelungsschutzmittels Mecoprop (aus Hübner et al. 2018) (blaue Punkte) mit einem linearen Modell (rot gestrichelt) und einem logarithmischen Modell (gepunktete Linie). Das stark vereinfachende lineare Modell entspricht der typischen ingenieurmässigen Annahme von mittleren Schadstoff-Konzentrationen im Regenwasser, wobei das logarithmische aus dem im COMLEAM implementierten Ansatz resultiert.

Das Ziel dieser Arbeit war deshalb, COMLEAM mit SWMM zu koppeln (Abbildung 1), um eine realistische Ausbreitung der ausgewaschenen Schadstoffe im Kanalnetz zu erreichen. Dazu wurde für COMLEAM ein neues API in *Python* entwickelt und die von COMLEAM Auswasch-Dynamik als Zeitreihe in SWMM eingelesen. Die Vorhersagen des detaillierten gekoppelten Modells wurden anschliessend mit zeitlich hochaufgelösten Messdaten aus einer Fallstudie in Fehraltorf (CH) verglichen.

## 2. Mecoprop als Modellsubstanz ermöglicht definierte Randbedingungen für eine hoch aufgelöste Schmutzfrachtvorhersage

Für den Vergleich der herkömmlichen SWMM-Ansätze mit dem prozessbasierten COMLEAM-Modell wurde das Durchwurzelungsschutzmittel Mecoprop als Modellsubstanz gewählt, da es in Gebäuden

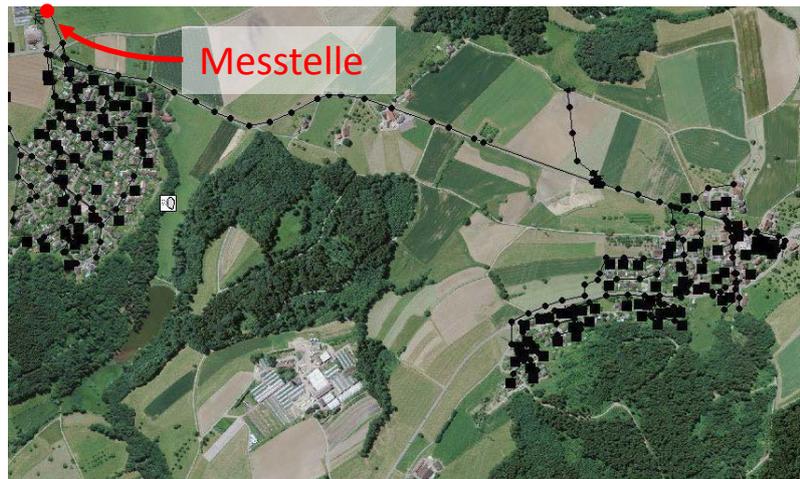


Abbildung 2: SWMM Modell des Untersuchungsgebiets in Rumlikon/Fehraltorf (CH), mit der verwendeten Messstelle des DIMES II Projektes (Mutzner 2019).

als Wurzelschutzmittel für begrünte Flachdächer eingesetzt wird. So konnte das COMLEAM Modell auf eine einzige Quelle, nämlich die Dachkomponente von Flachdächern reduziert werden.

Als Abwassersystem wurde ein Teileinzugsgebiet der ARA Fehraltorf-Russikon ausgewählt. Das Teileinzugsgebiet beinhaltet das Dorf Rumlikon und die Weiherholzüberbauung (Abbildung 2). Für dieses liegen im Untersuchungsgebiet in Rumlikon/Fehraltorf (CH) aus dem DIMES 2 Projekt (Mutzner 2019) Messdaten mit einer zeitlichen Auflösung von 20 min vor.

Das bereits vorhandene hydrodynamische SWMM Modell wurde von der Eawag zur Verfügung gestellt. Die Abflussvorhersage basiert auf lokalen Regendaten aus einem aktuellen Messprojekt (Blumensaat et al. 2017), wobei es anhand der versiegelten Fläche an Abflussmessdaten angepasst wurde. Da es den Niederschlagsabfluss allgemein realistisch abbildete, war eine weitergehende Kalibration des Modells nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

### 3. Eine einfache Anwenderschnittstelle koppelt COMLEAM mit pySWMM

Um Batch-Simulationen der gekoppelten Modelle zu ermöglichen, z.B. für Sensitivitätsanalysen und Schätzung der Modellparameter wurde eine neue Schnittstelle (API) für den Rechen-Server des COMLEAM in *Python* entwickelt (Devasia-Metzger 2019). Da COMLEAM serverbasiert rechnet, wurde via *JSON*-strings mit dem Rechenserver kommuniziert. Die Simulationsergebnisse wurden aus der relativ komplexen Datenbank via *SQL* Syntax ausgelesen. Die Ausgabe von SWMM-kompatiblen Zeitreihen erforderte dabei vor allem ein Zusammenführen von mehreren Tabellen. Die Erarbeitung der COMLEAM API war das Kernstück dieser Arbeit und erforderte grossen Zeitaufwand. Die API wurde mit folgenden Basisfunktionen ausgestattet:

- Variieren der Gebäudegeometrien, wie z.B. Länge, Breite, Höhe, Ausrichtung
- Verändern der Simulationsparameter, u.a. Baumaterial, Emission und Wetter (Details siehe Abbildung 3)
- Starten und kontrollieren der Simulation
- Auslesen der Ergebnisse aus der komplexen COMLEAM Datenbank
- Speichern und darstellen der Ergebnisse

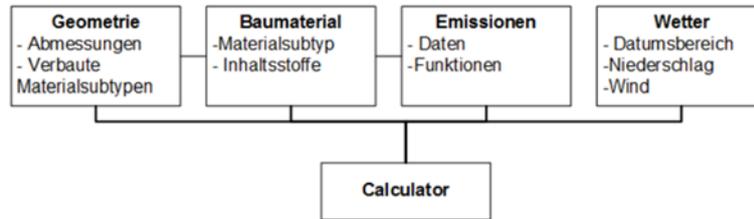


Abbildung 3: Modulstruktur in COMLEAM (Rohr 2018).

Für die Kopplung mittels Python wurde die *pyswmm* Bibliothek ausgewählt, die programmatischen Zugriff auf Simulationsparameter, interne Variablen und Ergebnis-files erlaubt. Zusätzlich zum COMLEAM API wurde für die *pyswmm*-Implementation ausserdem ein parser für das SWMM-reporting file geschrieben, der das automatisierte Auslesen der Schmutzstoff-Konzentrationen ermöglicht. Zusätzlich wurden die Ergebnisse aus der COMLEAM Simulation in das SWMM Modell integriert, indem die dynamischen Zeitreihen als ASCII Files eingelesen wurden.

Um zu garantieren, dass die SWMM Simulation erst gestartet wird, wenn die COMLEAM Ergebnisse vorliegen, wurde das SWMM-Skript mit einer Statusabfrage der COMLEAM Simulation erweitert, welche sicherstellt, dass die COMLEAM Kalkulation abgeschlossen ist.

Das SWMM-Modell wurde anhand vorhandenen Durchflussmessdaten angepasst. Dabei wurde vereinfacht die Befestigungsgrade der Einzugsflächen angepasst, bis eine Übereinstimmung, für das Regenereignis der DIMES 2 Messreihe, eintraf. Dabei wurde als Hauptkriterium der Spitzendurchfluss und seine zeitliche Übereinstimmung mit den Messdaten ausgewählt (Abbildung 4). Für die restliche Zeitspanne genügte für unseren Zweck ein visueller Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messdaten.

In einem zweiten Schritt wurde dann das COMLEAM-Modell anhand der vorhandenen Konzentrationsmessungen angepasst. Die zeitliche Auflösung der DIMES 2 Messdaten beträgt 20 Minuten. Die Modellparameter wurden so gewählt, dass erstens Parameter der Gebäudegeometrien aus Daten der amtlichen Vermessung ermittelt. Zweitens wurden spezifischere COMLEAM Parameter, wie Baumaterial und Emission wurden anhand von Literaturangaben abgeschätzt und anschliessend als Durchschnittswert im untersuchten Gebiet an die gemessenen Konzentrationen angepasst. Für die Versickerungsrate wurde ein Wert von 50% angenommen, da nicht ermittelt werden konnte, ob Versickerungsanlagen vorhanden sind oder nicht.

#### 4. Resultate und Diskussion

Die Anpassung des Modells für den Event vom 18.05.2016 ergab für das SWMM Modell eine Nash-Suttcliffe Effizienz von 0.63 für den Durchfluss im Kanalnetz und die modellierte Mecoprop Masse wich um 15 % ab, wobei die Spitzenkonzentration um 6 % abwich (siehe Abbildung 4). Die Dynamik während des Regenereignis wird gut abgebildet, allerdings unterschätzt das angepasste Modell systematisch den Nachlauf des Niederschlagsabflusses (Abbildung 4 ab 19.5., 01:00), was ggf. auf strukturelle Defizite im Bereich von Hausdrainagen und niederschlagsabhängigem Fremdwasser hindeutet.

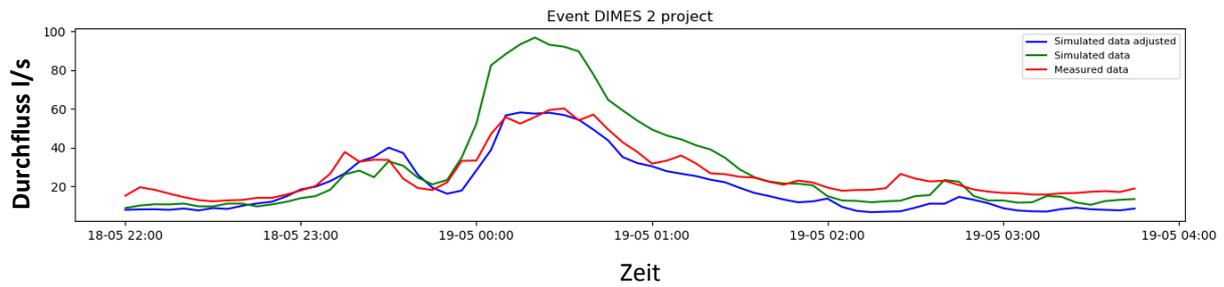


Abbildung 4: Resultate der Anpassung des hydrodynamischen Modells im Vergleich mit Messdaten und unangepasstem Modell für das DIMES 2 Regenevent.

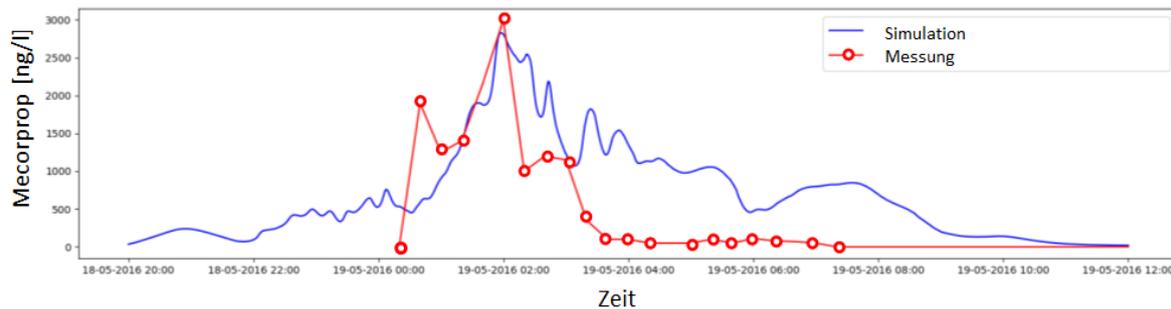


Abbildung 5: Resultate des Modells (blau) für Schmutzstoffkonzentrationen (unten) im Vergleich mit Messungen (rot). Die Ergebnisse zeigen eine vergleichbare Dynamik, obwohl manche Prozesse noch nicht richtig abgebildet werden konnten, wie z. B. der Nachlauf.

Die Resultate für die Schmutzfracht-Simulation weisen ähnliche Eigenschaften auf. Die Gesamtfracht und Spitzenkonzentration können gut abgebildet werden (Abbildung 5). Wie erwartet wird die Konzentrations-Dynamik im Nachlauf allerdings stark überschätzt, was wahrscheinlich auf die Unterschätzung des Nachlaufs zurückzuführen ist.

Eine Sensitivitätsanalyse der Parameter der verschiedenen COMLEAM Module (Abbildung 23) zeigte auf, dass die aktuell noch vorhandene Konzentration der Inhaltsstoffe im Dachaufbau einen grossen Einfluss auf die Auswaschung aufweist. Die Konzentration der Inhaltsstoffe nimmt mit zunehmender Auswaschung der Gebäudehülle durch Regen ab. Die Konzentration der Inhaltsstoffe kann also mit der Anfangskonzentration und der ausgesetzten Regenmenge beschrieben werden. Mit der vereinfachten Annahme, dass alle Gebäudehüllen mit der Anfangskonzentration ausgestattet sind, kann dieser Parameter auch als „Alter des Gebäudes“ bezeichnet werden. Im Vergleich von Abbildung 6 und Abbildung 7 wird beispielsweise ersichtlich, dass nach zwei Jahren ca. 90 % des mobilisierbaren Mecorprop bereits ausgewaschen ist.

Für Risiko-Abschätzungen bedeutet dies, dass eine gute Alters-Schätzung des Gebäudebestandes fundamental ist. Die Vereinfachung durch einen Durchschnittwert führt zwar zu guten Ergebnissen an der Kalibrationsstelle in Fehraltorf. Wenn allerdings die einzelnen Gebäude betrachtet werden, können sich grosse Abweichungen zu den beobachteten Konzentrationen ergeben. Da aber lokale Messdaten der Gebäude zur Kalibration nicht vorhanden waren, konnte diese Abweichung nicht genauer untersucht werden.

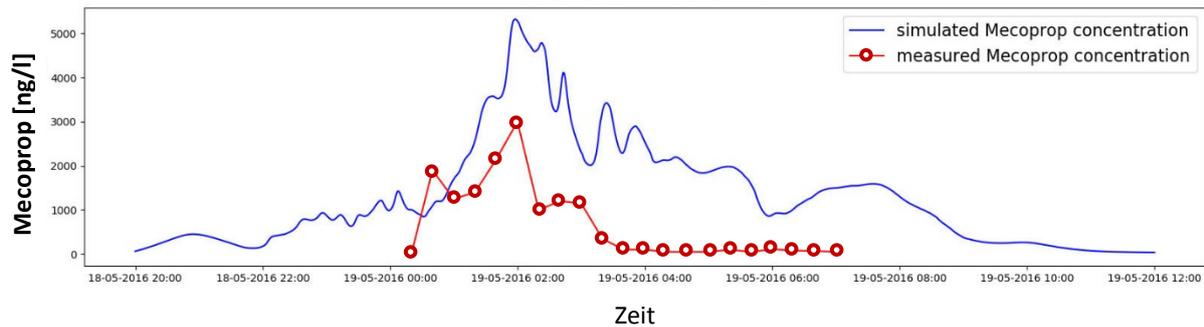


Abbildung 6: Resultate der Schmutzstoffkonzentration mit der Annahme, dass alle Gebäude im Einzugsgebiet zwei Jahre alt sind.

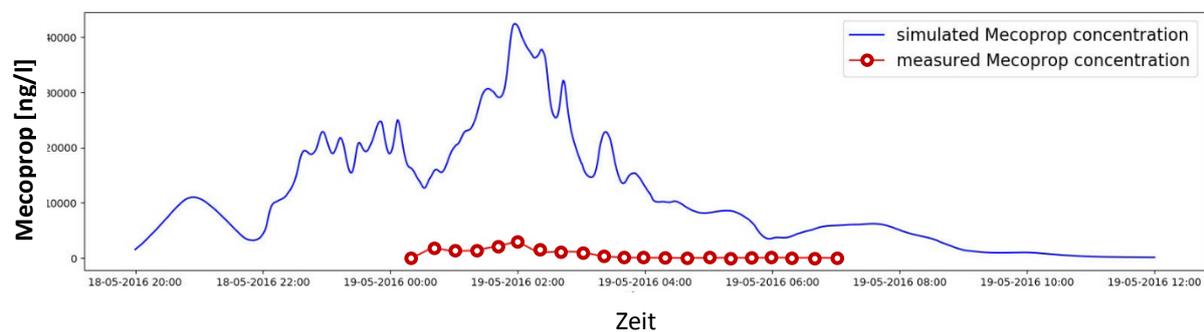


Abbildung 7: Resultate der Schmutzstoffkonzentration mit der Annahme, dass alle Gebäude im Einzugsgebiet neu gebaut wurden.

In einem nächsten Schritt könnte dies über ein Monitoring eines Beispieleinzugsgebiets untersucht werden. Das Einzugsgebiet sollte eine heterogene Gebäudealtersverteilung aufweisen, damit dieser Einfluss genau untersucht werden kann. Danach könnte ein Vergleich gezogen werden von der Vereinfachung mit einem Durchschnittsalter und dem effektivem Alter der Gebäudehülle.

## 5. Schlussfolgerung

Mikroverunreinigungen im Regenabwasser sind relevant für die Verschmutzung unserer Gewässer, aber für Ingenieure nur schwer modellierbar, da entweder die Quellen oder der Schmutzfracht-Transport in Entwässerungssystemen vereinfacht abgebildet wird. In dieser Studie wurde daher ein detailliertes Niederschlags-Abfluss Modell, SWMM, mit dem detaillierten Auswasch-Modelle COMLEAM gekoppelt.

Grundsätzlich zeigen unsere Resultate, ähnlich wie in vereinfachten Modellen von abwasserbürtigen Schmutzstoffen (Blumensaat et al. 2012), dass ein Modellansatz mit einer konstanten Schmutzstoff-Konzentration im Regenwasser die tatsächlich auftretenden Frachten überschätzt – aus dem einfachen Grund, dass in der Realität die vorhandenen Schmutzfracht-Reservoire endlich sind und bei grösseren Regen Verdünnungsprozesse einsetzen. In unserem gekoppelten Ansatz wird die Fracht nicht durch die in der Fassade ausgebrachte Masse limitiert ist, was vor allem bei Langzeitsimulationen verlässlichere Abschätzungen liefern wird.

Die Kopplung der Modelle ist wegen der quell-offenen *pyswmm*-Version einfach über ASCII-Textfiles möglich, die mittels unseres APIs aus der COMLEAM Datenbank extrahiert werden können, um sie anschliessend in SWMM einzulesen. Dieser Ansatz ermöglicht darüber hinaus auch Batch-Simulationen, z.B. für Sensitivitätsanalysen oder eine automatische Kalibration.

Die software-Architektur von COMLEAM als serverbasierte Anwendung mit einer komplexen Datenbank ist dabei allerdings nicht optimal, da sie bislang noch die Verknüpfung von verschiedenen Tabellen benötigt. Hier wäre eine eigens dafür vorgesehene Tabelle sehr vorteilhaft. Für die *pyswmm* Implementation wäre eine Verbesserung, wenn direkt Konzentrationen zur Laufzeit ausgelesen werden könnten, anstelle sie nach Beenden der Simulation aus dem reporting file zu parsen.

Das gekoppelte Modell liefert realistische Ergebnisse für unserer Fallstudie in Fehraltorf, wobei mit einer einfachen Anpassung bereits Nash-Sutcliffe Indizes von 0.63 erzielt werden konnten. Für die Verschmutzung stimmen die Spitzenkonzentration (6 % Abweichung) und die gesamte ausgetragene Mecoprop-Masse (15 %) gut überein. Eine detailliertere Anpassung des Modells, z.B. für eine bessere Abbildung des Nachlaufs, war nicht das Ziel dieser Arbeit.

Im Vergleich zu einfachen Modellen ermöglicht die dynamische Quellenbeschreibung von COMLEAM verlässlichere Langzeitsimulationen. Dabei deuten die Resultate der Sensitivitätsanalyse darauf hin, dass das Auswaschverhalten von Gebäudehüllen vor allem in den ersten Jahren, in denen sie dem Regen ausgesetzt sind, wichtig ist. Für Gebäude die älter als 10 Jahre sind ergab die vereinfachte Quellenbeschreibung für unser Fallbeispiel praktisch die gleichen ausgewaschenen Schmutzfrachten wie für das gekoppelte Modell.

Die Sensitivitätsanalyse zeigt weiterhin, dass bei Feldstudien genau darauf geachtet werden, dass die Eingangsdaten für das hoch-parametrisierte Modell möglichst genau sind. Sonst werden Ungenauigkeiten der Eingangsdaten durch Anpassung der Modellparameter kompensiert.

Weitergehende Analysen sollten daher untersuchen, ab welcher Siedlungsstruktur vereinfachte Modelle zulässig sind. Ausserdem ist zur Zeit nicht bekannt, wie Wind und wind-getriebener Regen die Auswaschung beeinflusst. Da in der Realität nur selten alle Gebäudehüllen gleichmässig benässt werden könnten hier Schmutzfrachten ebenfalls systematisch überschätzt werden.

Abschliessend lässt sich zusammenfassen, dass das gekoppelte Modell COMLEAM-SWMM ein mächtiges Werkzeug darstellt. Dieses kann sowohl zur besseren Risikoabschätzung als auch zur ingenieurmässigen Massnahmenplanung zur Reduktion der Einträge von Mikroverunreinigungen aus urbanen Gebieten bei Regenwetter verwendet werden, wie z.B. Betrieb von technischen Adsorber-Anlagen.

## 6. Literatur

- Blumensaat, F., P. Stauer, S. Heusch, F. Reußner, M. Schütze, S. Seiffert, G. Gruber, M. Zawilski, and J. Rieckermann. 2012. "Water Quality-Based Assessment of Urban Drainage Impacts in Europe - Where Do We Stand Today?" *Water Science and Technology* 66 (2): 304. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.178>.
- Burkhardt, M., M. Junghans, S. Zuleeg, U. Schoknecht, X. Lamani, K. Bester, R. Vonbank, H. Simmler, and M. Boller. 2009. "Biocides in Building Facades - Ecotoxicological Effects, Leaching and Environmental Risk Assessment for Surface Waters." *Biozide in Gebäudefassaden - Ökotoxikologische Effekte, Auswaschung Und Belastungsabschätzung Für Gewässer* 21 (1): 36–47.
- Burkhardt, M., S. Zuleeg, T. Marti, M. Boller, R. Vonbank, S. Brunner, H. Simmler, and J. Carmeliet. 2009. "Schadstoffe Aus Fassaden." *Tec21* 3–4: 28–31.
- Charbeneau, Randall, E. Barrett, and Michael. 1998. "Evaluation of Methods for Estimating Stormwater Pollutant Loads." *Water Environment Research* 70 (1295–1302): 10–2175.

- Devasia-Metzger, Jonas Roger. 2019. "Modeling of Mecoprop Pollution in Urban Stormwater Runoff." MSc thesis, Zürich: HSR.
- Blumensaat, Frank, Christian Ebi, Simon Dicht, Jörg Rieckermann, Max Maurer 2017. "Langzeitüberwachung der Raum-Zeit- Dynamik in Entwässerungssystemen mittels Niedrigenergiefunk." *KA - Korrespondenz Abwasser GFA 1866-0029, Abfall*, Nr. 7 Juli 2017 594-603 <https://doi.org/10.3242/kae2017.07.001>
- Hübner, S., C. Scherer, R. and Schwitalla Schwerd, and C. 2018. *Freisetzung von Durchwurzelungsschutzmitteln aus Dachabdichtungen*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Mutzner, Lena, Etiënne L.M.Vermeirssen, Simon Mangold, Max Maurer, Andreas Scheidegger, Heinz Singer, Kees Booij, Christoph Ort. 2019 "Passive samplers to quantify micropollutants in sewer overflows: accumulation behaviour and field validation for short pollution events" *Water Research*, Volume 160 1. September 2019, Pages 350-360 <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.04.012>.
- Rohr, Mirko, Olaf Tietje, and Michael Burkhardt. 2018. "Modellierung Der Freisetzung von Spurenstoffen Aus Gebäuden Und Des Eintrags in Gewässer Bei Regenwetter." *Regenwasser in Urbanen Räumen. Aqua Urbanica trifft RegenwasserTage 2018. Tagungsband*,311–316.
- US EPA. 2015. Storm Water Management Model Version 5.1, Office of Research and Development, Water Supply and Water Resources Division, United States Environmental Protection Agency, Revised: 2015.
- Walser, Alexander, Michael Burkhardt, Steffen Zuleeg, and Markus Boller. 2008. "Gewässerbelastung Durch Biozide Aus Gebäudefassaden." *GWA Gas, Wasser, Abwasser* 88 (8): 639–47.
- Wittmer, Irene K., Ruth Scheidegger, Hans-Peter Bader, Heinz Singer, and Christian Stamm. 2011. "Loss Rates of Urban Biocides Can Exceed Those of Agricultural Pesticides." *Science of The Total Environment* 409 (5): 920–32. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.11.031>.

### **Korrespondenz:**

Jonas Roger Devasia-Metzger  
Spitalstrasse 38, 8620 Wetzikon  
+41 52 267 09 33  
[jonas.devasia@holinger.com](mailto:jonas.devasia@holinger.com)