

Einfluss der Niederschlagsvariabilität auf den „First Flush“-Effekt in urbanen Entwässerungssystemen

Pauline Marie Ullrich¹, Alexander Verworn¹, Edwin Echeverri Salazar¹,
Luisa-Bianca Thiele^{1,2}

¹ BPI Hannover · Verworn, Beratende Ingenieure, Hannover; Deutschland

² Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, CHH, Suderburg; Deutschland

Kurzfassung: Der sogenannte „First Flush“-Effekt (Spülstoß) ist ein zentrales Phänomen der urbanen Hydrologie mit signifikantem Einfluss auf die Wasserqualität städtischer Entwässerungssysteme. In der Anfangsphase eines Regenereignisses werden Schadstoffe, die sich auf versiegelten Flächen akkumuliert haben, in hoher Konzentration abgeschwemmt. Dies stellt eine Herausforderung für die Regenwasserbewirtschaftung und den Gewässerschutz dar. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einfluss der zeitlichen Variabilität von Niederschlägen auf diesen Spülstoß analysiert, um ein besseres Verständnis der schadstoffbelasteten Abflüsse im Untersuchungsgebiet zu erlangen.

Hierzu wird eine dynamische Schmutzfrachtmodellierung durchgeführt. Um ein messwertunabhängiges Vorgehen zu ermöglichen, werden verschiedene potenzielle Frachtverläufe berücksichtigt. Aufgrund der hohen Variabilität der Niederschlagsereignisse ist es jedoch schwierig, spezifische Spülstoßformen eindeutig mit bestimmten Niederschlagseigenschaften zu verknüpfen. Dennoch zeigen die Ergebnisse, dass der Spülstoß am stärksten mit der Gesamtniederschlagshöhe korreliert. Auch die Niederschlagsdauer, die Höhe des maximalen Niederschlagsintervalls sowie die durchschnittliche Intensität in 5 min beeinflussen den Spülstoß.

Key-Words: „First Flush“-Effekt, Spülstoß, Schmutzfrachtmodellierung, Stoffabtrag

1 Einleitung

Eine integrierte Kanalnetzbewirtschaftung kann zur effektiven Minimierung der Gewässerbelastung durch Einleitung aus Kanalsystemen beitragen, indem die vorhandenen Systemelemente optimal ausgenutzt werden (DWA, 2021). Es wird davon ausgegangen, dass durch den Spülstoßeffect der anfängliche Anteil des Niederschlagsabflusses im Kanal am stärksten belastet ist. Die Untersuchung dieses

Spülstoßes ist somit ein Schlüsselfaktor in der Niederschlagsabflussbehandlung (Gao et al., 2023). Für eine Schmutzfrachtmodellierung unter Berücksichtigung des Spülstoßeffektes werden verschiedene Parameter zur Beschreibung des Stoffabtrags von der Oberfläche benötigt. Da diese in der Praxis aufgrund fehlender Messdaten häufig schwer zu bestimmen sind, werden oftmals Literatur- oder Standardwerte eingesetzt (DWA, 2021; Pleinert, 2014). Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss unterschiedlicher Niederschlagsdaten auf die Ausprägung des Spülstoßes im vorliegenden Untersuchungsgebiet zu analysieren. Zudem wird eine Methode entwickelt, den Spülstoß auch ohne eine vorangehende Kalibrierung des Modells zu untersuchen.

2 Daten und Methodik

2.1 Niederschlag

Für die Berechnungen werden 1010 Niederschlagsereignisse mit 5-minütiger Auflösung ausgewertet. Erfasst werden Dauer (D), Gesamthöhe (h_{ges}), mittlere Intensität in 5 min (I_{5min}), maximale Niederschlagshöhe in 15 min (h_{max15}) sowie deren Zeitpunkt (Pos_{hmax}) in Prozent der Dauer. Da laut Chaudhary et al. (2022) über das Gesamt ereignis gemittelte Niederschlagseigenschaften evtl. nicht geeignet sind, um den Einfluss auf den Spülstoß zu untersuchen, wird die Niederschlagshöhe der ersten 30 min (h_{30}) der Ereignisse ausgewertet, sowie der normierte Zeitschritt des Ereignisses, nachdem 25% bzw. 75% des Niederschlags gefallen sind (Pos_{Q25} , Pos_{Q75}). Des Weiteren wird in Anlehnung an Reinholdt Jensen, et al. (2022) der Anteil von niederschlagsfreien Zeitschritten an der Gesamtdauer des Ereignisses (d_{dry}) ausgewertet.

2.2 Untersuchungsgebiet

Die Untersuchungen werden beispielhaft für ein Einzugsgebiet mit einer Gesamtfläche von 5,8 ha durchgeführt, dass durch ein Trennsystem entwässert. Der Befestigungsgrad wurde mit 67% ermittelt.

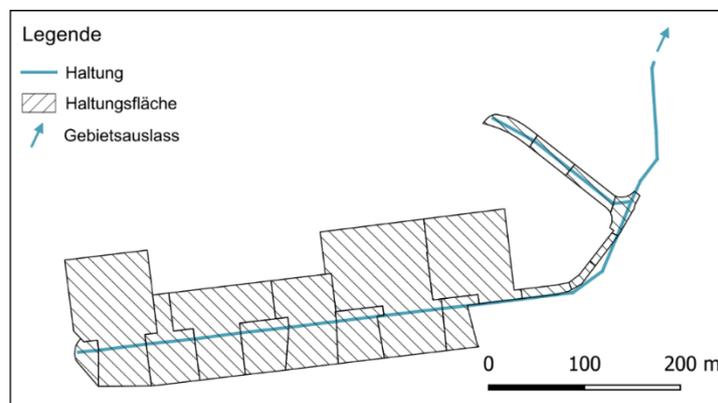


Abbildung 1: Untersuchungsgebiet.

2.3 Schmutzfrachtmodellierung

Die Schmutzfrachtmodellierung wird in SWMM durchgeführt. Der Stoffabtrag wird anhand der folgenden Exponentialformel berechnet:

$$W = C_1 \cdot q^{C_2} \cdot m \quad (1)$$

Dabei ist der Abfluss q [LT^{-1}], C_1 [$(L/T)^{-1}T^{-1}$] der Abtragskoeffizient, C_2 [-] der Abtragsexponent und m [M] die verfügbare Stoffmasse auf der Oberfläche. Die in der Literatur beschriebenen Werte für C_1 und C_2 variieren stark. Für C_1 liegen sie meist zwischen 0 und 1, während für C_2 Werte im Bereich von 0 bis 2,64 angesetzt werden (Al Ali et al., 2016; Baek et al., 2015; Bonhomme und Petrucci, 2017; Borris et al., 2014; Cambez et al., 2008; Di Modugno et al., 2015; Ghodsi et al., 2016; Latifi et al., 2019; Le et al., 2017; Liu et al., 2022; Oraei Zare et al., 2012; Rossman und Huber, 2016b; Taghizadeh et al., 2021; Tang et al., 2021; Yan et al., 2022). Daher werden die weiteren Berechnungen mit einer Auswahl verschiedener Parameterwerte durchgeführt. Für C_1 variieren die Werte zwischen 0,01 und 1,01, für C_2 werden Werte von 0,5 bis 3 verwendet. Aus diesen Werten werden 126 Parameterkombinationen erstellt und für jedes Niederschlagsereignis angesetzt. Zudem wird ein anfängliches Stoffpotenzial von 24 kg/ha gewählt.

2.4 Spülstoßauswertung

Zur Auswertung des Spülstoßes wird die $M(V)$ -Kurve berechnet. Diese ergibt sich aus einer dimensionslosen Betrachtung von kumulierter normierter Masse $M(t)$ und kumuliertem normierten Volumen $V(t)$ (Perera et al., 2019):

$$M(t) = \frac{\sum C_t Q_t \Delta t}{M_{ges}} \quad (2) \quad V(t) = \frac{\sum Q_t \Delta t}{V_{ges}} \quad (3)$$

Dabei ist C_t [ML^{-3}] die Konzentration, Q_t [L^3T^{-1}] der Durchfluss jedes einzelnen Zeitschrittes Δt [T], M_{ges} [M] die Gesamtmasse und V_{ges} [L^3] das gesamte Abflussvolumen. Die Formen der $M(V)$ -Kurven werden in sechs verschiedene Kategorien eingeteilt, die sich an der Einteilung nach Ma et al. (2011) orientieren. Dabei entsprechen Form 1a und Form 1b einem anfänglichen Spülstoß, der aber in Form 1a stärker ausfällt. Form 2 entspricht einem Ereignis mit Spülstoß zum Ende des Abflusses, Form 3 entspricht einer mittleren Verdünnung, Form 4 einem verzögerten Spülstoß und Form 5 tritt auf, wenn die $M(V)$ -Kurve die Diagonale mehrmals schneidet (Abbildung 2). Zur genaueren Betrachtung der $M(V)$ -Kurven wird der Spülstoßindex (MFF_n) verwendet. Dieser beschreibt das Verhältnis von Masse zu Volumen während eines bestimmten Volumendurchgangs und ergibt sich in Anlehnung an Kayhanian und Stenstrom (2021) wie folgt:

$$MFF_n = \frac{M(t)}{V(t)} \tag{4}$$

Dabei ist n der Volumenanteil des Abflusses, für den der Spülstoßindex bestimmt wird. Liegt der MFF_n über 1, tritt ein Spülstoß auf, der umso stärker ist, je höher der MFF_n . Der Wert wird, in Anlehnung an Chow und Yusop (2014), jeweils nach 10% des Abflussvolumens ermittelt (Abbildung 3).

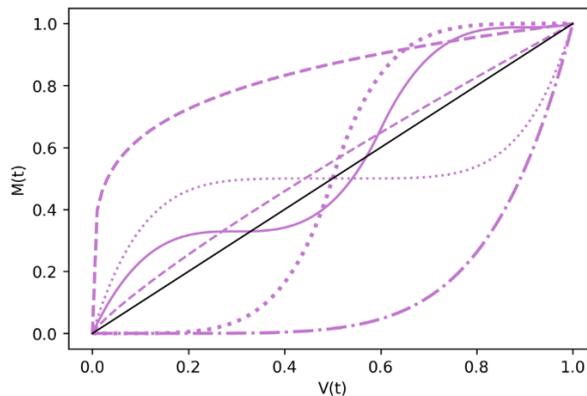


Abbildung 2: Verlauf der verschiedenen Spülstoßformen

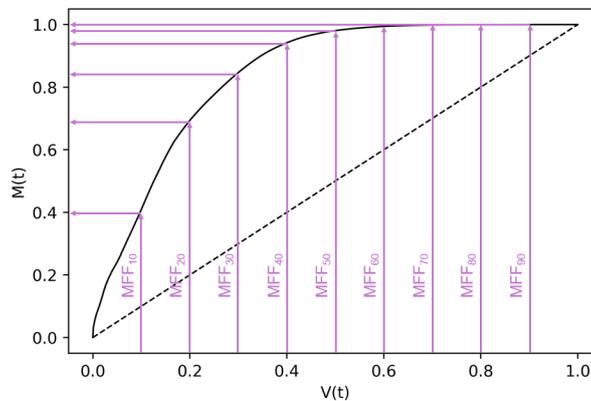


Abbildung 3: Spülstoßindizes.

Der Spülstoß wird anhand der Mediane der verschiedenen MFF_n -Werte ausgewertet. Dazu wird jeweils der maximale MFF_n -Median ($MaxMFF_{Wert}$) und der zugehörige Volumenanteil n ($MaxMFF_{Pos}$) bestimmt. Zusätzlich wird der n des ersten und des letzten MFF_n -Medians über 1 ($Anfang_F$ und $Ende_F$) und die Gesamtanzahl der MFF_n -Mediane in denen ein Spülstoß auftritt (A_F) ermittelt.

3 Ergebnisse

Abbildung 4 zeigt die Spearman Korrelation zwischen den Spülstoß- und den Niederschlagseigenschaften. Die Niederschlagssumme (h_{ges}) steht in sehr starkem

Zusammenhang zu der Gesamtmasse (M_{ges}) und in starkem Zusammenhang zum $MaxMFF_{wert}$ sowie dem dazugehörigen Volumenanteil ($MaxMFF_{pos}$). Die Zusammenhänge zwischen der maximale Niederschlagshöhe in 15 min (h_{max15}) und den Spülstoßeigenschaften bewegen sich im Bereich der leichten bis moderaten Korrelation. Moderat positive Korrelationen bestehen zwischen der maximalen Niederschlagshöhe in 15 min (h_{max15}) und dem $MaxMFF_{wert}$ sowie zwischen der maximalen Niederschlagshöhe in 15 min (h_{max15}) und der Gesamtmasse (M_{ges}). Ereignisse mit höherer Niederschlagssumme (h_{ges}) und maximaler Niederschlagshöhe in 15 min (h_{max15}) transportieren also meist eine höhere Stoffmasse und erzeugen einen Spülstoß, der früher hohe MFF_n -Werte annimmt. Die Niederschlagsdauer (D) steht in moderatem bis schwachem Zusammenhang zu allen Spülstoßeigenschaften außer dem $Anfang_F$. Die mittlere Intensität in 5 min (I_{5min}) weist einen moderaten bis schwachen Zusammenhang zu allen Spülstoßeigenschaften außer zu A_F auf. Höhere Werte für die Niederschlagsdauer (D) und die mittlere Intensität in 5 min (I_{5min}) stehen demnach ebenfalls im Zusammenhang mit einem stärkeren und früheren Spülstoß, wobei der Zusammenhang hier aber geringer ausfällt als bei der Niederschlagssumme (h_{ges}).

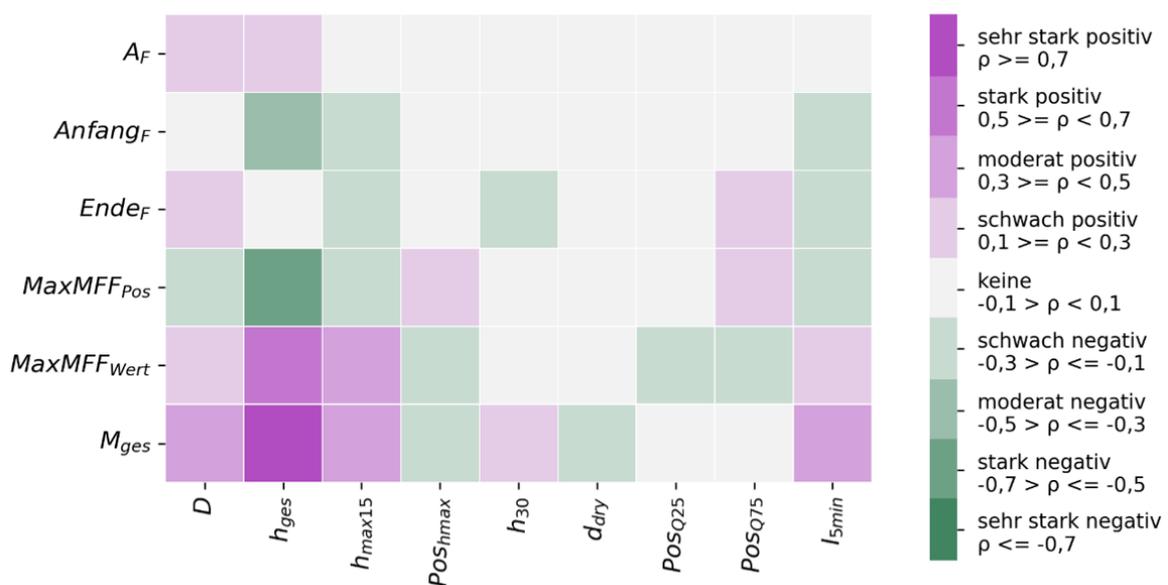


Abbildung 4: Korrelation von Spülstoß- und Niederschlagseigenschaften.

Die Verteilung der Niederschlagseigenschaften nach Spülstoßform ist in Abbildung 5 anhand von Boxplots dargestellt. Da Form 2 nur einmal auftritt, wird diese hier nicht berücksichtigt. Der höchste Wert der Niederschlagssumme (h_{ges}) tritt für die Spülstoßform 1a auf und liegt mit 67,13 mm deutlich über den Werten der anderen Spülstoßformen. Allerdings sind die Werte der Niederschlagssumme (h_{ges}) für Spülstoßform 1a auch stärker verteilt als für die anderen Spülstoßformen.

Auch der Medianwert der Niederschlagsdauer D ist für die Form 1a am höchsten. Form 1b weist hier zwar den gleichen Maximalwert auf, der Medianwert liegt aber mit 310 min unter dem der Form 1a. Für die maximale Niederschlagshöhe in 15 min ($h_{\max 15}$) treten die höchsten Maximalwerte bei Form 1a und 1b auf (18,72 mm und 13,62 mm).

Die Gesamtmasse (M_{ges}) unterscheidet sich stark nach Spülstoßform. Sowohl Maximal- als auch Medianwert der Form 1a (92,62 kg und 84,36 kg) liegen deutlich über den entsprechenden Werten der anderen Formen. Zwar liegt der Maximalwert der Form 1b auch bei 88,35 kg, allerdings variieren die Werte hier deutlich stärker als für Form 1a. Die geringste Stoffmasse ist in den Spülstößen der Form 4 enthalten. Durch die Ereignisse der Spülstoßform 1a werden demnach ca. 90% der im Gebiet vorhandenen Masse abgetragen (Medianwert). Für die Spülstoßformen 3 und 5 sind es 40% bzw. 62%. Durch Ereignisse der Form 1b werden 28% der Masse transportiert.

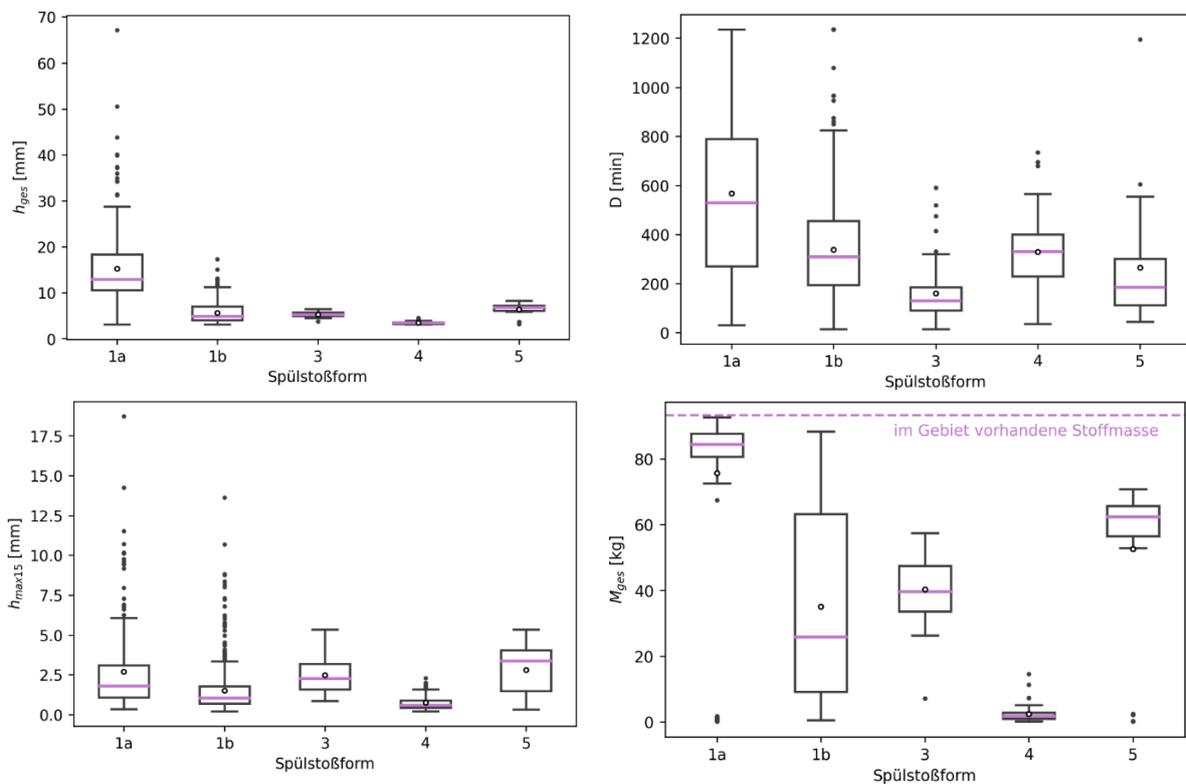


Abbildung 5: Verteilung von Gesamtniederschlagshöhe (h_{ges}), Niederschlagsdauer (D), maximaler Niederschlagshöhe in 15 min ($h_{\max 15}$) und insgesamt transportierter Masse (M_{ges}) nach Spülstoßform.

4 Schlussfolgerungen

Die Frachtverläufe variieren bei höherem Niederschlagsabfluss stärker. Besonders bei starken Spülstößen kann die Wahl der Abtragsparameter demnach den Frachtverlauf deutlich beeinflussen. Anders als bei der Berechnung mit Standardparameterwerten kann durch die hier entwickelte Methode die Bandbreite der möglichen Frachtverläufe berücksichtigt werden.

Mit der Berechnung der $M(V)$ -Kurven und der verschiedenen MFF_n -Werte im Verlauf der Ereignisse sowie der Betrachtung der jeweiligen Medianwerte wurde eine Methode gefunden, den Spülstoß im Verlauf des Abflusses für verschiedene Volumenanteile zu untersuchen. Die normierte Betrachtungsweise der Frachtverläufe in der $M(V)$ -Kurve in Kombination mit der hohen Variabilität der Niederschlagseigenschaften könnte allerdings dazu führen, dass Informationen verloren gehen.

In der Korrelationsanalyse konnte der deutlichste Zusammenhang zwischen Niederschlag und Spülstoß für die Gesamtniederschlagshöhe festgestellt werden. Aber auch das maximale Niederschlagsintervall, die Dauer und die durchschnittliche Intensität weisen einen schwachen bis moderaten Zusammenhang mit den Spülstoßeigenschaften auf. Höhere Werte dieser Niederschlagseigenschaften treten mit stärkeren Spülstoßwerten, besonders zu Beginn der Ereignisse auf.

Allerdings konnte kein deutlicher Zusammenhang zwischen der zeitlichen Verteilung des Niederschlags und dem Spülstoß ausgemacht werden, da diese zwischen den Ereignissen sehr stark variiert. Ob durch eine Betrachtung zeitlich begrenzter Abflussabschnitte ein deutlicherer Zusammenhang mit den Niederschlagseigenschaften gefunden werden kann, könnte Gegenstand weiterführender Untersuchungen sein. Besonders starke Spülstöße stehen in diesem Untersuchungsgebiet in Zusammenhang mit langen Niederschlägen und einer hohen Niederschlagssumme. Obwohl die Abflüsse kürzerer Niederschläge mit hoher Intensität auch einen erheblichen Anteil der Stoffmasse im Gebiet transportieren, konnte hier nur ein geringer Spülstoß ausgemacht werden. Ereignisse mit verzögertem Spülstoß treten im Zusammenhang mit Niederschlägen von geringer Niederschlagshöhe und Intensität auf. Entsprechend der Ergebnisse dieser Arbeit kann bei Niederschlägen ab einer Gesamtniederschlagshöhe von 10 mm davon ausgegangen werden, dass im anfänglichen Abflussvolumen ein überproportional hoher Stoffanteil transportiert wird. Ab einer h_{ges} von 20 mm ist ein stark ausgeprägter Spülstoß zu erwarten, der den Großteil der Stoffmasse auf der Oberfläche abträgt.

5 Literatur

Al Ali, S., Bonhomme, C., & Chebbo, G. (2016). Evaluation of the Performance and the Predictive Capacity of Build-Up and Wash-Off Models on Different Temporal Scales. *Water*, 8(8), 312. <https://doi.org/10.3390/w8080312>

- Baek, S.-S., Choi, D.-H., Jung, J.-W., Lee, H.-J., Lee, H., Yoon, K.-S., & Cho, K. H. (2015). Optimizing low impact development (LID) for stormwater runoff treatment in urban area, Korea: Experimental and modeling approach. *Water Research*, 86, 122–131. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.038>
- Bonhomme, C., & Petrucci, G. (2017). Should we trust build-up/wash-off water quality models at the scale of urban catchments? *Water Research*, 108, 422–431. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.027>
- Borris, M., Viklander, M., Gustafsson, A., & Marsalek, J. (2014). Modelling the effects of changes in rainfall event characteristics on TSS loads in urban runoff. *Hydrological Processes*, 28(4), 1787–1796. <https://doi.org/10.1002/hyp.9729>
- Cambez, M. J., Pinho, J., & David, L. M. (2008). Using SWMM 5 in the continuous modelling of stormwater hydraulics and quality. *11th International Conference on Urban Drainage*. https://www.researchgate.net/publication/229020623_Using_SWMM_5_in_the_continuous_modelling_of_stormwater_hydraulics_and_quality
- Chaudhary, S., Chua, L. H., & Kansal, A. (2022). Event mean concentration and first flush from residential catchments in different climate zones. *Water Research*, 219, 118594. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118594>
- Chow, M. F., & Yusop, Z. (2014). Sizing first flush pollutant loading of stormwater runoff in tropical urban catchments. *Environmental Earth Sciences*, 72, 4047–4058. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3294-6>
- Di Modugno, M., Gioia, A., Gorgoglione, A., Iacobellis, V., la Forgia, G., Piccinni, A., & Ranieri, E. (2015). Build-Up/Wash-Off Monitoring and Assessment for Sustainable Management of First Flush in an Urban Area. *Sustainability*, 7(5), 5050–5070. <https://doi.org/10.3390/su7055050>
- DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, A. und A. e. V. (2021). *DWA-M 165-1: Niederschlag-Abfluss- und Schmutzfrachtmodelle in der Siedlungsentwässerung – Teil 1: Anforderungen*. DWA.
- Gao, Z., Zhang, Q., Li, J., Wang, Y., Dzakpasu, M., & Wang, X. C. (2023). New conceptualization and quantification method of first-flush in urban catchments: A modelling study. *Science of The Total Environment*, 873, 162271. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162271>
- Ghods, S. H., Kerachian, R., Estalaki, S. M., Nikoo, M. R., & Zahmatkesh, Z. (2016). Developing a stochastic conflict resolution model for urban runoff quality management: Application of info-gap and bargaining theories. *Journal of Hydrology*, 533, 200–212. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.045>

- Kayhanian, M., & Stenstrom, M. K. (2021). First flush phenomenon and its application for stormwater runoff management. *Journal of Water and Wastewater*, 31(6). <https://doi.org/10.22093/wwj.2020.230456.3020>
- Latifi, M., Rakhshandehroo, G., Nikoo, M. R., & Sadegh, M. (2019). A game theoretical low impact development optimization model for urban storm water management. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118323. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118323>
- Le, S. H., Chua, L. H. C., Irvine, K. N., & Eikaas, H. S. (2017). Modeling washoff of total suspended solids in the tropics. *Journal of Environmental Management*, 200, 263–274. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.091>
- Liu, K., Li, J., Xia, J., Gao, X., Gao, J., & Jiang, C. (2022). Study on LID Facilities Comprehensive Effect Evaluation: A case in Campus. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 22(3), 530–540. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2022.04.001>
- Ma, Z.-B., Ni, H.-G., Zeng, H., & Wei, J.-B. (2011). Function formula for first flush analysis in mixed watersheds: A comparison of power and polynomial methods. *Journal of Hydrology*, 402(3–4), 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.029>
- Oraei Zare, S., Saghafian, B., & Shamsai, A. (2012). Multi-objective optimization for combined quality–quantity urban runoff control. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 4531–4542. <https://doi.org/10.5194/hess-16-4531-2012>
- Perera, T., McGree, J., Egodawatta, P., Jinadasa, K. B. S. N., & Goonetilleke, A. (2019). Taxonomy of influential factors for predicting pollutant first flush in urban stormwater runoff. *Water Research*, 166, 115075. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115075>
- Pleinert, F. (2014). *Application of Pollution Load Modelling for the Estimation of Micro Pollutant Emissions at Combined Sewer Overflows* [Masterarbeit, Technische Universität Graz]. https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Institute/SWW/3_Unterseite_Lehre/4_Masterarbeiten/MA_Pleinert.pdf
- Reinholdt Jensen, D. M., Sandoval, S., Aubin, J.-B., Bertrand-Krajewski, J.-L., Xuyong, L., Mikkelsen, P. S., & Vezzaro, L. (2022). Classifying pollutant flush signals in stormwater using functional data analysis on TSS MV curves. *Water Research*, 217, 118394. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118394>
- Rossmann, L. A., & Huber, W. C. (2016). *Storm Water Management Model reference manual: Volume III – Water quality* (EPA/600/R-16/093). U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development.
- Taghizadeh, S., Khani, S., & Rajaei, T. (2021). Hybrid SWMM and particle swarm optimization model for urban runoff water quality control by using

green infrastructures (LID-BMPs). *Urban Forestry & Urban Greening*, 60, 127032. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127032>

Tang, S., Jiang, J., Zheng, Y., Hong, Y., Chung, E.-S., Shamseldin, A. Y., Wei, Y., & Wang, X. (2021). Robustness analysis of storm water quality modelling with LID infrastructures from natural event-based field monitoring. *Science of The Total Environment*, 753, 142007. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142007>

Yan, H., Fernandez, A., Zhu, D. Z., Zhang, W., Loewen, M. R., van Duin, B., Chen, L., Mahmood, K., Zhao, S., & Jia, H. (2022). Land cover based simulation of urban stormwater runoff and pollutant loading. *Journal of Environmental Management*, 303, 114147. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114147>

Korrespondenz an:

Pauline Ullrich

BPI Hannover * Verworn, Mengendamm 16D, 30177 Hannover, Deutschland

Telefon: +49511962540

E-Mail: info@bpi-hannover.de