

Möglichkeiten und Grenzen von Surrogat-Messungen – Kontinuierliche Partikelkonzentrationsmessung mittels Multifrequenz-Ultraschall als Option im Regenwasser

Thorsten Schmitz

NIVUS GmbH, Eppingen

Kurzfassung: Die Messung der Wasserqualität und Erfassung von Konzentrationsverläufen in Oberflächenabflüssen stellt eine maßgebliche Herausforderung in der Siedlungswasserwirtschaft dar. Zum Monitoring von zeitlichen Verläufen müssen indirekte Messverfahren eingesetzt werden. Diese sind in der Regel einfach im Handling und auch günstiger als Laborverfahren, mit welchen sie häufig verglichen werden. Die Verfahren sind jedoch nicht gleichwertig und ein Vergleich daher auch nicht immer zielführend. Bisher wurden vor allem optische Messverfahren eingesetzt, um die Wasserqualität zu messen. Mit dem Multifrequenz-Ultraschall Verfahren gibt es eine weitere Option die Konzentration von Partikeln zu erfassen und als Äquivalente zu abfiltrierbaren Stoffen (AFS_{eq}) zu berechnen. Das besondere an dem neuen Verfahren ist, dass es nahezu wartungsfrei in der Kanalisation eingesetzt werden kann. Verbaut als dauerhafte Messung können so auch außerhalb von wissenschaftlichen Monitorings Daten über die Ablaufqualität gesammelt werden.

Key-Words: AFS-Messung, Regenwassermonitoring, kontinuierliche Messverfahren, Konzentrationsverläufe

1 Abfiltrierbare Stoffe (AFS) in der Stadtentwässerung

AFS sind definiert als Trockenmasse der Sink-, Schwimm- und Schwebstoffe in einem bestimmten Wasservolumen, die durch Filtration abgetrennt werden können. AFS sind in der Siedlungswasserwirtschaft, insbesondere bei der Regenwasserbehandlung, besonders relevant, da der Parameter als Verschmutzungsindikator herangezogen wird (Egodawatta, 2009; Baum et al., 2021).

In Deutschland wurden AFS mit dem Erscheinen des DWA-A 102 (2020) zum Leitparameter in der Regenwasserbehandlung. In dem Arbeitsblatt wird jedoch explizit der AFS-Anteil $>0,45 \mu\text{m}$ und $< 63 \mu\text{m}$ (AFS₆₃) betrachtet.

Eine besondere Bedeutung wurde den AFS63 zugesprochen, da Untersuchungen gezeigt haben, dass die partikulär gebundenen Schadstoffe vor allem an der Feinfraktion adsorbiert sind (vgl. Dierschke, 2014). Nach einer Auswertung von Xanthopolus (1990) sind sogar 80-90 % der Schwermetalle an AFS63 adsorbiert. Dies liegt vor allem darin begründet, dass die Oberfläche pro Masse bei den kleinen Partikeln größer ist und dadurch mehr Adsorptionsflächen zur Verfügung stehen.

Für den Gewässerschutz oder die Betrachtung des Schadstofftransports sind jedoch auch andere Partikelfractionen relevant. Schmitt et al. (2010) zeigen für verschiedene Schadstoffe die Verteilung über die Korngrößen. In den Untersuchungen sind viele Schadstoffe zu etwa 30-35 % an Partikeln < 63 µm adsorbiert. An Partikeln < 200 µm sind es i.d.R. etwa 80 % der Gesamtfracht. Die große Range in den Literaturangaben zeigt, wie heterogen die Zusammensetzung im Regenwasser ist und wie schwer abschätzbar das Abtragsverhalten von Oberflächen ist.

Eine Qualitätsmessung im Oberflächenabfluss erfolgt bis heute jedoch ausschließlich im Rahmen von Forschungsprojekten. Die direkte Messung der AFS-Konzentration ist nur durch eine Laboranalyse möglich. Dies ergibt sich aus der Definition des Parameters. Dadurch ist die Bestimmung von AFS personal- und kostenintensiv.

Durch Laboranalysen (in Kombination mit Probenehmern) können AFS-Konzentrationen zu einzelnen Zeitpunkten gemessen werden. Insbesondere zeitliche Verläufe geben jedoch die Möglichkeit ein erweitertes Systemverständnis aufzubauen. Bei Daten zur Ablaufqualität und dem zeitlichen Konzentrations-Verlauf besteht jedoch eine große Wissenslücke (Bachmann-Machnik, 2020). Auch für die Implementierung von qualitätsbasierten Steuerungen sind Echtzeit-Messdaten mit einer hohen zeitlichen Auflösung notwendig.

Für zeitlich hochaufgelöste Messdaten stellen indirekte Messverfahren eine Alternative dar.

2 Surrogat-Messungen zur Bestimmung von abfiltrierbaren Stoffen

Durch Surrogat-Messungen und die Erstellung einer Korrelation zu AFS-Äquivalenzen kann die AFS-Konzentration in Echtzeit im Oberflächenabfluss ermittelt werden. Grundsätzlich stehen vier verschiedene Surrogat-Messverfahren zur Verfügung, um Echtzeit-Messdaten von AFS_{eq} zu generieren:

- Optische Streulicht-Messverfahren (insbesondere Trübung)
- Coriolis-Massendurchflussmessung
- Laserbeugungsverfahren
- Ultraschall-Messverfahren

Das Laserbeugungsverfahren ist das genaueste Verfahren zur Messung des Partikelvolumens in einer Flüssigkeit. Kann jedoch In-Situ nicht eingesetzt werden, da es engen Messgrenzen (Größenbereich und Partikelzahl) unterliegt und zusätzlich eine Bypass-Konstruktion benötigt. Gleiches gilt für die Coriolis-Massendurchflussmessung, sodass diese beiden Verfahren in der Kanalnetzbewirtschaftung keinen Einsatz finden können.

Weiter verbreitet dagegen sind optische Streulicht-Messverfahren, die sich in der Regel in dem Winkel der Streulichtdetektion unterscheiden. Streulichtmessverfahren werden häufig auch als Trübungsmessungen bezeichnet. Diese zeigen eine gute Korrelation für AFS bei der spezifischen Korngrößenverteilung, bei der sie erstellt wurden. Für verschiedene Korngrößenverteilungen können jedoch signifikante Abweichungen entstehen (Kitchener et al., 2017; Thollet et al., 2013). Weiterhin kann auch in Abhängigkeit der eingesetzten Wellenlänge ein Fehler durch die Färbung der Partikel entstehen (vgl. Sutherland et al., 2000). Abbildung 1 zeigt den Einfluss der Korngröße auf die Messgröße Trübung.

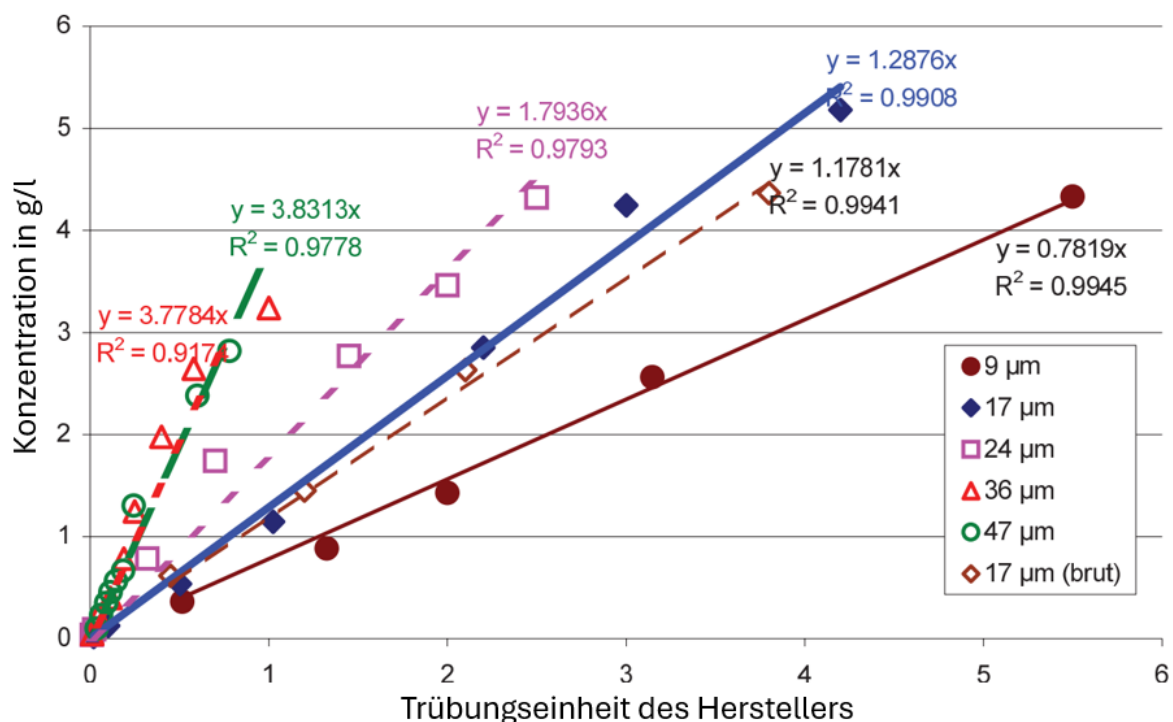


Abbildung 1: Einfluss unterschiedlicher Korngrößen auf die Trübungsmessung (nach Thollet et al., 2013)

Ein weiteres Problem stellt der Drift der Messdaten bei dem optischen Verfahren dar. Durch Biofilmbildung kommt es zu einem kontinuierlichen Anstieg der Messdaten, der nach einem verfahrensabhängigem Zeitintervall eine händische Reinigung erfordert. Insbesondere der wartungsaufwand stellt ein Hemmnis bei Betreibern dar (Massing,

2024), weshalb kontinuierliche Qualitätsmessungen bisher kaum Anwendung in der Praxis finden.

Ein weiteres AFS-Messverfahren stellen die ultraschallbasierten Verfahren dar. Hierbei kann zwischen Ultraschallverfahren mit einer einzelnen Ultraschall-Frequenz (z. B. Sequoia LISST-ABS) und multifrequenzbasierten Verfahren unterschieden werden.

Bei diesen Messverfahren wird der von Partikeln rückgestreute Schall gemessen und daraus die Partikelkonzentration berechnet. Bei der Messung mit nur einer Frequenz kommt es jedoch zu einem Fehler bei wechselnden Korngrößenverteilungen (ähnlich wie bei der Trübungskorrelation).

3 AFS_{eq}-Messung mittels Multifrequenz-Ultraschallverfahren

Bei dem von NIVUS entwickelten Multifrequenz-Ultraschallverfahren werden vom PKM-Sensor Ultraschallpulse mit insgesamt sieben Frequenzen zwischen 1 MHz und 8,3 MHz in das Medium emittiert. Die Schallwandler des Sensors messen die Rückstreuung und Dämpfung des emittierten Signals. Aus der Intensität der Rückstreuung und der Dämpfung des Signals ist ein Rückschluss auf das Partikelvolumen im Medium möglich. Durch Einsatz des breiten Frequenzbandes kann der Einfluss der Korngrößenverteilung weitestgehend eliminiert werden. Das berechnete Partikelvolumen kann dann mit der, durch den Anwender einzustellenden, Dichte verrechnet werden und ergibt so letztlich die AFSeq-Konzentration in mg/l. Das Verfahren im Detail wird beschrieben in Kibrom und François (2019).

In einer Untersuchung wurde die Korngrößenunabhängige Bestimmung von AFSeq geprüft. Hierzu wurden vier regenwassertypische AFS-Konzentrationen (20, 50, 100 und 200 mg/l) in einem Versuchsaufbau eingewogen und in drei verschiedenen Korngrößen (40-63 µm, 63-80 µm and 100-125 µm) untersucht. Bei der Untersuchung wurde gesiebtes Millisil W4 eingesetzt. Abbildung 2 zeigt die Darstellung der Messdaten.

Für alle drei Korngrößenklassen konnte eine hohe Linearität festgestellt werden. Diese bleibt für deutlich höhere Konzentrationen bis mindestens 6 g/l (nicht in der Darstellung) erhalten. Insgesamt zeigt sich eine weitestgehende Eliminierung des Einflusses der Korngrößenverteilung.

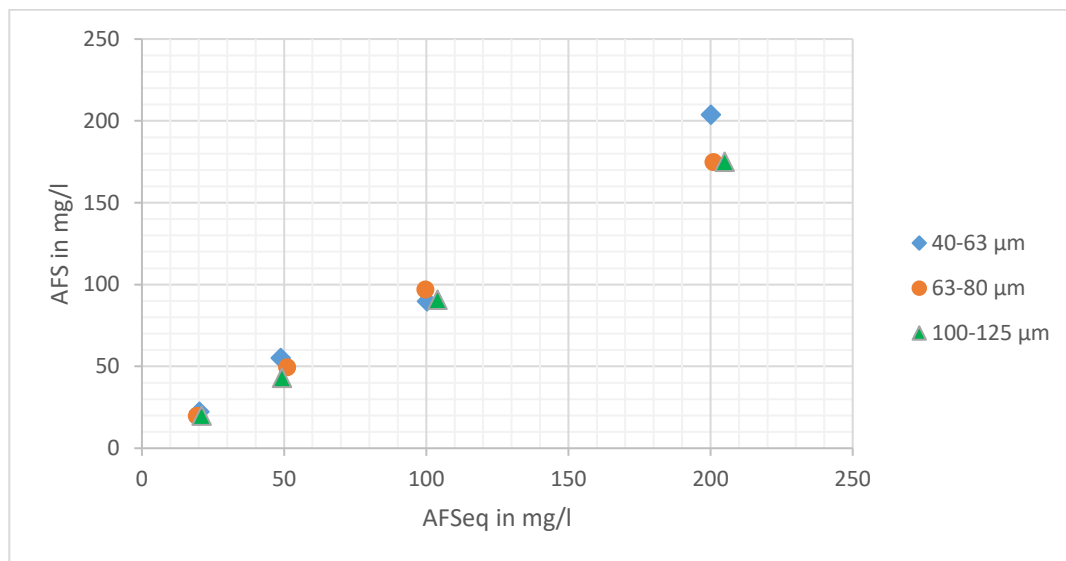


Abbildung 2: Vergleich der gemessenen AFSeq-Konzentrationen (NIVUS PKM-Sensor) und der eingewogenen AFS-Konzentrationen.

In Tabelle 1 sind die Abweichungen der Messwerte gegenüber den Einwaagekonzentrationen dargestellt. Während für die kleinste Korngrößenklasse eine Tendenz zur Überschätzung sichtbar ist, kommt es bei zunehmender Korngröße und Konzentration zu einer systematischen Überschätzung, welche in der Untersuchung bis maximal 17,1 % ansteigt.

Tabelle 1: Vergleich der eingewogenen und gemessenen Millisil-Konzentrationen für drei verschiedene Korngrößenklassen.

40-63 µm			63-80 µm			100-125 µm		
AFS (mg/l)	AFSeq (mg/l)	Abweichung in %	AFS (mg/l)	AFSeq (mg/l)	Abweichung in %	AFS (mg/l)	AFSeq (mg/l)	Abweichung in %
20,2	22,3	9,6	19,3	19,7	2,0	21,0	19,9	-5,5
48,8	55,2	11,5	51,0	49,5	-3,1	49,3	43,0	-14,6
100,3	89,8	-11,7	99,7	97,0	-2,8	104,0	90,7	-14,7
200,1	203,7	1,8	201,0	174,8	-15,0	205,0	175,1	-17,1

Insgesamt zeigen die Messungen, dass der Einfluss der Korngrößenverteilung weitestgehend eliminiert werden konnte. Da so enge Korngrößenverteilungen in der Praxis nicht vorkommen, ist hier auch von einem entsprechend geringerem maximalen Fehler auszugehen. Weiterhin lässt sich nicht ausschließen, dass Probleme bei der Homogenisierung von großen Partikeln für einen Teil der Unterschätzung verantwortlich sind.

Erste langfristige Einsätze in der Kanalisation zeigen, dass der Sensor kein Driftverhalten zeigt und somit keine kurzen Wartungsintervalle notwendig sind, um die Messdatenverfügbarkeit sicherzustellen.

4 Grenzen von Surrogat-Messungen

Die Zusammensetzung der AFS im Oberflächenabfluss ist sehr heterogen, z. B. hängt die Korngrößenverteilung im Oberflächenabfluss vom Ausmaß der Verstädterung, der Oberflächenbeschaffenheit, der Intensität der Straßenreinigung, der Niederschlagsintensität und vielen anderen Faktoren innerhalb des Einzugsgebiets ab (Zhao et al., 2022).

Die Korngrößenzusammensetzung variiert im Oberflächenabfluss. Die mittlere Korngröße (d_{50}) im Oberflächenabfluss liegt häufig in einer Größenordnung von 20-100 μm . In der Literatur werden Spannweiten von unter 10 μm bis zu 350 μm beschrieben (vgl. Dierscke, 2014; Charters et al., 2015; Winston and Witter, 2019). Fettig et al. (2020) zeigen, dass sogar in einem Einzugsgebiet innerhalb eines Regenereignisses der d_{50} um den Faktor 10 schwanken kann. Diese Größenvarianz erklärt, dass teilweise keine oder nur schlechte Korrelationen zwischen AFS und Trübungsmessungen beschrieben werden (Fettig et al., 2020).

Eine weitere Fehlerquelle bei Surrogat-Messungen ist die unbekannte Massendichte der Partikel. Alle indirekten Messungen, mit Ausnahme der Coriolis-Messung, basieren in der Berechnung der AFS-Konzentration auf Partikeloberflächen. Die Partikeloberflächen beugen oder streuen das Licht oder den Schall. Die Rohdaten der Messung führen so zu einem Rückschluss auf die Oberfläche und letztlich das Partikelvolumen. Selbst bei einer exakten Ermittlung des Partikelvolumens bleibt die Herausforderung, dass dieses mit einer Massendichte verrechnet werden muss, umso letztlich AFS_{eq} als Massenkonzentration zu erhalten.

Die Massendichte selbst kann variieren nach Einzugsgebiet, Jahreszeit, Oberflächenbeschaffenheit, Vegetation und anderen Einflussfaktoren. Kayhanian et al. (2008) konnten eine mit der Korngröße zunehmende Massendichte feststellen. Andere Untersuchungen zeigen engere Dichteverteilungen (Rommel et al., 2020).

Das theoretische Dichtespektrum liegt zwischen etwa 1 g/cm^3 für ausschließlich organisches Material und etwa 2,6 g/cm^3 für rein mineralisches Material. Die mittlere Dichte der AFS wird maßgeblich durch den Anteil an organischem Material, bzw. dem Glühverlust bestimmt (Gelhardt et al., 2021).

Die Spannbreite in der Dichte zeigt den möglichen Fehler, der letztlich entstehen kann, selbst wenn alle Messgerät-spezifischen Fehler minimiert wurden. Bei der Frage nach der Genauigkeit sollte dies immer bedacht werden.

Werden die Messergebnisse dann mit Laboranalysen verglichen, kann der mögliche Unterschied misstrauen bei dem Anwender erzeugen.

Berücksichtigt werden muss jedoch, dass bei einem Vergleich auch die Messunsicherheit der Probenahmen, dem zeitlichen und ggf. örtlichen Versatz und die Messunsicherheit im Labor selbst mitberücksichtigt werden müssen (vgl. Sandoval et al., 2018).

5 Fazit

Surrogat-Messungen stellen eine notwendige Ergänzung zu Laboranalysen dar. Sie sind aber nur eingeschränkt direkt miteinander vergleichbar.

Zeitliche Konzentrationsverläufe helfen dabei ein vertieftes Systemverständnis zu entwickeln. In Zukunft werden die Messaufgaben zunehmen und für Echtzeit-Steuerungskonzepte bedarf es einer Echtzeitmessung. Diese Herausforderungen können nur mit Surrogat-Messungen bewältigt werden. Mit dem bei NIVUS entwickelten Multifrequenz-Ultraschallverfahren konnten die wesentlichen Hemmnisse, wie Einfluss der Korngröße und hoher Wartungsaufwand weitgehend eliminiert werden.

Die Unsicherheit, die alle Surrogat-Messverfahren gemeinsam haben, ist die unbekannte Massendichte. Da grundsätzlich das Bestreben sein sollte, einen möglichst genauen Messwert zu erhalten, sollte die Frage diskutiert werden, ob es nicht zielführender ist das gemessene Partikelvolumen für Monitorings- und Steuerungsaufgaben zu nutzen.

Der Fehler, der durch die fehlende Dichteinformation entstehen kann, kann so ausgeschlossen werden und schließlich sind Schadstoffe adsorbiert an Oberflächen und nicht an Massen.

6 Literatur

Arbeitsblatt DWA-A 102-2/BWK-A 3-2 „Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer – Teil 2: Emissionsbezogene Bewertungen und Regelungen“, Dezember 2020, 94 Seiten, ISBN 978-3-96862-046-6.

Bachmann-Machnik, A. (2020). Optimierung des Betriebs von Kanalnetzen im Mischsystem auf Basis von Online-Messdaten, Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern.

Baum, P.; Kuch, B. and Dittmer, U. (2021). Adsorption of Metals to Particles in Urban Stormwater Runoff—Does Size Really Matter? *Water* 2021, 13, 309.

Charters, F. J., Cochrane, T.A. and O'Sullivan D. A. (2015). Particle size distribution variance in untreated urban runoff and its implication on treatment selection, *Water Research*, Volume 85, 2015, Pages 337-345.

- Dierschke, M. (2014). Methodischer Ansatz zur Quantifizierung von Feinpartikeln (PM63) in Niederschlagsabflüssen in Abhängigkeit von der Herkunftsfläche, Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern.
- Egodawatta, P., Thomas, E. and Goonetilleke, A. (2009). Understanding the physical processes of pollutant build-up and wash-off on roof surfaces, *Science of The Total Environment*, Volume 407, Issue 6, 2009, Pages 1834-1841, ISSN 0048-9697.
- Fettig, J., Oldenburg, M. and Pick, V. (2020). Erfassung und weitergehende Charakterisierung der Fraktion AFS-fein im Zu- und Ablauf von dezentralen Anlagen zur Behandlung des Niederschlagswassers von Verkehrsflächen – AFS-fein Charakterisierung –, Abschlussbericht, Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe.
- Gelhardt, L., Dittmer, U., & Welker, A. (2021). Relationship of particle density and organic content in sieve fractions of road-deposited sediments from varying traffic sites based on a novel data set. *Science of The Total Environment*, 794, 148812.
- Kayhanian, M.; Rasa, E.; Vichare, A.; Leatherbarrow, J. Utility of Suspended (2008). Solid Measurements for Storm-Water Runoff Treatment. *J. Environ. Eng.*, 134, 712–721.
- Kibrom A.; François, P. (2019). Measuring method and measuring arrangement for measuring particle size distribution and particle concentration in a conduit with liquid flowing through it. European patent. EP 3 637 098 B1.
- Kitchener, B., Wainwright, J. and Parsons, A. (2017). A review of the principles of turbidity measurement, *Progress in Physical Geography*. 41.
- Massing, C. (2024) Qualitätsabhängige Kanalnetzsteuerung in Wuppertal – Von der lokalen Steuerung einzelner Bauwerke zur Verbundsteuerung, Vortrag am 04.07.2024, Expertenforum Intelligente Kanalnetzsteuerung.
- Rommel, S., Gelhardt, L., Welker, A. and Helmreich, B. (2020) Settling of Road-Deposited Sediment: Influence of Particle Density, Shape, Low Temperatures, and Deicing Salt. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w12113126>.
- Sandoval, S., Bertrand-Krajewski, J., Caradot, N., Hofer, T., Gruber, G. (2018). Performance and uncertainties of TSS stormwater sampling strategies from online time series. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 78 5-6, 1407-1416.
- Schmitt, T., Welker, A., Dierschke, M., Uhl, M., Maus, C., Remmler, F. (2010) Entwicklung von Prüfverfahren für Anlagen zur dezentralen Niederschlagswasserbehandlung im Trennverfahren, Az: 26840-23, DBU-Vorhaben, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef.

- Sutherland, T. F., Lane, P. M., Amos, C. L., & Downing, J. (2000). The calibration of optical backscatter sensors for suspended sediment of varying darkness levels. *Marine Geology*, 162(2–4), 587–597. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(99\)00080-8](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(99)00080-8).
- Winston, R.J. and Witter J.D. (2019) Evaluating the Particle Size Distribution and Gross Solids Contribution of Stormwater Runoff from Ohio's Roads, Final Report, The Ohio Department of Transportation, Office of Statewide Planning & Research, State Job Number 135258.
- Xanthopoulos, C. (1990): „Niederschlagsbedingter Schmutzstoffeintrag in Kanalsysteme – erneute Bilanzierung aufgrund weitergehender Erfassung von Ereignissen“. In: *Schadstoffe im Regenabfluß aus städtischen Gebieten, Präsentation einer BMFT-Verbundprojektes, Band 58, S. 115-146*, Eigenverlag des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft, Universität Karlsruhe.
- Zhao, H., Ma, Y., Fang, J., Hu, L. and Li, X. (2022) Particle size distribution and total suspended solid concentrations in urban surface runoff, *Science of The Total Environment*, Volume 815, 2022, 152533, ISSN 0048-9697.

Korrespondenz an:

Thorsten Schmitz
NIVUS GmbH
Im Täle 2, D-75031 Eppingen
+49 7262 91919 86
thorsten.schmitz@nivus.com