

Semizentrale Anlage zur Behandlung von Verkehrsflächenabflüssen – Messprogramm an der A 485 in Gießen

Im Rahmen eines vom Hessischen Ministerium für Wissenschaft und Kunst geförderten Projektes wurde an einer semizentralen Anlage zur Behandlung von verschmutzten Verkehrsflächenabflüssen ein umfassendes Messprogramm zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit durchgeführt. Die zweiteilige Anlage bestehend aus einer Sedimentations- und einer Filtrationsstufe wurde an der Autobahn A 485 nahe Gießen aufgestellt. In der Untersuchungsphase von 17 Monaten konnten 41 Proben vom Zulauf und Ablauf der Anlage gesammelt und auf verschiedene Qualitätsparameter analysiert werden. Die Ergebnisse der Konzentrationen und Frachten an abfiltrierbaren Stoffen (AFS), Kupfer (Cu_{ges}) und Zink (Zn_{ges}) in Zu- und Ablauf werden dargestellt und diskutiert.

A monitoring programme funded by the Hessen State Ministry for Higher Education, Research and the Arts was conducted in a semi-centralized system for the treatment of highway runoffs. A two-section system, consisting of a lamella sedimentation tank and a filter device was set up at the A 485 near Gießen. During 17 months 41 samples were taken from in- and outlet of the treatment facility and analyzed for several quality parameters. The results (concentration and loads) of total suspended solids, total copper and total zinc are presented.

1 Veranlassung

Niederschlagsabflüsse von Verkehrsflächen gelten häufig als stofflich belastet (Helmreich et al. 2005; Sakson et al. 2018) und müssen, wenn sie von stark befahrenen Flächen kommen, vor der Ableitung in die Gewässer behandelt werden. Schwermetalle aus Abriebprodukten und PAK aus Verbrennungsrückständen können insbesondere empfindliche Gewässer negativ beeinflussen (Kayhanian et al. 2007a; Pitt et al. 1995). Bei hochbelasteten Straßen müssen darüber hinaus Auswirkungen von Streusalzen aus dem Winterdienst betrachtet werden (Huber et al. 2015 und 2016b; Hilliges et al. 2017). Die Auswahl eines Behandlungssystems hängt neben der Nutzung der Herkunftsfläche und den vorliegenden Randbedingun-

gen (z. B. Platzverfügbarkeit, Sickerleistung des Bodens) vom Status des aufnehmenden Gewässers ab (DWA 2016). Abflüsse von außerörtlichen Straßen werden oft über die Bankette oder Straßenböschungen versickert. Ist eine Versickerung nicht möglich, werden auch Regenklärbecken eingesetzt (FGSV 2005). Bei empfindlichen Gewässern kann eine Sedimentationsanlage nicht immer zum gewünschten Behandlungserfolg führen. Hier sind weitergehende Behandlungstechniken mittels Filtration erforderlich. Wenn der Platz für großräumige Anlagen, wie Retentionsbodenfilter, nicht vorhanden ist, werden alternativ dezentrale Anlagen als kompakte Schacht- oder Rinnensysteme eingesetzt. Semizentrale Behandlungsanlagen stellen einen Kompromiss zwischen kleinen dezentralen Anlagen

■ Verfasser

Prof. Dr.-Ing. habil. Antje Welker
antje.welker@fb1.fra-uas.de

Dr.-Ing. Martina Dierschke
martina.dierschke@fb1.fra-uas.de

Frankfurt University of Applied Science
Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft
und Hydromechanik
Nibelungenplatz 1
60318 Frankfurt am Main

Prof. Dr.-Ing. Steffen Heusch
steffen.heusch@bau.thm.de

FG Wasserwirtschaft und Hydrologie
TH Mittelhessen
Wiesenstr. 14
35390 Gießen



Bild 1: links: Luftbild des gewählten Autobahnabschnittes der A 485, aus (google-earth 2016); rechts: Fahrbahnabschnitt der A 485



Merkmale	Charakterisierung
Autobahn	A 485, Gießen-Wieseck, Fahrtrichtung von Süden nach Norden
DTV	durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV): 50.400 (je Richtung ca. 25.000) Kfz/d, davon 7,7 % Schwerlastverkehr (Hessen Mobil 2015)
Fahrspuren/Material	zwei Fahrspuren plus Standstreifen pro Richtung aus Asphalt
Umgebung	teilweise bewachsene Böschungen, im Westen Lärmschutzwände, Wohngebiet im Westen, im Osten Landwirtschaft
Unterhaltung/Pflege	<ul style="list-style-type: none"> - keine Straßenreinigung - Reinigung der Rinnen, Einläufe und Rohrleitungen im Bedarfsfall - Mähen von Bankett, Mulden, Mittel- und Trennstreifen ein- bis zweimal im Jahr - keine Pflanzenschutzmittel
Winterdienst	Standardfall: FS 30 (70 Prozent Trockensalz (NaCl) und 30 Prozent Sole (ca. 20-prozentige Sole aus MgCl ₂)) (Hessen Mobil 2018)

Tabelle 1: Charakterisierung des Einzugsgebietes

(Anschlussfläche ca. 400 m²) und großen zentralen Anlagen (Anschlussfläche oft über 20.000 m²) dar. Sie sind bislang wenig unter realen Bedingungen untersucht worden.

Die in diesem Beitrag vorgestellte zweistufige semizentrale Anlage ist für eine mögliche Anschlussfläche von etwa 5.000 bis 20.000 m² konzipiert. Sie wurde an einem Autobahnabschnitt der A 485 bei Gießen aufgebaut und über ein Jahr lang getestet. Die Ergebnisse des Messprogramms werden hier vorgestellt und mit Werten aus der Literatur und Gewässervorgaben verglichen.

2 Beschreibung Einzugsgebiet und Behandlungsanlage

Der gewählte Autobahnabschnitt mit 1,01 ha befestigter Fläche ($A_{E,b}$) befindet sich in

Gießen-Wieseck und umfasst die östliche Seite der Autobahn A 485, Fahrtrichtung Norden (Bild 1). Die wesentlichen Merkmale des Einzugsgebietes sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Verkehrsflächenabflüsse werden im Mittelstreifen gesammelt und über insgesamt 17 Haltungen (DN 300) in südliche Richtung transportiert. Am Ende der Transportstrecke zweigt eine Haltung in westliche Richtung ab, bis die Rohrleitung am oberen Ende der Böschung austritt (Bild 2 links). Die gesamte Transportstrecke hat eine Länge von 776 m.

Die semizentrale Behandlungsanlage besteht aus Zulaufbauwerk, Sedimentationsstufe mit eingebauten Lamellen (Steinhardt GmbH Wassertechnik, Taunusstein) und Filterstufe (3P Technik Filtersysteme GmbH, Bad Überkingen) (Bild 2 rechts und Bild 3). Die Anlage wird im Dauerstau betrieben.

Im Zulaufbauwerk erfolgt die Abflussdrosselung durch eine Blende. Übersteigen die Verkehrsflächenabflüsse den eingestellten Drosselabfluss, werden diese Wassermengen an der Anlage vorbei über einen Bypass in das bestehende Gerinne und letztlich in das Gewässer Wieseck abgeschlagen. Die durch die Ablaufdrossel weitergeführten Wassermengen gelangen über ein Edelstahlrohr in die Sedimentationsstufe (Bild 2, links).

In der Sedimentationsstufe wird ein Großteil der Feststoffe aus dem Verkehrsflächenabfluss entfernt. Die Feststoffe sinken über die Lamellen zu Boden, das vorgereinigte Wasser wird weiter in die Filterstufe geleitet.

Die Filterstufe wird von unten nach oben durch 18 Filterelemente durchströmt. Gelöste Stoffe (z. B. Schwermetalle) werden durch Ionenaustausch bzw. Sorption in den Filtern zurückgehalten. Die Auswahl der Filterma-



Bild 2: links: Auslauf aus der Böschung und Zuleitung zur Anlage; rechts: Blick in die Filterstufe

Gesamtanlage	Sedimentationsstufe (Steinhardt GmbH Wassertechnik)	Filterstufe (3P Technik Filtersysteme GmbH)
$A_{E^*b} = 1,01 \text{ ha}$	Lamellenklärer	Durchfluss von unten nach oben Filtermaterial: 15 cm Zeolith (unten), 30 cm CaSi (oben)
$V_{\text{netto}} = 23 \text{ m}^3$	$V_{\text{Sedimentation}} = 17,5 \text{ m}^3$	$V_{\text{Filterstufe}} = 5,5 \text{ m}^3$
	$Q_{\text{Bemessung}} = 30 \text{ l/s}$	$Q_{\text{max}} = 30 \text{ l/s}$ (bis P21 $Q_{\text{max}} = 24 \text{ l/s}$)
	Projizierte Lamellenfläche: $A = 43 \text{ m}^2$	$A_{\text{Filterfläche}} = 3,38 \text{ m}^2$
	Oberflächenbeschickung ($Q_{\text{Bemessung}}$): $q_A = 2,5 \text{ m/h}$	maximale Filtergeschwindigkeit: $v_f = 25,6 \text{ m/h}$
	mittlere Oberflächenbeschickung bei $r = 6 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$: $q_A = 0,6 \text{ m/h}$	mittlere Filtergeschwindigkeit bei $r = 6 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$: $v_f = 6,4 \text{ m/h}$

Tabelle 2:
Charakteristika
der Anlage

terialien und der Filteraufbau wurden anhand von Laborversuchen entwickelt und getestet (Welker et al. 2017; Huber et al. 2017). Übersteigt die Zulaufmenge den Bemessungszufluss, gelangt ein Teil der Zulaufmenge über den Notüberlauf in Form von nach oben offenen Rohren unfiltriert in den Ablauf. Der Notüberlauf in der Filterstufe wurde im März 2016 erhöht, so dass danach ein Anspringen statt bei über $Q = 24 \text{ l/s}$ erst oberhalb von $Q = \text{ca. } 30 \text{ l/s}$ erfolgte. Der Bypass sowie der Ablauf gelangen in einen Graben, der in das Gewässer (Wieseck) mündet. Eine Zusammenstellung der wesentlichen Abmessungen und Charakteristika der Anlage enthält Tabelle 2.

3 Feldmessprogramm

Die Anlage wurde von August 2015 bis November 2016 beprobt. Dadurch ist es gelungen, verschiedene jahreszeitliche Belastungssituationen wie sommerliche Starkniederschläge und Belastungen durch den Winterdienst im Messprogramm abzubilden. Messpausen ergaben sich durch das Einfrieren der Anlage in einer extremen Kälteperiode, die Durchführung eines gesonderten Feststoffversuchs mit mineralischen Feststoffen sowie vereinzelt Ausfälle der Messtechnik. Die gesamte Anlage wurde während des Messzeitraumes Ende Oktober 2015 einmal geleert.

In einem Messcontainer waren drei gekühlte automatische Probenehmer (Beprobung Zulauf und Mitte: Fa. Ori GmbH, Typ Basic Solid, Beprobung Ablauf: Fa. Hach, Typ BU 4010) sowie die Steuer- und Elektrotechnik untergebracht. Der Niederschlag an der nahe gelegenen Messstation (ca. 300 m) wurde kontinuierlich mittels eines Pluviometers aufgezeichnet.

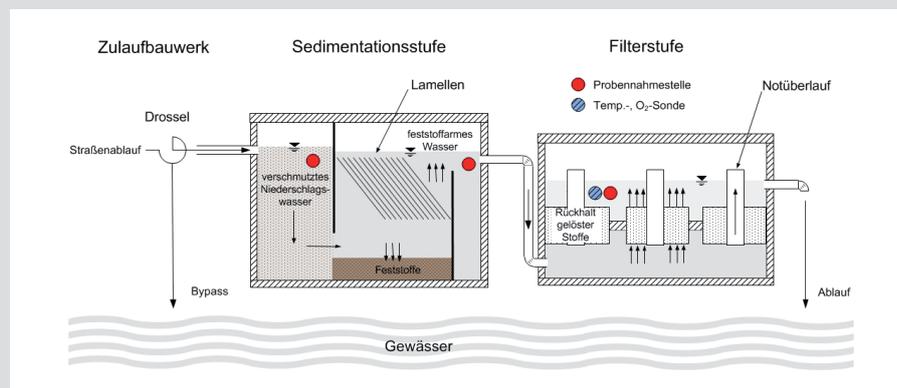


Bild 3: Schematische Darstellung der Gesamtanlage

3.1 Mengenummessung, Probennahme und Analytik

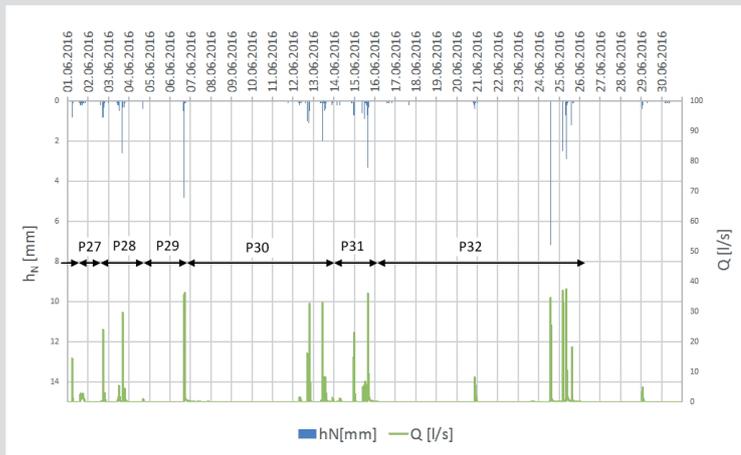
Der Durchfluss der Sedimentationsanlage wurde online erfasst. Mithilfe eines hinter einem Thomsonwehr angebrachten Ultraschall-Sensors (Fa. Endress + Hauser, Typ Prosonic S FDU90) wurde der Wasserspiegelstand erfasst. Das erzeugte Signal wird an einen Messumformer (Fa. Endress+Hauser, Typ Prosonic S FDU90) weitergegeben, in dem die Wasserspiegelhöhe aus einer hinterlegten Kalibrierfunktion in ein Mengensignal umgerechnet wird. Der Zufluss wird in einem 5-Minuten-Intervall als Mittelwert des vergangenen Intervalls in $[\text{l/s}]$ ausgelesen. Nach einem Kubikmeter Zuflussvolumen wird eine Probenahme je Probenahme-stelle (Zulauf, Mitte, Ablauf) ausgelöst. Die Lagen der drei Probenahmestellen sind Bild 3 zu entnehmen.

Aus messtechnischen Gründen wurden überwiegend mehrere Niederschläge und deren Abflussereignisse in Sammelproben zusammengefasst. In Bild 4 ist ein Beispiel des Verlaufs der Probenahmen im Juni 2016 mit den Probenahmezeiträumen P27 bis P32 sowie den Niederschlags- und Abflussereignissen dargestellt.

Die Sammelproben wurden nach dem Transport ins Labor in Teilproben aufgeteilt. Der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit (LF) wurden direkt nach der Bergung mittels Sonden (pH: Fa. Hach, Typ HQ40d mit PHC 10103; LF: Fa. WTW, Typ LF 197-S) detektiert. Die Teilproben wurden nicht stabilisiert oder filtriert und bis zur Analyse der stofflichen Qualitätsparameter bei $-25 \text{ }^\circ\text{C}$ eingefroren. Die Dauer von der Probenbergung bis zum Einfrieren betrug etwa 30 min.



Bild 4: Verlauf der Niederschläge h_N [mm] und Zuflüsse Q [l/s] der Probenahmezeiträume im Juni 2016



Die Gesamtgehalte an Kupfer (Cu_{ges}) und Zink (Zn_{ges}) wurden mittels ICP-MS nach einem Säureaufschluss nach DIN EN 17294-2 (2017) gemessen. Die Bestimmung der Abfiltrierbaren Stoffe (AFS) erfolgte mittels Druckfiltration über einen Glasfaserfilter mit einer Porenweite von 0,45 μm in Anlehnung an DIN EN 872 (2005).

Ebenfalls erfasst wurden die Konzentrationen an Phosphor (DIN EN ISO 6878, 2004) und chemischem Sauerstoffbedarf CSB (DIN 38409 H 41, 1980). Des Weiteren wurden Qualitätsdaten im Ablauf der Sedimentationsstufe (Mitte) ermittelt sowie kontinuierlich im Ablauf die Sauerstoffgehalte und die Wassertemperatur mittels einer Onlinesonde (Fa. Hach, Typ LDO SC) aufgezeichnet. Diese Ergebnisse werden an anderer Stelle publiziert.

3.2 Ergebnisse Niederschlag und Abfluss

In Tabelle 3 sind die Probenahmezeiträume mit zugehörigen Niederschlags- und Abflusscharakteristika, Bypässen und Notüberläufen dargestellt. Der Anlage flossen maximal $Q_{max} = 38$ l/s zu. Vor der Behandlungsanlage wurde während des Probenahmezeitraumes von Juli 2015 bis Dezember 2016 oberhalb dieses Zuflusses etwa 2 % des untersuchten Gesamtabflussvolumens in insgesamt sechs Ereignissen über den Bypass abgeschlagen (87 m^3). Davon entfielen vier erfasste Zeiträume (P26, 29, 31 und 32) in den außergewöhnlich regenreichen Monat Juni 2016, der mit 118,7 mm Niederschlag deutlich über dem langjährigen Mittel von 1939 bis 2015 in Höhe von 61,9 mm der Station Gießen-Wettenberg lag (DWD, 2016), vgl. auch Bild 4. Die Summe dieser vier Bypässe betrug ca. 60 m^3 . Die Bypassmengen wurden mithilfe von 5-min-Aufzeichnungen (Niederschlag und Abfluss) abgeschätzt. Aus den Zufluss-

und Bypassvolumina und den Niederschlagsdaten wurde ein mittlerer Abflussbeiwert während der Probenahmezeiträume gemäß (1) zu $\psi = 0,76$ ermittelt.

$$\psi = \frac{(\sum_{P1}^{P41} V_{Zufluss} + \sum_{P1}^{P41} V_{Bypass}) [m^3]}{(\sum_{P1}^{P41} h_N \cdot A_{E,b} \cdot 1000) [m^3]} \quad (1)$$

- P: Probenahmezeiträume
- $V_{Zufluss}$: Zuflussvolumen [m^3]
- V_{Bypass} : Bypassvolumen [m^3]
- h_N : Niederschlagshöhen [l/m^2]
- $A_{E,b}$: befestigte Einzugsgebietsfläche [m^2]

Durch die Anlage flossen im Untersuchungszeitraum etwa 5.800 m^3 . Von etwa 71 % dieses Volumens wurden etwa 175 Abflussereignisse in 41 Sammelproben erfasst und analysiert, vgl. Tabelle 3. Durch die Notüberläufe der Filterstufe liefen etwa 37 m^3 im Untersuchungszeitraum an den Filtern vorbei in den Ablauf, davon der überwiegende Anteil ebenfalls im Mai und Juni 2016.

3.3 Ergebnisse der Qualitätsmessungen

In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Qualitätsmessungen im Zulauf sowie im Ablauf der Gesamtanlage dargestellt.

3.3.1 Zulauf

Der pH-Wert in den Zulaufproben lag zwischen 6,5 und 8,4. Der pH-Wert in Verkehrsflächenabflüssen wird vorwiegend durch den Regen und durch das Fahrbahnmaterial beeinflusst. In einer umfassenden Studie von Huber et al. (2016a) wurden die pH-Werte von Verkehrsflächenabflüssen von 63 Asphaltstandorten verglichen. Der Median lag hier bei 6,8 (5,4 bis 8,2). Damit liegen die in diesem Messprogramm ermittelten

pH-Werte in vergleichbaren Größenordnungen.

Die Messwerte für die elektrische Leitfähigkeit in den Zulaufproben schwanken in einem weiten Bereich zwischen 51 und 5.520 $\mu S/cm$. Der Salzeintrag durch den Winterdienst ist am Anstieg der Leitfähigkeit in P11 bis P21 und P39 bis P41 deutlich zu erkennen (blau markierte Werte in Tabelle 4). Die erhöhten Ionenkonzentrationen in den Proben P23 bis P25 (April/Mai 2016) können die Folge von präventiven Streuungen durch Nachtfrostprognosen im späten Frühjahr sein.

Als Streusalze werden in Deutschland vorwiegend Natriumchlorid ($NaCl$), in geringerem Umfang auch Calciumchlorid ($CaCl_2$) und Magnesiumchlorid ($MgCl_2$) sowohl als Einzelstoff als auch in Mischungen eingesetzt. Die Auswahl der Substanzen sowie die eingesetzten Mengen hängen neben den witterungsbedingten Faktoren wie Niederschlagsart oder Feuchtigkeit der Fahrbahn von vielen weiteren Randbedingungen (z. B. Ausstattung Fahrzeuge, Fahrgeschwindigkeit) ab (Hanke 2015). Am Standort Gießen wurden laut Angaben von Hessen Mobil vorwiegend Mischungen aus $NaCl$ und $MgCl_2$ als Feuchtsalz (FS30) eingesetzt (Hessen Mobil 2018).

In den Zulaufproben am Standort Gießen stiegen parallel zur elektrischen Leitfähigkeit die Gehalte an Feststoffen (AFS) und Schwermetallen (Cu_{ges} , Zn_{ges}) deutlich an (Bild 5).

Andere Messprogramme zeigen ebenfalls höhere Gehalte an Feststoffen und Schwermetallen in Verkehrsflächenabflüssen während der Wintersaison (Helmreich et al. 2005; Huber et al. 2016a; Hilliges et al. 2017).

Ursächlich dafür sind verschiedene Effekte: Unter Salzeinfluss ist die Korrosion von Schwermetallen (insbesondere Zink von Fahrzeugen und Leitplanken) generell erhöht (Helmreich et al. 2005; Kaufmann, 2006; Hilliges et al. 2017). Lambert (2011) berichtet darüber hinaus von einer verstärkten frostbedingten Zerstörung der Asphaltdecke unter Salzeinfluss und der nachfolgenden Erhöhung der Feststoffmenge in Autobahnabflüssen. Dieser Effekt konnte auch bei einer langjährigen Studie an einem Standort in Augsburg bestätigt werden (Nadler, Meißner 2008). Zusätzlich werden unabhängig vom Salzeinsatz Straßen- und Reifenabrieb durch die Nutzung von Winterreifen begünstigt (Hilliges et al. 2017).

Aus den Messdaten des gesamten Probenah-

Messzeitraum		Niederschlag					Fläche			Anlage				
Probenahme-zeit- raum P	Beginn und Ende	Trockenwettertage*	Niederschlags- höhe h_N	Niederschlags- dauer D_N	mittlere Regen- intensität	maximale Regen- intensität (5 min)	Niederschlags- volumen	Abflussvolumen	Abflussbeiwert ψ	Bypass	Zufussvolumen (beprobt)	Q_{mittel}	Q_{max}	Abschlagsvolumen Filterstufe
		[d]	[mm]	[min]	[l/s*ha]	[l/s*ha]	[m ³]	[m ³]	[-]	[m ³]	[m ³]	[l/s]	[l/s]	[m ³]
1	11.08. bis 17.08.2015	5	33,9	1450	3,9	66,7	339	289,4	0,85		289,4	0,1	31,5	2,5
2	17.08. bis 18.08.2015	0	16,9	480	5,9	36,7	169	132,6	0,78		132,6	1,8	15,3	
3	18.08. bis 28.08.2015	4	14,7	990	2,5	16,7	147	109,2	0,74		109,2	0,0	11,9	
4	29.08. bis 02.09.2015	4	12,4	400	5,2	50,0	124	92,5	0,75		92,5	0,4	25,9	0,6
5	03.09. bis 14.09.2015	0	11,5	895	2,1	133,3	115	80,5	0,70	19,2	61,3	0,2	36,0	6,4
6	15.09. bis 17.09.2015	1	22,7	1230	3,1	16,7	227	177,8	0,78		177,8	1,7	9,9	
7	22.09. bis 24.09.2015	2	6,1	370	2,7	23,3	61	41,4	0,68		41,4	1,0	10,9	
8	24.09. bis 06.10.2015	9	5,9	405	2,4	36,7	48	17,8	0,37		17,8	0,8	5,0	
9	07.10. bis 15.10.2015	2	7,9	790	1,7	6,7	79	42,1	0,53		42,1	0,7	10,9	
10	19.11.15	0	7,2	420	2,9	30,0	72	65,1	0,90		65,1	0,3	26,1	0,6
11	20.11. bis 30.11.2015	0	26,3	2995	1,5	53,3	263	207,9	0,79		207,9	0,7	27,1	0,9
12	30.11. bis 01.12.2015	0	12,1	1315	1,5	6,7	121	125,5	1,04		125,5	1,3	5,7	
13	09.12. bis 14.12.2015	2	10,1	1285	1,3	6,7	101	77,6	0,77		77,6	1,2	4,6	
14	14.12. bis 17.12.2015	0	4,2	660	1,1	10,0	42	31,6	0,75		31,6	1,0	5,3	
15	07.01. bis 13.01.2016	0	13,6	1535	1,5	13,3	136	130,6	0,96		130,6	0,3	3,6	
16	13.01. bis 16.01.2016	0	5,6	1020	0,9	20,0	56	35,2	0,63		35,2	0,4	2,9	
17	30.01. bis 01.02.2016	1	6,3	585	1,8	13,3	63	61,4	0,97		61,4	1,5	6,3	
18	02.02. bis 11.02.2016	0	24,9	2030	2,0	30,0	249	200,0	0,80		200,0	2,2	26,3	0,7
19	11.02. bis 14.02.2016	0	5,8	1035	0,9	10,0	58	45,7	0,79		45,7	0,5	6,4	
20	15.02. bis 20.02.2016	0	5,7	750	1,3	6,7	57	50,3	0,88		50,3	0,5	2,8	
21	21.02. bis 23.02.2016	1	9,7	860	1,9	10,0	97	92,4	0,95		92,4	1,6	7,5	
22	29.03. bis 01.04.2016	0	28,4	1365	3,5	26,7	284	233,6	0,82		233,6	1,0	16,1	
23	04.04. bis 07.04.2016	0	6,8	780	1,5	20,0	68	44,6	0,66		44,6	0,9	4,9	
24	08.04. bis 17.04.2016	4	9,3	620	2,5	20,0	93	69,1	0,74		69,1	1,7	7,4	
25	18.05. bis 23.05.2016	2	5,4	795	1,1	10,0	54	43,1	0,80		43,1	0,3	4,9	
26	27.05. bis 01.06.2016	2	24,3	910	4,5	80,0	243	198,5	0,82	12,9	185,6	3,0	38,3	4,4
27	01.06.16	0	4,8	395	2,0	6,7	48	30,0	0,63		30,0	1,4	2,8	
28	02.06. bis 04.06.2016	0	14,7	540	4,5	86,7	147	92,8	0,63		92,8	1,8	29,8	
29	06.06.16	1	18,5	145	21,3	160,0	185	125,3	0,68	15,0	110,3	2,4	36,2	3,6
30	07.06. bis 14.06.2016	4	17,5	955	3,1	66,7	175	127,4	0,73		127,4	0,0	32,7	1,7
31	14.06. bis 15.06.2016	0	17	525	5,4	23,3	170	145,7	0,86	14,0	131,7	2,7	36,2	3,4
32	16.06. bis 25.06.2016	4	41,8	620	11,2	240,0	418	257,1	0,62	19,4	237,7	2,1	37,5	10,2
33	11.08. bis 29.08.2016	0	7,9	485	2,7	40,0	79	53,7	0,68		53,7	1,3	17,8	
34	09.09. bis 18.09.2016	11	8,3	390	3,5	26,7	83	63,2	0,76		63,2	0,0	18,5	
35	19.09. bis 27.09.2016	0	2,2	125	2,9	23,3	22	15,7	0,71		15,7	1,2	16,9	
36	28.09. bis 05.10.2016	2	10,9	1170	1,6	16,7	109	67,1	0,62		67,1	0,6	10,8	
37	12.10. bis 21.10.2016	4	6,9	680	1,7	10,0	69	36,9	0,53		36,9	0,3	4,6	
38	21.10. bis 25.10.2016	0	11,8	1410	1,4	10,0	118	87,6	0,74		87,6	0,8	4,3	
39	26.10. bis 07.11.2016	7	12,4	800	2,6	6,7	124	79,9	0,64		79,9	1,6	4,2	
40	07.11. bis 14.11.2016	0	20,9	2750	1,3	10,0	209	158,1	0,76		158,1	0,5	5,0	
41	14.11. bis 21.11.2016	3	21,0	1700	2,1	76,7	210	184,7	0,88	6,5	178,2	0,8	37,4	2,2
Summe										87,0	4133,7			37,2

Tabelle 3: Beschreibung der Probenahmezeiträume (* vor erstem Regenereignis)

P	pH-Wert [-]		LF [$\mu\text{S}/\text{cm}$]		AFS [mg/l]		Cu _{ges} [mg/l]		Zn _{ges} [mg/l]	
	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf	Zulauf	Ablauf
1	7,3	9,3	96	186	9	15	0,025	0,061	0,094	0,078
2	7,6	9,2	260	504	24	10	0,066	0,038	0,180	0,086
3	7,9	9,3	302	1.839	33	18	0,028	0,023	0,100	0,022
4	7,6	9,3	67	201	30	16	0,039	0,024	0,120	0,065
5	7,8	9,3	160	258	27	12	0,067	0,024	0,270	0,056
6	7,6	9,7	141	139	55	14	0,047	0,018	0,140	0,039
7	7,8	9,1	427	617	49	18	0,053	0,043	0,190	0,150
8	7,6	9,6	362	382	27	16	0,051	0,019	0,150	0,026
9	8,1	9,2	347	347	78	21	0,043	0,020	0,170	0,035
10	8,3	8,7	55	245	45	50	0,044	0,037	0,160	0,096
11	7,8	8,1	1.220	6.150	127	70	0,110	0,062	0,470	0,320
12	8,4	7,9	751	1.383	80	43	0,096	0,043	0,230	0,120
13	7,5	n.b.	2.800	n. b.	124	n. b.	0,089	n. b.	0,340	n. b.
14	7,9	8,1	1.855	3.800	115	22	0,088	0,031	0,025	0,082
15	7,4	7,1	291	1.765	70	19	0,110	0,075	0,290	0,100
16	7,8	7,2	5.520	1.748	127	49	0,150	0,072	0,520	0,094
17	7,7	7,5	329	1.194	184	51	0,170	0,084	0,580	0,190
18	7,3	7,2	1.122	2.980	588	110	0,490	0,085	1,600	0,340
19	7,3	7,5	3.180	4.690	243	30	0,180	0,031	0,595	0,084
20	7,2	7,6	2.180	6.090	56	42	0,080	0,070	0,280	0,290
21	7,1	7,0	5.470	1.557	75	36	0,083	0,049	0,250	0,170
22	7,6	8,0	307	368	360	24	0,260	0,052	0,830	0,160
23	7,9	7,8	1.522	2.790	94	16	0,100	0,028	0,310	0,078
24	7,2	7,3	347	2.072	90	62	0,110	0,033	0,310	0,093
25	7,9	8,2	1.087	1.555	124	41	n.b.	0,024	n.b.	0,046
26	7,1	7,7	92	211	306	63	0,190	0,070	0,560	0,175
27	7,3	7,8	200	251	84	20	0,110	0,055	0,240	0,144
28	7,1	7,6	111	205	143	46	0,150	0,068	0,420	0,233
29	7,3	7,4	344	234	174	76	0,086	0,063	0,280	0,231
30	7,4	7,8	217	684	67	71	0,053	0,057	0,140	0,168
31	7,4	7,9	117	208	128	68	0,061	0,054	0,190	0,178
32	7,7	7,7	436	357	169	55	0,056	0,042	0,210	0,175
33	7,0	7,7	151	231	123	26	0,160	0,030	0,340	0,089
34	7,0	6,7	51	121	38	22	0,054	0,046	0,120	0,110
35	6,5	6,9	127	94	79	11	0,150	0,016	0,350	0,037
36	6,9	7,4	89	150	53	30	0,110	0,039	0,170	0,067
37	7,2	8,2	166	197	66	11	0,085	0,018	0,170	0,032
38	7,3	7,7	100	179	44	15	0,039	0,027	0,092	0,075
39	7,1	7,3	2.340	843	48	15	0,056	0,021	0,240	0,100
40	7,3	7,6	2.720	2.720	81	39	0,076	0,039	0,300	0,180
41	7,4	7,6	1.055	3.010	224	108	0,220	0,092	0,650	0,320

Tabelle 4: Ergebnisse pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit LF, AFS, Cu_{ges} und Zn_{ges} im Zulauf und Ablauf. n. b.: nicht bestimmt: Ausfall Probenehmer, geringes Probenvolumen

mezeitraums wurde jeweils eine mittlere Standortkonzentration (mSK) gemäß (2) im Zulauf bestimmt.

$$mSK = \frac{\sum_1^{41} \text{Fracht AFS [g]}}{\sum_1^{41} \text{Volumen [m}^3\text{]}} \quad [\text{g/m}^3] \text{ bzw. } [\text{mg/l}] \quad (2)$$

Die mSK für Feststoffe im Zulauf betrug 139,4 mg/l AFS. Dieser Wert liegt in der gleichen Größenordnung des Medians von publizierten Jahres- bzw. Messzeitraumkonzentrationen an 29 Autobahnen in Deutschland, Österreich, der Schweiz, Frankreich, den Niederlanden, Großbritannien und den USA (Klein 1982; Shelley et al. 1987; Driscoll et al. 1990; Hewitt, Rashed 1992; Sansalone, Buchberger 1997; Berbee et al. 1999; Legret, Pagotto 1999; Glenn et al. 2002; Aryal et al. 2005; Geiger-Kaiser, Jäger 2005; Herrera 2007; Kayhanian et al. 2007b; Scheiwiller 2008 und 2014; Barret und Starnard 2008; Horwath und Bannermann 2009; BAST 2010, 2011 und 2017), ausgewertet mit dem Programm SPSS (IBM 2013) (Bild 6).

Die in dieser Studie ermittelten mSK für Schwermetalle lagen mit 359,5 µg/l für Zn_{ges} bzw. 158,9 µg/l für Cu_{ges} oberhalb der Literaturwerte, vgl. Bild 6. Als Vergleich diente eine ausführliche Literaturswertung von (Huber et al. 2016a). Hier beträgt die Konzentration in Autobahnabflüssen (Median) in nichtstädtischen, stark befahrenen Autobahnen > 30.000 DTV (vergleichbar mit der A 485 bei Gießen) für Zn_{ges} ca. 250 µg/l und für Cu_{ges} ca. 50 µg/l.

Die Ursachen für diese erhöhten Werte liegen zum einen in der Beprobung von zwei Winterzeiträumen, in denen generell mit erhöhten Stoffabträgen gerechnet werden muss (siehe oben). Zum anderen wird das Abtragsverhalten dieses Messprogramms von wenigen intensiven Abflussereignissen geprägt. Beispielweise kommt es bei P18 zu einem Frachtabtrag von 98 g Kupfer und 320 g Zink von der Verkehrsfläche. Würde man diesen Zeitraum aus der Berechnung herausnehmen, ergäbe sich eine deutlich geringere mSK von 292 µg/l Zn_{ges} und 141 µg/l Cu_{ges} . Die stofflichen Abträge sind also durch mehrere Einflussfaktoren geprägt und unterstreichen nochmals die Heterogenität von Verkehrsflächenabflüssen und den Einfluss der Beprobungszeiträume.

3.3.2 Bewertung der Ablaufkonzentration

Eine wichtige Kenngröße für die Beurteilung einer möglichen Gewässerbelastung ist die aus einer Behandlungsanlage in langen

Zeiträumen emittierte Stofffracht.

Gemäß dem Entwurf des Arbeitsblattes der DWA-A 102 werden für Regenabflüsse die feinen Feststoffe, ausgedrückt als AFS63 (Abfiltrierbare Feststoffe mit Korngrößen zwischen 0,45 und 63 µm), als maßgeblich für die Bewertung von relevanten Stoffemissionen definiert (DWA, 2016). Als rechnerische Bewertungsgröße für eine notwendige Behandlung von Regenabflüssen werden 280 kg feine Feststoffe (AFS63) je Hektar und Jahr festgesetzt (DWA 2016).

Um die Feststoffemissionen der untersuchten Behandlungsanlage zu bewerten, wurde zunächst die emittierte Stofffracht (AFS) aus dem Ablauf im gesamten Beprobungszeitraum (P1 bis P41) mit 156,7 kg/ha und 1,5 a berechnet. Die im Untersuchungsprogramm ermittelte Jahresfracht an Feststoffen im Ablauf bewegt sich je nach dem definierten Berechnungszeitraum (genau ein Jahr im 1,5-jährigen Messzeitraum) zwischen 135,6 und 144,1 kg AFS/(ha·a); (Szenario a (P1–P33): 144,1 kg AFS/(ha·a); Szenario b (P6–P34): 135,6 kg AFS/(ha·a); Szenario c (P10–P41): 142,4 kg AFS/(ha·a). Um die 30 % nicht beprobten Abflussvolumina/Frachten mit zu berücksichtigen, wurde angenommen, dass sich das Abtragsverhalten der Feststoffe im nicht beprobten Zeitraum analog zum Beprobungszeitraum darstellt. Dazu wurde eine qualitative Sichtung der Abflusscharakteristika dieser Zeiträume durchgeführt. Unter dieser Voraussetzung ergeben sich abhängig vom gewählten Berechnungszeitraum emittierte jährliche Feststofffrachten zwischen 195 und 207 kg AFS/(ha·a). Ausgehend von der Annahme, dass die Feststoffe im Ablauf der Anlage vorwiegend fein partikulär sind (AFS63 Anteil 90 %), lassen sich hieraus abhängig vom Berechnungszeitraum Frachten zwischen 175 und 186 kg AFS63/(ha·a) berechnen. Dies liegt trotz der Unsicherheiten durch die gewählten Berechnungsannahmen deutlich unter den Vorgaben der DWA (280 kg AFS63/(ha·a)) zur Einleitung in ein Oberflächengewässer.

Zur Bewertung der Rückhalteleistung von Feststoffen werden neben den emittierten Frachten auch anlagenbezogene Wirkungsgrade von Behandlungsanlagen in Bezug auf Stoffkonzentrationen publiziert. Die Berechnung eines direkten Konzentrations-Wirkungsgrades ist aufgrund einiger Beprobungslücken (s. o.) und der damit nicht immer gewährleisteten Zuordnung von Zulauf- zu Ablaufereignissen erschwert.

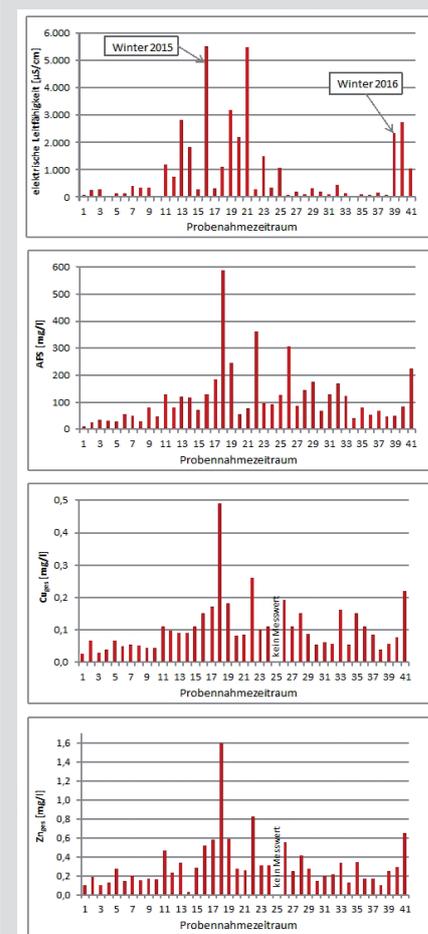


Bild 5: Elektrische Leitfähigkeit, AFS-, Cu_{ges} - und Zn_{ges} -Konzentrationen im Zulauf

Gleichwohl lassen sich mit den in Bild 7 dokumentierten AFS-Gehalten der Anlagenzulaufe, der Abläufe der Sedimentationsstufe (Mitte) und der Anlagenabläufe im Messzeitraum qualitative Trends aufzeigen.

Ein Rückhalt der Feststofffraktionen ist in der Sedimentationsstufe beim Vergleich zwischen Zulauf- und Mitteprouben und in der Filterstufe beim Vergleich zwischen Mitte- und Ablaufproben trotz größerer Konzentrationschwankungen gut zu erkennen. Extremwerte im Ablauf treten analog zu den Extremwerten im Zulauf aufgrund der bereits diskutierten vielfältigen Einflussfaktoren wie Niederschlagsextrema in Niederschlagsabflüssen auf.

Analog zu den Feststoffparametern unterlagen die Schwermetallkonzentrationen im Ablauf deutlichen Schwankungen (Bild 8). Verantwortlich dafür war insbesondere eine extrem niederschlagsintensive Messphase im Juni 2016, während dieser die Filter durch den Notüberlauf teilweise umfahren wurden und die Ablaufwerte außergewöhnlich hoch ausfielen. Auch die zuvor beschriebenen

Bild 6:

a) AFS, mSK dieser Studie sowie Median und Spannweite von Jahres- oder Messzeitraumkonzentrationen an 29 Autobahnen; überwiegend > 30.000 DTV
 b) Zn_{ges}
 c) Cu_{ges} jeweils mSK dieser Studie sowie Median und Spannweite von Jahres- oder Messzeitraumkonzentrationen in nichtstädtischen, stark befahrenen Autobahnen > 30.000 DTV aus [Huber et al. 2016a]

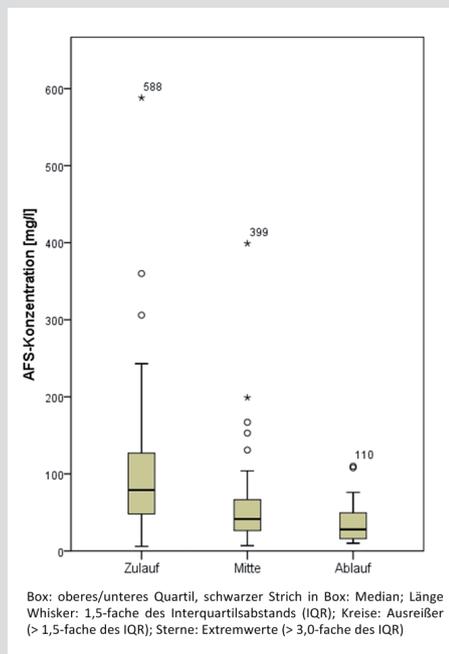
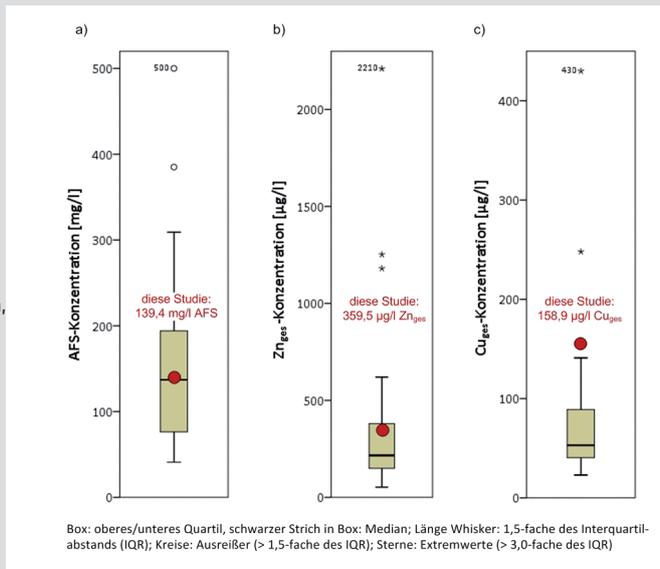


Bild 7: Vergleich der im Anlagenzulauf, nach der Sedimentationsstufe (Mitte) und im Anlagenablauf gemessenen Konzentrationen für Feststoffe (AFS_{gesamt}); n = 41 (Zulauf) bzw. n = 40 (Mitte und Ablauf)

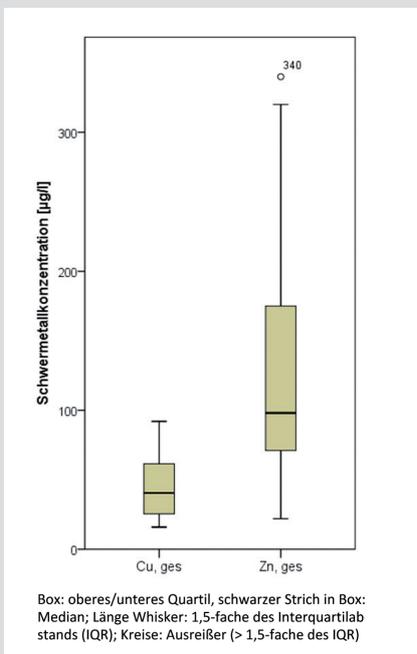


Bild 8: Qualitätsdaten im Anlagenablauf für die Schwermetalle Kupfer und Zink (gesamt) (n = 40) (P1–P41, außer P13)

jahreszeitlichen Effekte (Erhöhung der Schwermetallgehalte während des Winterdienstes im Zulauf der Anlage) führten phasenweise zu erhöhten Ablaufkonzentrationen.

Auftausalze in Behandlungsanlagen können auf verschiedene Prozesse des Stoffrückhaltes von Schwermetallen wirken.

Der erhöhte Salzgehalt führt zu einer Dispergierung von agglomerierten Feststoffen, sodass die Korngrößenverteilung im Verkehrsflächenabfluss in Richtung „fein“ verschoben wird (Schiller, Huwe 2013). Dazu kommt, dass durch den Salzanteil die Dich-

te des Wassers erhöht wird und damit die Absatzvorgänge erschwert sind (Huber et al. 2015). Da ein erheblicher Teil der Schwermetallabträge von Verkehrsflächen an Partikel assoziiert transportiert wird, ist die Sedimentation dieser Fraktion unter Salzeinfluss erschwert.

Auch in der Filtrationsstufe, in der vorwiegend gelöste Schwermetallanteile zurückgehalten werden, wirken sich Auftausalze negativ aus. Durch das im Auftausalz vorhandene Chlorid bilden sich mit einigen Schwermetallen Komplexe (insbesondere mit Cadmium), die verstärkt ausgetragen

werden (Norrström 2005; Nelson et al. 2009). Auch konkurrieren die in deutlich höheren Konzentrationen vorkommenden Kationen der Auftausalze (Faktor ca. 1.000:1) mit den Schwermetallen um die Sorptionsplätze der Ionentauscher und vermindern so den Rückhalt. Auch schon gebundene Schwermetalle können in Filtersystemen durch den Eintrag von Kationen aus den Auftausalzen (Na, Ca, Mg) gerade bei ionentauscherbasierten Filtersubstraten vermehrt ausgetragen werden (Athanasias, Helmreich 2005; Huber et al. 2016b).

Für die Bewertung von Belastungen durch Verkehrsflächenabflüsse in einem Oberflächengewässer sind bei vielen Stoffparametern nicht die einzelnen Extremwerte, sondern langfristige mittlere Belastungen wichtig. Deshalb wurde für die Bewertung der Schwermetalle die mittlere Standortkonzentration (mSK) analog zum Zulauf als volumengewichteter Mittelwert gemäß (2) berechnet. Durch die unterschiedliche Berechnungsgrundlage unterscheiden sich die mSK von den in Bild 8 dargestellten Medianen. Die mSK für Cu_{ges} betrug 49,4 $\mu\text{g/l}$ und 146,0 $\mu\text{g/l}$ für Zn_{ges} .

Für die Schwermetalle Kupfer und Zink existieren in der deutschen Oberflächengewässerverordnung (BMJV 2016) keine Vorgaben für Konzentrationen im Gewässer. Die in der Schweizer Gewässerschutz-Verordnung veröffentlichten Vorgaben liegen für Cu_{ges} bei 5 $\mu\text{g/l}$ und für Zn_{ges} bei 20 $\mu\text{g/l}$ (GSchV 2016). Bereits 1998 wurden von der deutschen Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) ähnliche Zielvorgaben für Fließgewässer für das Schutzgut aquatische Organismen festgesetzt. Sie liegen hier bei 4 $\mu\text{g/l}$ für Cu_{ges} bzw. 14 $\mu\text{g/l}$ für Zn_{ges} (LAWA 1998). Ebenfalls von der LAWA sind 2016 die sogenannten Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS) für Kupfer und Zink veröffentlicht worden, die beim Eintritt in das Grundwasser gelten (Cu : 5,4 $\mu\text{g/l}$, Zn : 60 $\mu\text{g/l}$) (LAWA 2017). Zwar steht die Einleitung in das Grundwasser in diesem Projekt nicht im Vordergrund. Die Vorgaben lassen sich jedoch unter der Voraussetzung angepasster Randbedingungen für einen Vergleich heranziehen, da die Grundlagen für die Ableitung der GFS teilweise an Oberflächengewässerorganismen vorgenommen wurden.

Die dargestellten mSK für Cu_{ges} und Zn_{ges} im Ablauf der Anlage überschreiten zwar die Wertebereiche der genannten Gewässervorgaben. Beim Vergleich der Emissionen (Ablauf der Anlage) mit Immissionsvorgaben

(Konzentrationen im Oberflächengewässer) und Bewertung der potenziellen Schwermetallbelastung ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei einer Einleitung von Niederschlagsabflüssen eine Verdünnung im Oberflächengewässer stattfindet. Eine Bilanzierung ist daher immer abhängig vom Verhältnis der Einleitungsmenge zum Gewässerabfluss und von der Basisbelastung des Oberflächengewässers und nur im Einzelfall zu bewerten.

Um die Leistungsfähigkeit der Behandlungsanlage bezüglich des Schwermetallrückhaltes aus technischer Sicht zu verbessern, könnte das Filtersubstrat mit höheren Anteilen an Zeolith bestückt werden. Der eingesetzte Prototyp der beschriebenen Anlage war dazu konzipiert, um neben gelösten Schwermetallen Phosphate zu eliminieren (Welker et al. 2017; Huber et al. 2017). Die Filter waren daher zu 2/3 mit einem Calciumsilikat und nur zu 1/3 mit einem für den Schwermetallrückhalt wirkungsvollen Zeolith gefüllt. Des Weiteren könnten mit einer Verbesserung der hydraulischen Leistungsfähigkeit durch eine Verringerung der Oberflächenbeschickung (größere Filteroberfläche) bzw. baulichen Erhöhung der Notüberläufe die stofflichen Belastungen mit Schwermetallen aus Autobahnabflüssen für Gewässer deutlich verringert werden.

4 Schlussfolgerungen

Messprogramme an Behandlungsanlagen unter Feldbedingungen liefern wertvolle Erkenntnisse zur Bewertung von stofflichen Emissionen aus Niederschlagsabflüssen von Verkehrsflächen. Des Weiteren ermöglichen sie die Bewertung der Leistungsfähigkeit von Behandlungsanlagen und leisten damit einen wertvollen Beitrag zum Gewässerschutz.

Die Ergebnisse des in diesem Beitrag vorgestellten Messprogramms verdeutlichen die hohe Heterogenität der Quantität und Qualität von Niederschlagsabflüssen von Verkehrsflächen. Dies liegt zum einen an witterungsbedingten Faktoren (niederschlagsreicher Juni 2016), zum anderen an ortsspezifischen Besonderheiten (hier: Salzen der Fahrbahnen im Winter).

Problematisch an vielbefahrenen Straßen, nicht nur für Filter- oder Substratanlagen, sondern auch für die belebte Bodenschicht bei der Versickerung, ist die Verfrachtung von Salzen aus der Winterstreusalzung in das Substrat. Positiv geladene Salzionen (in der Reihenfolge $Ca > Mg > Na$) aus Salzmi-

schungen sind in der Lage, bereits gebundene Schwermetallionen gleicher Ladung wieder auszutauschen und in den Boden oder in ein Oberflächengewässer zu verfrachten (Huber et al. 2016b).

Die untersuchte zweiteilige Behandlungsanlage, bestehend aus einer Sedimentations- und einer Filterstufe, konnte eine deutliche Rückhalteleistung für den Parameter AFS zeigen. Die Leistungsfähigkeit bezüglich des Schwermetallrückhaltes (Kupfer und Zink) konnte die vorhandenen Vorgaben für Oberflächengewässer ohne Berücksichtigung eines Verdünnungsfaktors nicht erreichen. Die Rückhalteleistung für Schwermetalle könnte jedoch durch Vergrößerung der Filteroberfläche und Erhöhung der Notüberläufe zur Steigerung der hydraulischen Leistungsfähigkeit sowie durch die Erhöhung der Zeolithschicht in den Filtern gesteigert werden.

Während des Messprogrammes wurde die Anlage für einen Feststoffversuch einmal geleert und gesäubert. Hierbei konnten erste Erfahrungen zur Wartung gemacht werden. Ein zukünftiges Augenmerk ist auf den Betrieb und die Kontrolle dieser Anlage zu legen und darauf, die Erfahrungen auch an anderen Örtlichkeiten zu sammeln und zu dokumentieren.

Aus baulicher Perspektive ist mit der Entwicklung der beschriebenen Anlage der Lückenschluss zwischen dezentralen Anlagen (die oft nur für wenige 100 m² konzipiert sind) und zentralen Anlagen (für den Anschluss mehrerer Hektar) gelungen. Es steht nun eine weitere Anlagengröße zur Verfügung, deren Einbau im verdichteten urbanen Raum oder punktuell bei besonderen Belastungssituationen möglich ist.

Dank



Für die finanzielle Förderung des HA-Projektes-Nr. 453/14-43: Hessisches Ministerium für Wissenschaft und Kunst – Hessen Modellprojekte aus Mitteln der LOEWE-Landes-Offensive zur Entwicklung wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz, Förderlinie 3: KMU-Verbundvorhaben

Literaturverzeichnis

- Aryal, R. K.; Furumai, H.; Nakajima, F.; Boller, M. (2005): Dynamic behavior of fractional suspended solids and particle bound polycyclic aromatic hydrocarbons in highway runoff. *Water Research*, 39, 5.126-5.134. DOI: 10.1016/j.watres.2005.09.045
- Athanasiadis, K.; Helmreich, B. (2005): Influence of chemical conditioning on the ion exchange capacity and on kinetic of zinc uptake by clinoptilolite. *Water Research* 39 (2005) Nr. 8, S. 1527-1532 DOI: 10.1016/j.watres.2005.01.024
- Barret, M.; Stanard, C. (2008): Effects of the Permeable Friction Course (PFC) on Highway Runoff. *Proceedings, 11th International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh, Scotland, UK
- Bundesanstalt für Straßenwesen (Bast) (2010): Stoffeintrag in Straßenrandböden, Messzeitraum 2005/2006. Bearbeiter: Kocher, B.; Brose, S.; Chlubek A.; Karagüzel, N.; Klein, N.; Siebertz, I.; Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Heft V 198, Bergisch Gladbach, 2010. ISBN: 978-3-86918-056-4
- Bundesanstalt für Straßenwesen (Bast) (2011): Stoffeintrag in Straßenrandböden – Messzeitraum 2008/2009. Bearbeiter: Beer, F.; Surkus, B.; Kocher, B.; Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Heft V 209, Bergisch Gladbach, November 2011. ISBN 978-3-86918-155-4
- Bundesanstalt für Straßenwesen (Bast) (2017): Konzentrationen und Frachten organischer Schadstoffe im Straßenabfluss. Bearbeiter: Grothmann, D.; Lambert, B.; Fuchs, S.; Graf, J.; Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Heft V 295, Bergisch Gladbach, Dezember 2017. ISBN 978-3-95606-246-6



- Berbee, R.; Rijs, G.; Brouwer, R.; Velzen, L. (1999): Characterization and treatment of runoff from highways in the Netherlands paved with impervious and pervious asphalt. *Water Environment Research*, Vol. 71, No. 2, 183–190 DOI:10.2175/06143098X121914
- BMJV (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz) (2016): Oberflächengewässerverordnung (OGewV) vom 20. Juni 2016. BGBl. I S. 1373
- DIN 38409-41 (1980): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H); Bestimmung des Chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) im Bereich über 15 mg/l (H 41), deutsche Fassung Dezember 1980
- DIN EN 872 (2005): Wasserbeschaffenheit – Bestimmung suspendierter Stoffe – Verfahren durch Abtrennung mittels Glasfaserfilter; deutsche Fassung April 2005
- DIN EN ISO 6878 (2004): Wasserbeschaffenheit – Bestimmung von Phosphor – Photometrisches Verfahren mittels Ammoniummolybdat; deutsche Fassung September 2004
- DIN EN ISO 17294-2 (2017): Wasserbeschaffenheit – Anwendung der induktiv gekoppelten Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) - Teil 2: Bestimmung von ausgewählten Elementen einschließlich Uran-Isotope, deutsche Fassung 2016
- Driscoll, E.; Shelley, P.; Strecker, E. W. (1990): Pollutant Loadings and Impacts from Highway Stormwater Runoff, Volume 1-4, FHWA/RD-88-006-9, Federal Highway Administration, Woodward-Clyde Consultants, Oakland, CA, 1990
- DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.) (2016): Entwurf Arbeitsblatt DWA-A 102. Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer. ISBN 978-3-88721-383-1
- DWD (Deutscher Wetterdienst) (2016): Historische Niederschlagsdaten der Station-Nr. 1639, Gießen-Wettenberg, CDC FTP-Server Messwerte. Aus: ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/observations_germany/climate/daily/more_precip
- FGSV, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2005): Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS), Teil: Entwässerung (RAS-Ew), FGSV Verlag, Köln, Ausgabe 2005. ISBN 3-937356-69-X
- Geiger-Kaiser, M.; Jäger, P. (2005): Wirksamkeit von Retentionsfilterbecken zur Reinigung von Straßenoberflächenwässern. Reihe Gewässerschutz – Reinigung von Straßenabwässern. Amt der Salzburger Landesregierung, Band 11, Salzburg, 2005. ISBN 3-901934-09-X
- Glenn, D.; Liu, D.; Sansalone, J. (2002): Influence of chemistry, hydrology and suspended solids on partitioning of heavy metals to particles – considerations for in-situ control of urban stormwater quality. Proceedings “9th International Conference on Urban Storm Drainage”, Portland, USA
- GSchV (2016): Gewässerschutzverordnung des Schweizerischen Bundesrats (814.201) vom 28. Oktober 1998, Stand am 2. Februar 2016
- Hanke, H. (2015): Einsatz von Salzlösungen im Winterdienst. Straße und Autobahn, Nr. 1, 34–38. Kirschbaum Verlag, Bonn
- Helmreich B.; Hilliges, R.; Schriewer, A.; Athanasiadis, K. (2005): Schadstoffe aus Niederschlagsabflüssen und deren Bewertung, Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft, TU München, Nr. 185, 2005; 35–48. ISSN 0942-914X
- Herrera Environmental Consultants (2007): Untreated Highway Runoff in Western Washington. White Paper prepared for Washington State Department of Transportation, Seattle, May 2007
- Hessen Mobil - Straßen- und Verkehrsmanagement (2015): Straßenverkehrszählung 2015. Aus: <https://mobil.hessen.de/%C3%BCber-uns/downloads-formulare/stra%C3%9Fenverkehrsza%C3%A4hlung-2015>
- Hessen Mobil - Straßen- und Verkehrsmanagement (2018): Einsatz Streusalz an der A 485, persönliche Mitteilung Herr Rüffer, Autobahnmeisterei Reiskirchen
- Hewitt, C. N.; Rashed, M. B. (1992): Removal rates of selected pollutants in the runoff waters from a major rural highway. *Water Research*, Vol. 26, No. 3, 311–319. DOI: 10.1016/0043-1354(92)90028-3
- Hilliges, R.; Endres, M.; Tiffert, A.; Brenner, E.; Marks, T. (2017): Characterization of road runoff with regard to seasonal variations, particle size distribution and the correlation of fine particles and pollutants. *Water Science & Technology* 75(5), 2017, 1169–1176. DOI: 10.2166/wst.2016.576
- Horwath, J. A.; Banner, R. T. (2009): Pollutant Loading to Stormwater Runoff from Highways: Impact of a Highway Sweeping Program. Pahse II, Madison, Wisconsin. Wisconsin Department of Transportation Research, Development & Technology Transfer. Final Report No. 0092-04-04, 1/2009
- Huber, M.; Welker, A.; Drewes, J.E.; Helmreich, B. (2015): Auftausalze im Straßenwinterdienst – Aufkommen und Bedeutung für dezentrale Behandlungsanlagen von Verkehrsflächenabflüssen zur Versickerung. *gwf – wasser abwasser* 11/2015. 1138–1152. Print-ISSN: 0016-3651
- Huber, M.; Welker, A.; Helmreich, B. (2016a): Critical review of heavy metal pollution of traffic area runoff: Occurrence, influence factors, and partitioning. *Science of the Total Environment*, 541 (2016), 895–919. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.09.033
- Huber, M.; Hilbig, H.; Badenberger, S. C.; Fassnacht, J.; Drewes, J. E.; Helmreich, B. (2016b): Heavy metal removal mechanisms of sorptive filter materials for road runoff treatment and remobilization under de-icing salt applications. *Water Research* 102 (2016) 453–463. DOI: 10.1016/j.watres.2016.06.063
- Huber, M.; Welker, A.; Hilbig, H.; Wulff, M.; Helmreich, B. (2017): Vergleich zweier Filtermaterialien zur Entfernung von Phosphat und Schwermetallen aus Verkehrsflächenabflüssen. *gwf Wasser Abwasser*, (158), Nr. 3, 99–112. ISBN: 978-3-83567-366-3
- IBM (2013): SPSS-statistics base, Version 22
- Kayhanian M.; Stransky C.; Bay S.; Lau S.L.; Stenstrom M. K. (2007a): Toxicity of urban highway runoff with respect to storm duration. *Science of the Total Environment* 2007; 389: 386–406 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.08.052
- Kayhanian, M.; Suverkrupp, C.; Ruby, A.; Tsay, K. (2007b): Characterization and prediction of highway runoff constituent event mean concentration. *Journal of Environment Management* 85 (2007), 279–295. DOI: 10.1016/j.jenvman.2006.09.024
- Kaufmann, P. (2006): Der Straßenwasser-Filter-schacht – ein Forschungsprojekt der Berner Fachhochschule. Vortrag am VSA-Kanalisationsforum. Bern, 2006. Aus: http://www.vsa.ch/fileadmin/user_upload/Redaktion/Verbandsberichte/2006_565-570/569_13_Kaufmann.pdf
- Klein, H. (1982): Die Beschaffenheit der Niederschlagsabflüsse von Autobahnen. *Wasserwirtschaft*, Jahrg. 72, Heft 2, 37–43
- Lambert, B. (2011): Prüfung von dezentralen Straßenabflussbehandlungsverfahren im Feld. Seminar: Dezentrale Behandlung von Niederschlagsabflüssen am 12. Mai 2011 an der FH Frankfurt
- LAWA (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser) (1998): Zielvorgaben zum Schutz oberirdischer Binnengewässer, Band II - Schwermetalle. Kulturbuch Verlag Berlin. ISBN: 3-88961-216-4
- LAWA (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser) (2017): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser. Aktualisierte und überarbeitete Fassung 2016. Bearbeiter: Dieter, H. H.; Frank, D.; Gier, R.; Konietzka, R.; Moll, B.; Quadflieg, A.; Stockerl, R.; von der Trenck, T.; Schudoma, D.; Zedler, B.; Brodsky. Stuttgart, Januar 2017. Kulturbuch-Verlag, Berlin. ISBN: 978-3-8440-3528-5.
- Legret, M.; Pagotto, C. (1999): Evaluation of Pollutant Loadings in the Runoff Waters from a Major Rural Highway. *The Science of the Total Environment* 235 (1999), 143–150. DOI: 10.1016/S0048-9697(99)00207-7
- Nadler, A.; Meißner, E. (2008): Bodenkundliche Untersuchungen im Rahmen des Entwicklungsvorhabens „Versickerung des Niederschlagswassers von befestigten Verkehrsflächen“. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hrg., Augsburg, 2008
- Nelson, S.; Yonge, D.; Barber, M. (2009): Effects of road salts on heavy metal mobility in two Eastern Washington soils. *Journal of Environmental Engineering* 135, 505–510. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2009)135:7(505)
- Norrström, A. C. (2005): Metal mobility by de-icing salt from an infiltration trench for highway runoff. *Applied Geochemistry* 20, 1907–1919. DOI:10.1016/j.apgeochem.2005.06.002
- Pitt R.; Field R.; Lalor M.; Brown M. (1995): Urban Stormwater Toxic Pollutants: Assessment, Sources, and Treatability. *Water Environment Research*; 67: 260-275. DOI: 10.2175/106143095X13
- Sakson, G.; Brzezinska, A.; Zawilski, M. (2018): Emission of heavy metals from an urban catchment into receiving water and possibility of its limitation on the example of Lodz city. *Environ Monit Assess* (2018) 190–281. Springer-Verlag. DOI: 10.1007/s10661-018-6648-9
- Sansalone J. J.; Buchberger, S. G. (1997): Characterization of Solid and Metal Element Distributions in Urban Highway Stormwater. *Water Science and Technology*, 36 (8-9), 155–160. DOI: 10.1016/S0273-1223(97)00605-7
- Schewiller, E. (2008): Schadstoffabschwemmungen am Beispiel von Hochleistungsstrassen. *gwa* 7/2008. 539–546
- Schewiller, E. (2014): SABA Pfaffensteig (Bümpliz) – Probebetrieb und Leistungsprüfung der SABA mit technischem Filter im Jahr 2012/13, im Auftrag der ASTRA Filiale Thun, Bern, 5.9.2014
- Schiller, B.; Huwe, C. (2013): Saubere Lösung: Rinnenfilter entlasten das Grundwasser und die kommunalen Kassen. *fbr-wasser spiegel* 1/13, 15–17
- Shelley, P. E.; Driscoll, E. D.; Sartor, J. D. (1987): Probabilistic Characterization of Pollutant Discharges from Highway Stormwater Runoff. *The Science of the Total Environment*, 59, 401–410
- Welker, A.; Dierkes, C.; Dierschke, M.; Huber, M. (2017): Evaluation of novel sorption media filter materials for the advanced treatment of stormwater runoff from highways. Proceedings der ICUD (International Conference on Urban Drainage), 10.–15. September 2017, Prag, Tschechien