

REduktion des FEststoffeintrages durch Niederschlagswassereinleitungen Phase 2

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Berichtsteil 1/2

Auftraggeber
MULNV NRW

Deutsche Vereinigung für Wasserwirt-
schaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA)

Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Wasser und Gewässerent-
wicklung
Bereich Siedlungswasserwirtschaft und
Wassergütewirtschaft
PD Dr.-Ing. Stephan Fuchs

Technische Universität Kaiserslautern,
Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft
Prof. Dr.-Ing. Theo G. Schmitt

Fachhochschule Münster
Fachbereich Bauingenieurwesen
Institut für Infrastruktur · Wasser ·
Ressourcen · Umwelt
Prof. Dr.-Ing. Rainer Mohn

Januar 2019

REduktion des FEststoffeintrages durch Niederschlagswassereinleitungen – Phase 2

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Berichtsteil 1/2

Projektbearbeitung

KIT

PD Dr.-Ing. Stephan Fuchs
Dr.-Ing. Dipl. Geoökol. Mike Kemper
Dr. rer. nat. Karoline Morling

FH Münster

Simon Ebbert M.Sc
Prof. Dr.-Ing. Rainer Mohn
Simon Precht B.Eng.
Dr.-Ing. Nina Voßwinkel
Maïke Wietbüscher M.Sc.

TU Kaiserslautern

Prof. Dr.-Ing. Theo G. Schmitt

DWA

Dipl.-Ing. Christian Berger

Auftraggeber

Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft,
Natur- und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben

**REduktion des FEststoffeintrages durch
Niederschlagswassereinleitungen (REFENI) Phase 2**

Berichtsteil 1/2

Auftraggeber MULNV NRW

Januar 2019

Karlsruher Institut für Technologie –
Institut für Wasser und Gewässerentwicklung
Fachbereich Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütewirtschaft

Wir bedanken uns vielmals bei dem Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen für die Förderung des Vorhabens.

Für die gute Zusammenarbeit bedanken wir uns außerdem bei den Projektpartnern.

Das Vorhaben wurde in Kooperation mit der Fachhochschule Münster und deren Institut für Infrastruktur – Wasser – Ressourcen – Umwelt (IWARU) bearbeitet. Deren Ergebnisse werden in dem Berichtsteil 2/2 des Abschlussberichtes zum Forschungsvorhaben „Reduktion des Feststoffeintrages durch Niederschlagswassereinleitungen Phase 2“ zusammengestellt. Das Forschungsvorhaben wurde außerdem durch Christian Berger (DWA) und durch Prof. Dr.-Ing. Theo Schmitt der TU Kaiserslautern begleitet.

Unser Dank gilt auch Frau Farnaz Sahebi und Herrn Joseph Ngari, die im Rahmen des Vorhabens ihre Masterarbeit abgeschlossen haben.

Zitierweise:

Kemper, M., Fuchs, S., Morling, K. (2018): Reduktion des Feststoffeintrages durch Niederschlagswassereinleitungen – Phase 2 – Berichtsteil 1/2

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Bilder	III
Abkürzungsverzeichnis	VII
Vorwort	VIII
Zusammenfassung	X
1 Veranlassung und Zielstellung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Feststoffe im urbanen Raum	3
2.2 Emissionsquellen	3
2.2.1 Verkehr	3
2.2.2 Wohn- und Industrieflächen	4
2.2.3 Vegetation und Grünflächen	4
2.3 Akkumulation und Verteilung auf urbanen Flächen	5
2.4 Rauheit	9
2.5 Behandlung von Niederschlagswasser	11
3 Material und Methoden	12
3.1 Monitoring der Einzugsgebiete und Regenklärbecken	12
3.1.1 Lochfeld	14
3.1.2 Federbach (ehemals „Im Wöhr“)	16
3.2 Analysemethoden	19
3.2.1 Verkehrsfrequenz	19
3.2.2 Oberflächentexturtiefe (Rauheit)	20
3.2.3 Beprobung der Straßen und Gehwege	21
3.2.4 Feststoffsammler	24
3.2.5 Feststoffkonzentration	25
3.2.6 Trübungssonden	26
3.2.7 Auswertung der Trübungsmessungen	27
4 Ergebnisse	28
4.1 Einzugsgebietscharakterisierung Rastatt	28
4.1.1 Differenzierte Flächenaufnahme	28
4.1.2 Verkehrsfrequenz	30
4.1.3 Oberflächentexturtiefe	33
4.1.4 Feststoffcharakteristik	34
4.1.5 Feststoffaufkommen der Einzugsgebiete Lochfeld und Federbach	38
4.1.6 Verteilung der Feststoffe auf Straßen	45

4.1.7	Überprüfung des Feststoffdargebots auf Straßen in Zusammenhang mit dem Niederschlag	48
4.1.8	Berechnung des Feststoffdargebotes in den Einzugsgebieten	52
4.2	Untersuchungen der Regenklärbecken	53
4.2.1	Gewichtsanteile und Glühverluste der Feststoffe	53
4.2.2	Metall- und Nährstoffanalyse der Feststoffe	55
4.2.3	Feststoffkonzentration und Frachten	57
4.2.4	Oberflächenbeschickung	58
4.2.5	Trübungsmessungen in der Sedimentationskammer	59
5	Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse	65
5.1	Übergreifende Betrachtung der Feststoffcharakteristik aus den Einzugsgebieten und Regenbecken.	66
5.2	Bilanzierung der Feststofffracht	68
6	Empfehlungen	70
7	Anhang	72
7.1	Feststoffkonzentrationen im urbanen Raum	72
7.2	Quellen ausgewählter Metalle und Phosphor	73
7.3	Verkehrsmessungen	73
7.4	Differenzierung des standardisierten Messfensters in Rinnstein und Fahrbahn	75
7.5	Feststoffdargebot auf Gehwegen	77
7.6	Metallkonzentrationen im Straßensediment	78
7.7	Feststoffcharakteristik Regenklärbecken	80
8	Literaturverzeichnis	82

Verzeichnis der Bilder

Bild 2.1:	Verteilung von Kornfraktionen über ein halbes Straßenquerprofil (Grottker, 1987)	6
Bild 2.2:	Akkumulations-Abtrags-Kurve (Grottker, 1987).....	7
Bild 2.3:	Korngrößenverteilung über den Transportweg (Kemper, 2018).....	8
Bild 2.4:	Unterteilung der Rauheit von Fahrbahnoberflächen nach Wellenlängenbereichen (Momber und Schulz, 2006).....	10
Bild 3.1:	Lage und Einzugsgebiete der Regenklärbecken Federbach und Lochfeld	13
Bild 3.2:	Messstellen A1 Lochfeld (links) und A2 Stockfeld (rechts) im EZG Lochfeld	14
Bild 3.3:	Schemaskizze RKB Lochfeld.....	15
Bild 3.4:	Ansicht auf die Lamellenwand Richtung Sedimentationskammer.....	15
Bild 3.5:	Zulaufgerinne mit Geschiebeschacht u. beidseitigen Federstaublechen	15
Bild 3.6:	Beprobte Straßen im Einzugsgebiet des RKB Federbach.....	17
Bild 3.7:	Schemaskizze RKB Federbach (ehemals „Im Wöhr“).....	18
Bild 3.8:	RKB Federbach, links = Blick Richtung Zulauf und Verteilerbauwerk (Lamellenwand), rechts = Blick vom Zulauf Richtung Klärüberlauf	19
Bild 3.9:	Ausbringung und Verteilung der Glaskugeln sowie Vermessung des Kreisdurchmessers Griesbaum (2017)	21
Bild 3.10:	Lage der Probenahmestelle.....	22
Bild 3.11:	Probenahmestelle der Straßen- (links) und Gehwege (rechts).....	23
Bild 3.12:	Schema zur Behandlung der Proben aus den Feststoffsammlern	24
Bild 3.13:	Positionierung der Trübungssonden im RKB Federbach	26
Bild 3.14:	Auswertung der Trübungsmessungen am Beispiel eines Regenereignisses am 11.09.2017.....	27
Bild 4.1:	Differenzierung der Einzugsgebiete anhand der Flächenanteile der Dachfläche, Parkplätze und Hofflächen sowie Straßen und Gehwege	29
Bild 4.2:	Verkehrsaufkommen innerhalb einer Woche am Beispiel des Messpunktes 4 Rauentaler Straße im Einzugsgebiet des RKB Federbach.....	31
Bild 4.3:	Durchschnittliches Kfz-Aufkommen pro Tag.....	32
Bild 4.4:	Prozentuale Anteile der Kfz nach Art.....	33
Bild 4.5:	Mittlere Oberflächentexturtiefe.....	34
Bild 4.6:	Gewichtsanteile der Trockensubstanz für den Datenbestand der Straßenproben.....	35
Bild 4.7:	Glühverluste der Kornfraktionen für den Datenbestand der Straßenproben	36
Bild 4.8:	Saisonale Variabilität des Glühverlustes	36
Bild 4.9:	Sieblinien (TS) der Messstellen vom 15.01.2018 (orange = EZG Lochfeld, schwarz = EZG Federbach).....	37

Bild 4.10:	Summe Trockensubstanz in g/m ² (links: gesamter Datenbestand, rechts differenziert nach Messstellen).....	39
Bild 4.11:	Trockensubstanz der Fraktion < 0,063 mm in g/m ²	40
Bild 4.12:	DTV und Feststoffaufkommen (Gesamtfraktion und Fraktion < 0,063 mm).....	40
Bild 4.13:	Variabilität des Feststoffaufkommens der Messstellen in Summe, differenziert nach Einzugsgebiet und Jahreszeit.....	41
Bild 4.14:	Konzentrationen von Zink, Kuper, Blei und Eisen im Straßensediment der Einzugsgebiete Lochfeld und Federbach in der Kornfraktion < 63 µm (n = 8) ...	43
Bild 4.15:	Zeitchronologische Darstellung der Zink-Konzentrationen im EZG Lochfeld.....	44
Bild 4.16:	Korrelation DTV und Konzentrationen von Metallen an Straßensedimenten	45
Bild 4.17:	Feststoffverteilung auf der Stockfeldstraße am 14.02.2018 (Messstelle 1-3 Rinnstein, Messstelle 4-5 Fahrbahn).....	46
Bild 4.18:	Ermittlung des Korrekturfaktors für die Berechnung der Fracht einer Straßenabschnittsfläche basierend auf dem gewichteten Mittel.....	48
Bild 4.19:	Niederschlagsdaten für das Untersuchungsgebiet.....	48
Bild 4.20:	Feststoffaufkommen in Abhängigkeit von der Zeit zwischen den Probenahmen am Beispiel des EZG Federbach.....	50
Bild 4.21:	Zusammenhang zwischen Feststoffaufkommen und Niederschlagshöhe am Beispiel der Trockensubstanz (Fraktion <0,063 mm) des EZG Federbach.....	51
Bild 4.22:	Feststoffdargebot (TS) der Fraktion < 0,063 mm im Zusammenhang mit dem Auftreten der maximalen Intensität der Regenereignisse am Beispiel EZG Federbach.....	51
Bild 4.23:	Gewichtsprozent der Kornfraktionen aus dem Zulauf der Regenklärbecken Lochfeld und Federbach.....	54
Bild 4.24:	Glühverlust der Kornfraktionen am Regenklärbecken Federbach.....	55
Bild 4.25:	Feststoffkonzentration der Kornfraktion < 0,063 mm im Zu- und Abfluss während der Entlastung für den Messzeitraum 2017/2018 (REFENI II).....	58
Bild 4.26:	Häufigkeitsverteilung der mittleren und maximalen Oberflächenbeschickungen im Untersuchungszeitraum am RKB Federbach....	59
Bild 4.27:	Mittlere Intensität und Dauer der ausgewerteten Regenereignisse im Frühling und Herbst 2017 sowie im Winter 2018 (n = 63).....	60
Bild 4.28:	Saisonale Unterschiede in den mittleren (links) und maximalen Trübungswerten (rechts) (einfaktorielle ANOVA, p < 0,001). MW – Mittelwert, Max. – Maximum.....	61
Bild 4.29:	Maximalwerte der Trübung in Abhängigkeit von der Dauer der vorherigen Trockenperiode (einfaktorielle ANOVA, p < 0,03). Max. - Maximum.....	61
Bild 4.30:	Schematische Darstellung von beobachteten Reaktionen im Messverlauf der Trübung im Zulauf des RKB Federbachs während eines Regenereignisses.	62

Bild 4.31:	Beobachtete Reaktionen im Messverlauf der Trübung im Zulauf des RKB Federbachs in Abhängigkeit von der Dauer der vorherigen Trockenperiode.	62
Bild 4.32:	Vergleich der Trübungsmessungen im Zulauf, Mitte und Ablauf des RKB Federbach für zwei Regenereignisse im Frühling 2017 mit geringer (1,1 mm/h; oben) und hoher (12,5 mm/h; unten) Intensität. Die grauen Hintergrundlinien zeigen die Rohdaten, während die schwarzen Linien die geglätteten Werte darstellen (siehe Abschnitt 3.4.5).	64
Bild 5.1:	Gewichtsanteile der Trockensubstanz der beprobten Straßen und Regenbecken.....	67
Bild 5.2:	Anteile des Glühverlustes in den Einzugsgebieten (Grafik links) und in den Regenbecken (Grafik rechts).....	68
Bild 7.1:	Aufkommen von abfiltrierbaren Stoffen (AFS gesamt) im Niederschlagsabfluss von Dach-, Verkehrs- und Mischflächen aus Welker, 2005 zitiert in DWA-A 102 (2016).....	72
Bild 7.2:	Durchschnittliche Geschwindigkeit der Kfz in km/h	73
Bild 7.3:	Anteile des Kfz-Verkehr nach der Fahrtrichtung.....	74
Bild 7.4:	Probenahmefläche differenziert nach Rinnstein (R) und Fahrbahn (F).	75
Bild 7.5:	TS in g/m ² differenziert nach Rinnstein und Fahrbahnrand	76
Bild 7.6:	Zusammenhang des Feststoffaufkommens von Gehwegen mit den angrenzenden Straßen.....	77
Bild 7.7:	Zeitreihen für Metallkonzentrationen in dem Straßensediment	79
Bild 7.8:	Gewichtsprozent der Kornfraktionen der Zu- und Ablaufproben des Regenklärbeckens Federbach.....	80
Bild 7.9:	Zulaufkonzentrationen an dem RKB Lochfeld aus REFENI I und II	80
Bild 7.10:	Zulaufkonzentrationen an dem RKB Federbach aus REFENI I und II.....	81

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2.1: Textureigenschaften der drei unterschiedlichen Probeflächen (Wicke et al., 2012)	10
Tabelle 2.2: Auszug der Kategorien des Niederschlagsabflusses bebauter oder befestigter Flächen nach dem DWA-Arbeitsblatt 102 (Tabelle 3)	11
Tabelle 3.1: Liste der Messstellen	16
Tabelle 3.2: Straßenbreite an den Messstellen	23
Tabelle 3.3: Verwendete Analysemethoden	25
Tabelle 4.1: Differenzierung der Einzugsgebietsfläche nach der Nutzung	30
Tabelle 4.2: Vergleich der Gewichtsanteile der Sieblinie mit dem Gesamtdatenbestand	37
Tabelle 4.3: Trockensubstanz der gesamten Feststoffmasse in g/m ² (Untersuchungszeitraum 10/2016 – 02/2018)	39
Tabelle 4.4: Verteilung der Metallbeladung der verschiedenen Korngrößen (n = 8)	42
Tabelle 4.5: Vergleich der Metallkonzentrationen (Mediane) von Feststoffen aus Autobahnabflüssen mit Straßenkehricht aus den Einzugsgebieten Lochfeld und Federbach	44
Tabelle 4.6: Auswertung der Niederschlagsdaten	49
Tabelle 4.7: Spezifisches Feststoffdargebot der Fraktion < 0,063 mm in den Einzugsgebieten	52
Tabelle 4.8: Median-Konzentrationen für Zink, Kupfer, Blei, Cadmium, Eisen, Phosphor gesamt im Zu- und Ablauf der Regenklärbecken für die Kornfraktion < 0,063 mm	56
Tabelle 4.9: Vergleich Metallkonzentrationen (Mediane) von Feststoffen aus Autobahnabflüssen mit Feststoffen aus dem Zulauf von Regenbecken	57
Tabelle 7.1: Literaturwerte für AFS-Konzentrationen (zusammengestellt aus Göbel et al., 2007)	72
Tabelle 7.2: Quellen ausgewählter Metalle und Phosphor	73
Tabelle 7.3: Gewichtsanteile der Proben vom 15.01.2017 differenziert nach Rinnstein und Fahrbahn	76
Tabelle 7.4: Feststoffdargebot von Gehwegen	77
Tabelle 7.5: Konzentrationen von Metallen und Phosphor im Sediment der Feststoffsammler im Zulauf und Ablauf der Regenbecken	79
Tabelle 7.6: Anlagenspezifische Feststoffkonzentrationen und Glühverluste des REFENI 1 (Eyckmanns-Wolters et al., 2013)	81

Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	Varianzanalyse (Analysis of Variance)
BÜ	Beckenüberlauf
DB	Durchlaufbecken
FNU	Formazine Nephelometric Unit
FNP	Flächennutzungsplan
FTU	Formazine Turbidity Unit
q_A	Bemessungsoberflächenbeschickung
Q_{krit}	Kritischer Abfluss
KÜ	Klärüberlauf
RKB	Regenklärbecken
r_{krit}	Kritische Abflussspende
r_s	Korrelationskoeffizient nach Spearman
V_{spez}	Spezifisches Volumen

Vorwort

In der ersten Phase des REFENI-Projektes wurden die Belastung und Wirksamkeit von zehn Regenklärbecken untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung gaben den Anlass, einzelne Becken detaillierter zu untersuchen, um spezifische Einflussgrößen auf die Wirksamkeit zu identifizieren und praxisorientierte Aussagen zur Gestaltung und zum Betrieb von Regenbecken abzuleiten. Ziel des ursprünglichen Antrags zur Phase 2 des Gesamtvorhabens war es daher, einzelne Becken detailliert zu untersuchen und die Felduntersuchungen durch CFD-Modellierung und -Simulation zu ergänzen.

Die im Berichtsteil des KIT vorgesehenen Arbeiten umfassten:

- Detailuntersuchung an Regenklärbecken (AP1), die insbesondere Aussagen zur ereignisspezifischen Wirksamkeit, zum Einfluss unterschiedlicher Oberflächenbeschickungen und zu Leistungsgrenzen von Sedimentationsanlagen in der Praxis erlauben sollten.
- Analyse der hydraulischen und stofflichen Belastung des EZG (AP2), um eine Feststoffbilanz für Einzugsgebiete und ein „Erklärungsmodell“ für die extrem schwankenden Zulaufkonzentrationen von Regenklärbecken aufstellen zu können. Letzteres sollte Hinweise für eine sachgerechte Planung und Standortwahl liefern.

Im Laufe der Bearbeitung des Vorhabens hat sich gezeigt, dass die unterschiedlichen Feststoffakkumulations- und -transportvorgänge in Einzugsgebieten einen starken Einfluss auf die Zusammensetzung und Konzentration von Feststoffen im Zulauf von Regenklärbecken haben und damit die erreichbaren Sedimentationswirkungsgrade maßgeblich bestimmen. Eine detaillierte Betrachtung der Variabilität des Feststoffaufkommens und des Feststofftransports erscheint in diesen Zusammenhang von großer Bedeutung, um Fehlinvestitionen zu vermeiden. Ziel war es, ein Erklärungsmodell für die stark schwankenden Zulaufkonzentrationen von Regenklärbecken bei quasi gleichem Stoffdargebot abzuleiten.

In Abstimmung mit dem Land Nordrhein-Westfalen und den Projektpartnern wurde daher eine Schwerpunktverschiebung der Arbeiten des KIT von der Untersuchung der Becken zugunsten von Einzugsgebietsuntersuchungen vorgenommen. Aufgrund der geplanten hohen Begehungs- und Probenahmefrequenz wurden die Arbeiten in zwei Gewerbegebieten in Karlsruhe durchgeführt. Die in Dorsten vorgesehenen Arbeiten wurden nicht durchgeführt. Das frei werdende Budget wurde für die Intensivierung der Einzugsgebietsuntersuchungen am Beispiel von zwei Testgebieten in Rastatt mit vordergründig sehr ähnlichen Eigenschaften (Gebietsnutzung, Verkehrslast, etc.), aber sehr unterschiedlichen stofflichen Belastungen im Zulauf der Regenbecken genutzt.

Die Notwendigkeit einer weiteren Schwerpunktverschiebung leitet sich unmittelbar aus den ersten Ergebnissen zu dem Arbeitspaket 1 ab. Durch den kombinierten Einsatz von Feststoffsammlern, Trübungssonden und Sedimentfallen sollte die Dynamik des Sedimentationsprozesses im Becken genauer untersucht werden. Für diese Untersuchungen war das Becken am Federbach vorgesehen, in dem im Vorhaben REFENI, Phase 1 eine mittlere

standortspezifische Zulaufkonzentration von > 90 mg/l ermittelt wurde. Es war davon auszugehen, dass die Analyse des Sedimentationsvorgangs auch messbare Ergebnisse liefern kann. Nach der Sanierung des Beckens wurde jedoch Fremdwasser in das Becken eingeleitet, wodurch ein periodischer Einstau während regenfreien Zeiten entstand. Nach festen Routinen wurde der Beckeninhalte in den Schmutzwasserkanal entleert. Aufgrund der dadurch entstehenden, nicht eindeutig definierbaren Zulaufsituation und den registrierten geringen Konzentrationen, war es nicht möglich durch Sedimentfallen belastbare und vor allem übertragbare Aussagen zum Sedimentationsverhalten, zur der Wirksamkeit der Anlage zu gewinnen. Ereignisabhängige Kenngrößen (z.B. Abhängigkeit von der Intensität) zur Sedimentation wurden durch eine Intensivierung der Trübungsmessungen abgeleitet. Darüber hinaus wurden freigewordenen Mittel für eine weitere Intensivierung der Einzugsgebietsbetrachtungen genutzt.

Im Rahmen der Einzugsgebietsuntersuchungen wurden Niederschlagsdaten in hoher zeitlicher Auflösung als ein wesentlicher Erklärungsparameter für den Feststoffabtrag sowie im Zusammenhang mit den Trübungsmessungen im Becken ausgewertet. Es konnten keine Zusammenhänge zwischen der Niederschlagshöhe und/oder der Niederschlagsintensität und Stoffabtragsraten in den Einzugsgebieten gefunden werden. Ein vergleichbarer Befund liegt aus Untersuchungen an Bundesautobahnen vor. Da keine funktionalen Zusammenhänge zwischen Niederschlagsparametern und Feststoffabtrag gefunden werden konnten, konnte keine zeitliche Extrapolation über ein N-A-Modell erfolgen.

In den beiden Einzugsgebieten in Rastatt wurde das Feststoffdargebot auf Teilflächen detailliert und zeitlich hochaufgelöst quantifiziert und zu einer spezifischen Einzugsgebietsfracht hochgerechnet. Es wurden die alle in der Fachwelt diskutierten potentiellen Einflussgrößen für die Höhe des Aufkommens, die lokale Retention und den Transport quantitativ erhoben. Für die beiden Gesamtgebiete konnte ein logischer Zusammenhang zwischen Verkehrs- und Feststoffaufkommen abgeleitet werden. Für die einzelnen Messstellen gilt dieser Zusammenhang nicht mehr uneingeschränkt. Für alle den potentiellen Rückhalt im Gebiet bzw. den Transport zum Ort der Behandlungsanlage betreffenden Größen konnten keine systematischen Zusammenhänge gefunden werden. Dieser Befund deckt sich ebenfalls mit den Erfahrungen aus anderen Untersuchungen (z.B. A6 bei Steinsfurt, A100, Berlin und Derchinger, Augsburg) und bedeutet, dass die Frage nach der Behandlungsbedürftigkeit von Niederschlagsabflüssen auch nach den im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten, umfangreichen Einzugsgebietsuntersuchungen nur aufkommensbasiert über die bekannte Flächenkategorisierung beantwortet werden kann. Ein geschlossenes Erklärungsmodell für variierende Zulaufkonzentrationen, konnte trotz der umfangreichen Untersuchungen nicht abgeleitet werden. Um die Lücke zwischen Aufkommen und wassergebundenem Transport zu schließen, besteht weiterhin ein bedeutender Forschungsbedarf.

Zusammenfassung

Dieses Vorhaben widmet sich dem Thema „Akkumulation und Transport von Feststoffen aus dem urbanen Raum und deren Abscheidung in Sedimentationsanlagen“. Eine Veranlassung für die Untersuchungen war ein Befund aus REFENI, Phase 1, der zeigte, dass fünf der zehn ausgewählten Regenklärbecken sehr geringe Zulaufkonzentrationen hatten. Am Beispiel von zwei Regenklärbecken wurden in diesem Vorhaben die Zusammenhänge zwischen Feststoffdargebot und -transport im Einzugsgebiet detailliert untersucht.

Anhand von Luftbildern wurden in dem Industrie- und Gewerbegebiet, in dem die Regenklärbecken liegen, die verschiedenen abflusswirksamen Flächen identifiziert. An acht Standorten wurden Verkehrsmessungen durchgeführt. Weiterhin wurde an diesen Standorten die Oberflächentexturtiefe (Rauheit) ermittelt, die die Abflusskonzentrationen von Feststoffen im Oberflächenabfluss maßgeblich beeinflusst.

In einem einjährigen Monitoring wurde das Feststoffdargebot der Einzugsgebiete untersucht. Im Fokus stand hierbei die Beprobung der Straßen und Gehwege. Für die Bilanzierung des Feststoffhaushalts wurden darüber hinaus an zwei Regenklärbecken Proben mittels Feststoffsammler gezogen. Die durchflussproportionale Beprobung ermöglichte die sichere Ermittlung der Feststofffrachten. Weiterhin erfolgte eine Differenzierung der Kornfraktionen in die Korngrößen $< 0,063$, $0,063-2,0$ und $> 2,0$ mm. Besondere Aufmerksamkeit wurde den erhobenen Frachten und Konzentrationen der Kornfraktion $< 0,063$ mm gewidmet.

Basierend auf den Monitoring-Ergebnissen erfolgte eine Feststoffbilanzierung. In der Bilanz wurde das Feststoffdargebot der Einzugsgebiete den Frachten gegenübergestellt, die im Zulauf von Regenbecken gemessen wurden.

Anhand der Frachtbilanzen der beiden untersuchten Gebiete konnte schlüssig gezeigt werden, dass sich über den Transportweg die Massenanteile der Kornfraktionen nahezu umkehren. Im Einzugsgebiet besteht die Gesamtmasse der deponierten Feststoffe zu 80-90 % aus der groben Feststofffraktion mit Korngrößen $> 0,063$ mm. Von dieser Gesamtmasse erreichen nur 6-15 % die Behandlungsanlage. Das übrige Material bleibt auf der Straße, in den Straßeneinläufen oder im Kanal zurück. Aufgrund der mit dieser Frachtreduzierung verbundenen Klassierung wird die Feststofffracht im Zulauf der Regenbecken von den feinen Partikeln der Fraktion $< 0,063$ mm dominiert. Allerdings zeigen die Monitoring-Daten im Zulauf der Regenklärbecken, dass insbesondere in Abhängigkeit von den Eigenschaften der Einzugsgebiete nur ein Bruchteil (6 %) oder nahezu die gesamte Masse der im Gebiet anfallenden feinen Partikelfracht die Regenklärbecken erreichen.

Das komplexe Wechselspiel der verschiedenen Einflussgrößen wie Niederschlag, Oberflächentextur und weiterer Gebietsparameter konnte nicht vollständig entschlüsselt und zu einem Erklärungsmodell zusammengefasst werden. Es zeigte sich aber, dass der Verkehr

einen maßgeblichen Einfluss auf das Feststoffaufkommen im Einzugsgebiet hat und die Eigenschaften der abflusswirksamen Oberflächen einen maßgeblichen Einfluss auf den Transport der Feststoffe haben. Auch wenn der quantitative Zusammenhang der verschiedenen Parameter nicht entschlüsselt werden konnte, ergaben sich generelle Planungshinweise. Das Vorhaben hat abermals belegt, dass weiterhin ein bedeutender Forschungsbedarf besteht, um die Transport- und Retentionsprozesse in Einzugsgebieten zu beschreiben. Die kleinräumigen Feldansätze, so wie sie hier gewählt wurden, um bestehende Modellvorstellungen zu überprüfen, sind hierfür offensichtlich nicht ausreichend.

1 Veranlassung und Zielstellung

Das vom Land Nordrhein-Westfalen geförderte Vorhaben „**RE**duktion des **FE**ststoffeintrages durch **N**iederschlagswassereinleitungen“ (Kurz: **REFENI**) wurde in zwei zeitlich aufeinanderfolgenden Phasen bearbeitet.

In „Phase 1“ lag ein Schwerpunkt der Untersuchungen des KIT darauf, die Sedimentationsleistung von Regenklärbecken zu untersuchen. Die Ergebnisse der Phase 1 wurden im Oktober 2013 abgeschlossen und publiziert (Eyckmanns-Wolters et al., 2013). Schwerpunkt der Untersuchungen war ein Monitoring, bei dem zehn Regenklärbecken auf ihren Feststoffrückhalt beprobt wurden. Durch das Monitoring wurde für Regenklärbecken ein mittlerer Sedimentationswirkungsgrad für Feststoffe der Kornfraktion $< 0,063$ mm von < 30 % ermittelt. Dieser mittlere Feststoffrückhalt bleibt hinter den Erwartungen zurück.

Unter den Ergebnissen war ein weiterer Befund von besonderem Interesse: *„Das Monitoring ergab bei 5 von 10 Anlagen eine geringe stoffliche Belastung mit Konzentrationen im Zulauf teilweise deutlich unter 50 mg TS/l. Einzelne Ereignisse und Anlagen zeigen jedoch auch Konzentrationen im bekannten Wertebereich (Zulaufkonzentrationen größer 100 mg TS/l).“* (Eyckmanns-Wolters et al., 2013). Zwei Anlagen aus dem Monitoring, die sich in ihren Zulaufkonzentrationen sehr stark unterscheiden, liegen in Rastatt. Die Monitoring-Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Einzugsgebietseigenschaften sowie unterschiedliche Feststoffakkumulations- und -transportvorgänge einen starken Einfluss auf die Zusammensetzung der Feststoffe und Feststoffkonzentration im Zulauf von Regenklärbecken haben.

Eine detaillierte Betrachtung der raumzeitlichen Variabilität des Feststoffaufkommens sowie der den Feststofftransport bestimmenden Einzugsgebietseigenschaften erscheint von großer Bedeutung, um einen Beitrag für die bedarfsorientierte Planung von wirksamen Regenwasserbehandlungsanlagen zu leisten. Die vertieften Untersuchungen des KIT in der „Phase 2“ widmen sich den folgenden Fragestellungen, wobei die zwei Regenklärbecken in Rastatt als Fallbeispiele in den Untersuchungen herangezogen werden:

- *Wie hoch sind die Produktion und das Akkumulationspotenzial von Feststoffen am Beispiel der zwei benachbarten Einzugsgebiete in Rastatt?*
- *Entspricht das Feststoffdargebot auf den Oberflächen den stofflichen Abtragsfrachten (Belastungskategorie), die den Bemessungsgrundlagen für Regenbecken zugrunde liegen?*
- *Können Einflussgrößen ermittelt werden, die das Feststoffdargebot auf den Oberflächen maßgeblich bestimmen?*
- *Gibt es Hinweise darauf, dass die Bemessungsgrundlagen für Regenklärbecken durch die Erhebung oder Abschätzung weiterer Parameter verbessert werden können?*

- *Steht das Feststoffpotenzial in den Einzugsgebieten in einem plausiblen Zusammenhang zu den Feststoffkonzentrationen, die im Zulauf der Regenklärbecken ermittelt wurden?*
- *Wie hoch ist der Frachtanteil, der auf dem Transportweg vom Einzugsgebiet bis zu dem Regenbecken am Ende des Entwässerungssystems verloren geht, und damit im Entwässerungsnetz verbleibt?*

Vor dem Hintergrund der genannten Fragestellungen sind eine Charakterisierung der Einzugsgebiete sowie quantitative und qualitative Untersuchungen zum Feststoffaufkommen in den Einzugsgebieten und den Regenwasserbehandlungsanlagen erforderlich.

Für zwei Einzugsgebiete von Regenklärbecken wurde jeweils eine Einzugsgebietsanalyse mittels Luftbildern durchgeführt. Die Auswertung ermöglicht eine differenzierte Ermittlung der abflusswirksamen Flächenanteile.

Das Feststoffaufkommen wird in einem Monitoring in beiden Einzugsgebieten auf Straßen und Gehwegen untersucht. Die serienmäßige Beprobung standardisierter Flächen gibt Hinweise auf das stoffliche Aufkommen über den zeitlichen Verlauf eines Jahres. Anhand der abflusswirksamen Fläche und dem Feststoffaufkommen wird der stoffliche Abtrag abgeschätzt.

An Regenbecken gezogene ereignisspezifische Proben des Zulaufes reflektieren die Mobilisierungs- und Transportvorgänge der Feststoffe von den Oberflächen bis zum Ende des Kanalisationssystems.

Anhand der Massenanteile und der Gewichtsverteilung der Korngrößen wird die über den Transportweg stattfindende Abreicherung der grobkörnigen Feststoffe gegenüber der Ausgangsmatrix aufgezeigt. Diese ist ein kumulatives Signal für die auf dem Transportweg stattfindenden Prozesse. Auf diese Weise werden erstmalig die Zusammenhänge zwischen einem Einzugsgebiet und der Behandlungseinheit untersucht und statistisch analysiert.

Untersuchungen zum Feststoffrückhalt der Sedimentationsanlagen sind bereits in der Phase 1 erfolgt. Bedingt durch die sehr geringen Feststoffkonzentrationen, die im Zulauf und im Ablauf in derselben Größenordnung liegen, ist eine Frachtbilanzierung zur Ermittlung des Feststoffrückhaltes durch Sedimentation mit einer hohen Unsicherheit verbunden und aus diesem Grund nicht durchgeführt worden. Ergänzend zu der abflussproportionalen Beprobung der Zuläufe von Regenbecken kommen hochauflösende Trübungssonden zum Einsatz. Der Einbau der Sonden dient der Beschreibung der Dynamik des Niederschlagsereignisses und der Sedimentationsvorgänge im Regenbecken. Des Weiteren geben sie Hinweise zum zeitlichen und räumlichen Verlauf des Sedimentationsvorgangs in Regenbecken.

2 Grundlagen

2.1 Feststoffe im urbanen Raum

Als Emissionsquellen von Feststoffen wird in der Literatur auf Staubniederschlag, Luftverschmutzung, Verkehrsemissionen, Erosion, Verwitterung, Hausbrand, Winterdienst, Laubfall und sonstige durch den Menschen verursachte Abfälle hingewiesen. Die aus verschiedenen Quellen resultierenden Schmutz- und Schadstoffe bewirken kumulativ eine Verschmutzung der Oberflächen und des Niederschlagswassers. Zur Untersuchung der qualitativen und quantitativen Verschmutzung des Niederschlagswassers wurden bereits seit den 1970er-Jahren zahlreiche Studien durchgeführt. Der Untersuchungsbedarf ist nach wie vor sehr hoch, nicht zuletzt aufgrund des fortwährenden Auftretens neuer Umweltschadstoffe wie z. B. PFT, Spurenstoffe, Mikroplastik etc. Wissenslücken bestehen jedoch nicht nur zu den Inhaltsstoffen, sondern auch hinsichtlich der Entstehung des Partikelauftretens und der Transportmechanismen.

Die Themen rund um Feststoffe im urbanen Raum beschäftigen die Wissenschaft und Öffentlichkeit schon lange und mit unterschiedlichen Schwerpunkten, denkt man an die Debatten über Fahrverbote aufgrund der Feinstaubbelastung (PM₁₀) im innerstädtischen Siedlungsraum.

Unter den vielfältigen Fragestellungen, die mit schadstoffbelasteten Feststoffen im urbanen Raum verbunden sind, ist die Frage nach Möglichkeiten der wirksamen Behandlung des Niederschlagsabflusses von großer Bedeutung. Eine Voraussetzung hierfür ist unter anderem, dass die Menge und Qualität der mit dem Niederschlagsabfluss zur Behandlungsanlage transportierten Feststoffe bekannt ist.

2.2 Emissionsquellen

2.2.1 Verkehr

Der Kraftfahrzeugverkehr trägt durch Rückstände partikulärer und gasförmiger Verbrennungsprozesse zu einer Umweltbelastung bei.

Partikel mit größeren Korngrößen entstehen durch Metallkorrosion an den Bremsanlagen und Karosserieteilen. Durch den Verschleiß von Reifen, Abrieb von Bremsscheiben etc., entstehen feinere Stäube oftmals mit Korngrößen < 10 µm. Messdaten zu der Feinstaubbelastung werden von den Ländern an zahlreichen Stationen erhoben und veröffentlicht, i.d.R. als PM₁₀ [µg/m³].

Mit diesen feinputikulären Stäuben sind Schwermetallemissionen verbunden, darunter vorwiegend die Elemente Zink und Kupfer. Neben den Metallen werden durch den Verkehr auch

Kohlenwasserstoffverbindungen wie z. B. polycyclische aromatische und chlorierte Kohlenwasserstoffe sowie Mineralölkohlenwasserstoffe freigesetzt.

In zahlreichen Studien wurde der Zusammenhang zwischen dem Verkehrs- und Schadstoffaufkommen untersucht. Es konnte nachgewiesen werden, dass mit steigendem Kfz-Verkehr die Emissionen zunehmen und insbesondere der Schwerlastverkehr höhere Emissionen bewirkt. Eine in diesem Kontext zu berücksichtigende Einflussgröße ist das Fahrverhalten, so treten bei ruhigem Verkehrsfluss geringere Emissionen als bei einem Stop-and-go-Verhalten auf.

Als Quellen für Feststoffe sind jedoch nicht nur die Kfz, sondern auch die Straßen an sich zu nennen. Asphaltstraßen bestehen aus Split in unterschiedlichen Korngrößen und dem Bindemittel Bitumen. Infolge des Abriebs durch den Verkehr, werden von den Straßenbelägen organische Kohlenstoffverbindungen und mineralische Füllstoffe freigesetzt. Im Winter führt die Verwendung von Tausalzmitteln und Frostsprengung zu einem erhöhten Abrieb der Fahrbahn (Pfeifer, 1998).

Messprogramme, in denen Feststoffkonzentrationen im Niederschlagsabfluss ermittelt wurden, zeigen eine sehr hohe Streuung der Daten aufgrund stark variierender Randbedingungen für alle Nutzungen. Bild 7.1 und Tabelle 7.1 im Anhang verdeutlichen, dass man aktuell nicht auf repräsentative Mittelwerte zurückgreifen kann, sondern aktuell nur Orientierungswerte vorhanden sind.

2.2.2 Wohn- und Industrieflächen

Eine weitere Emissionsquelle sind die Verbrennungsprozesse aus Wohn- und Industriegebieten, die Schadstoffe in die Atmosphäre freisetzen und über atmosphärische Deposition zur Belastung urbaner Flächen beitragen. Das Ablagerungsverhalten der Stäube wird dabei stark durch die Windrichtung und Topographie bestimmt (Hahn und Xanthopoulos, 1993).

Neben Verbrennungsprozessen sind häufig auch Materialien von Gebäuden, darunter mit Pestiziden, Fungiziden oder Bioziden ausgerüstete Oberflächen eine Emissionsquelle von Schadstoffen im urbanen Raum.

Auch Dachflächen stellen eine Emissionsquelle dar, die zum einen auf die korrodierenden Materialien und zum anderen auf die auf den Oberflächen abgelagerten Stäube zurückgehen. Dächer können daher ebenfalls zu einer stofflichen Belastung des Wassers mit Feinpartikeln und Schwermetallen wie Kupfer, Blei, Aluminium, Zink etc. beitragen. Einflussgrößen für die Emissionen von Dachflächen sind unter anderem die Materialien, Neigungswinkel, Alter und Lage.

2.2.3 Vegetation und Grünflächen

In Abhängigkeit zu den Vegetationsperioden und der Biomasseproduktion können je nach Vegetationsdichte erhebliche Mengen an Pflanzenresten anfallen. Laub, Blütenstaub, Pollen, Früchte, Samen, Hundekot usw. lagern sich auf den Oberflächen ab und werden über den

Niederschlagsabfluss weiter transportiert. Die akkumulierte Biomasse wird in der Regel durch die Straßenreinigung aus dem System entfernt. Verstopfte Sinkkästen in den Straßeneinläufen sind allen Bemühungen zum Trotz nicht ganz zu vermeiden. Bedingt durch die atmosphärische Deposition, den Straßenstäuben etc., ist die Biomasse schadstoffbelastet.

Die im Abschnitt 2.2 genannten Quellen können als Hauptverursacher von Feststoffen auf urbanen Entwässerungsflächen betrachtet werden. Diese Zusammenstellung soll einen groben Überblick verschaffen und helfen, die Untersuchungen aus diesem Vorhaben in den richtigen Kontext zu stellen. Auf detaillierte Darstellungen muss aufgrund des Umfangs und der Komplexität dieser Thematik verzichtet werden.

In Tabelle 7.2 findet sich ergänzend eine Übersicht zu den Quellen ausgewählter Metalle und Phosphor.

2.3 Akkumulation und Verteilung auf urbanen Flächen

Feststoffe unterliegen verschiedenen Transportmechanismen. In Bezug auf Partikel verbleiben große Korngrößen mit hoher Dichte tendenziell am Ort des Entstehens.

Partikel mit geringem Korndurchmesser und geringer Masse werden leichter mobilisiert und transportiert, sodass sie zu einem höheren Anteil über Windverfrachtung auf andere Flächen verlagert werden können. Bedingt durch den äolischen Transport von Partikeln kann es zu einer weiträumigen und überregionalen Grundbelastung kommen, die keiner spezifischen Flächennutzung zugeordnet werden kann, sich aber mit lokalen Emissionsquellen, z. B. einer stark befahrenen Straße, überlagern kann (Pfeifer, 1998a).

Stark befahrene Verkehrswege werden zu den Hauptquellen für Feststoffe gezählt. Durch die Geschwindigkeit der Kfz und das Fahrverhalten kommt es auf den Straßen zu Akkumulationsvorgängen der Partikel und zu einer Sortierung der Feststoffe nach Korngröße.

Hinsichtlich der Einflussgrößen, die von dem Fahrverhalten ausgehen, differenziert Helmreich (2012) zwischen folgender Fahrweise und Nutzung:

- normaler Verkehr,
- Stopp-and-go,
- Kurvenbereich,
- Ampeln/Kreuzung,
- Steigung,
- Gefälle,
- Kreisverkehr-Einfahrt,
- Auffahrten,
- Parkplatz.

Grottker (1987) untersuchte das Feststoffaufkommen auf einer Straße vom Bordstein bis zur Straßenmitte. Er kam zu dem Ergebnis, dass mehr als 95 % der Feststoffe, die auf einer Straße vorhanden sind, vor dem Bordstein abgelagert werden. Sein Ergebnis hat Grottker in Bild 2.1 zusammenfassend dargestellt. Dieser Thematik widmen sich auch jüngere Studien, so haben sich auch Selbig und Bannerman (2007) mit der Verteilung von Feststoffen auf Straßen befasst. Sie kommen zu dem Schluss, dass etwa 75 % der gesamten Feststoffmasse einer Straße im Rinnstein abgelagert werden.

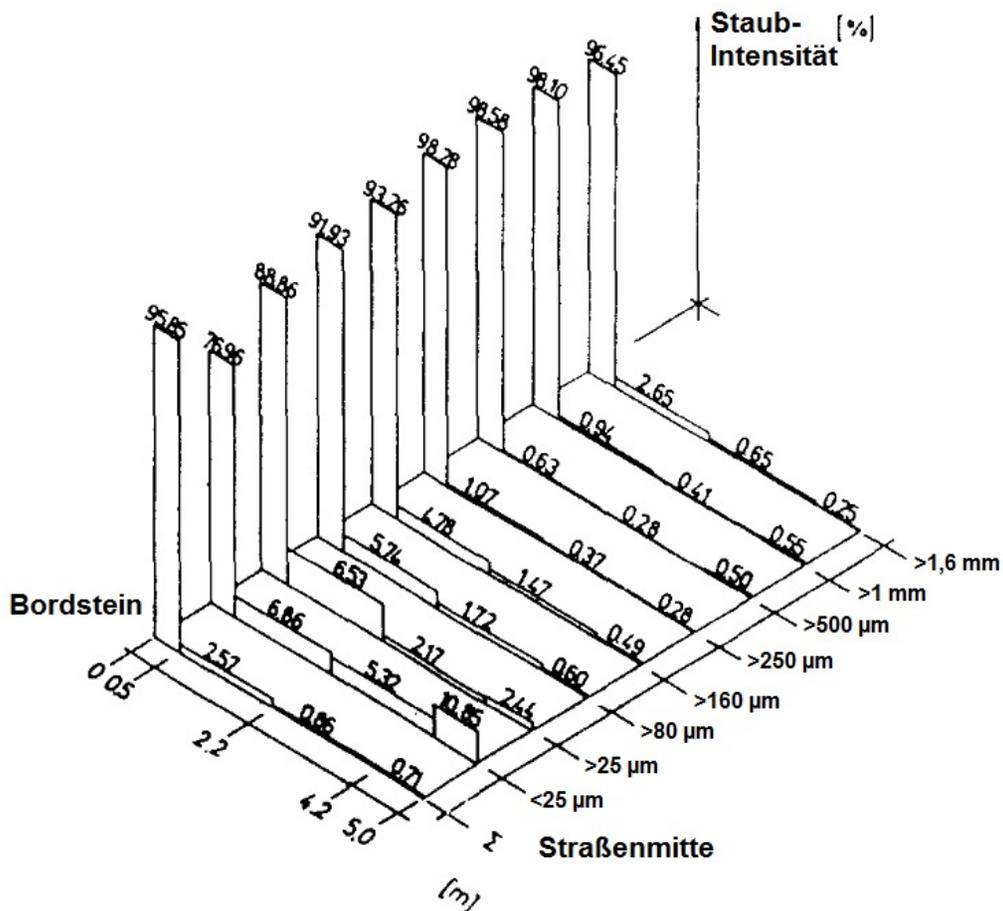


Bild 2.1: Verteilung von Kornfraktionen über ein halbes Straßenquerprofil (Grottker, 1987)

Können für die Anreicherung von Feststoffen im Grunde Emissionsquellen jeglicher Art verantwortlich sein, sind die Vorgänge des Abtrags etwas leichter einzugrenzen. Von hoher Relevanz, insbesondere für grobkörnige Partikel, sind die Straßenreinigung und die Verfrachtung durch den Verkehr zu nennen. Feine Partikel werden dagegen überwiegend durch den Oberflächenabfluss sowie den Wind verfrachtet.

Für die Akkumulation und den Abtrag von Partikeln sind Material, Form und Gestaltung der Oberflächen in den Einzugsgebieten von Bedeutung. Straßen und Dachoberflächen sind vollständig abflusswirksam (undurchlässig). Parkplätze und Hofflächen sind aufgrund der

Beläge oftmals teildurchlässig. Insgesamt sind Flächen mit Pflastersteinen und auch Grünflächen nur gering abflusswirksam. In Abhängigkeit von der Durchlässigkeit der Flächen haben diese Oberflächen eine hohe Retentionskapazität.

Bedingt durch die Anteile durchlässiger oder teildurchlässiger Flächen sowie die Benetzungsverluste ist der Oberflächenabfluss stark gepuffert. Nach dem Erreichen der Anfangs- (Benetzungs-)Verluste erfolgt eine Abflusskonzentration und es bildet sich ein abfließender Wasserfilm. Auf die Abflussvorgänge nehmen Faktoren wie z. B. Wind, Fahrtwind, Spritzwasser starken Einfluss (Hahn und Xanthopoulos, 1993).

Das Feststoffdargebot der Oberflächen wird durch den Niederschlagsabfluss verringert. Für den fluvialen Abtransport sind Niederschlagsintensität, -menge und -dauer sowie gebietspezifische Randbedingungen relevant. Für den Abtransport der Feststoffe geht Göttle (1978) von einem schnellen Abspülen der feinen Schwebstoffe von den Oberflächen und einem langsameren Abtrag der für den Abspülvorgang weniger verfügbaren Partikel der Grobfraction aus.

Grottker (1987) entwickelte für den Prozess der Akkumulation und des Abtrags von Feststoffen eine Modellvorstellung, die in Bild 2.2 dargestellt wurde. Das Feststoffdepot reichert sich über die Zeit an und wird durch Oberflächenabfluss und Straßenreinigung reduziert.

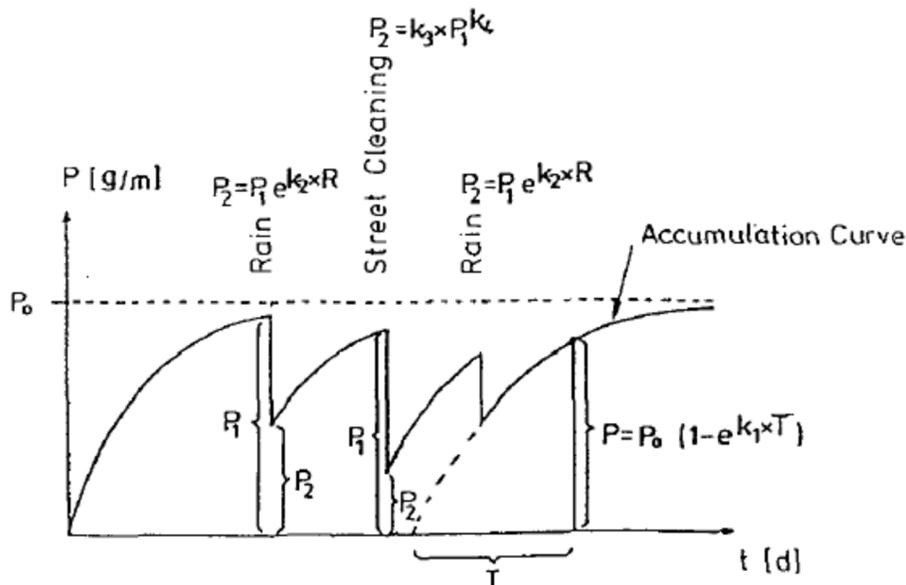


Bild 2.2: Akkumulations-Abtrags-Kurve (Grottker, 1987)

Wie sich diese Dynamik des Feststoffdepots über die Zeit an einer bestimmten Lokalität tatsächlich verhält, kann über die Modellvorstellung nicht beantwortet werden, was auf die standortspezifischen Randbedingungen und komplexe Prozesse zurückzuführen ist.

Erwähnenswert ist, dass die Reduktion des Feststoffaufkommens durch die Straßenreinigung von der eingesetzten Technologie und Effektivität abhängig ist. In Deutschland wird für gewöhnlich in zweiwöchigen Abständen die Straße gekehrt.

Sutherland und Jelen (1997) in James (1997) haben den Einfluss der Straßenreinigung in einem Wohngebiet mit Einfamilienhäusern untersucht. Dort wurde über einen längeren Zeitraum zwei Mal die Woche die Straßen gereinigt. Dadurch konnte die jährlich anfallende Feststofffracht um 70 % bis 85 % reduziert werden. Somit wird deutlich, wie sehr eine regelmäßige Straßenkehrung die Feststofffrachten in Siedlungsgebieten reduzieren kann.

Der Kenntnisstand zur effektiven Verringerung der Masse des neuen Leitparameters AFS63 und einer Verringerung der Abflusskonzentrationen ist bislang noch nicht untersucht worden.

Bezüglich des Transportverhaltens der Feststoffe und Abflusskonzentrationen findet sich in Hahn und Xanthopoulos (1993) eine Differenzierung, die zum Ausdruck bringt, dass die örtlichen Randbedingungen bei den Auswertungen zu berücksichtigen sind. Es wird zwischen einem potenziallimitierten und transportlimitierten Transportverhalten differenziert.

Bei einem potenziallimitierten Transportverhalten ist das Schmutzstoffpotenzial nach einer bestimmten Regendauer bzw. Regenhöhe ausgeschöpft, die Konzentrationsganglinie fällt ab. Bei transportlimitierten Zuständen reicht die Transportkapazität des Abflusses nicht aus, um das ganze Schmutzpotenzial abzutragen, die Schmutzkonzentrationen bleiben bis zum Ende des Regenereignisses hoch.

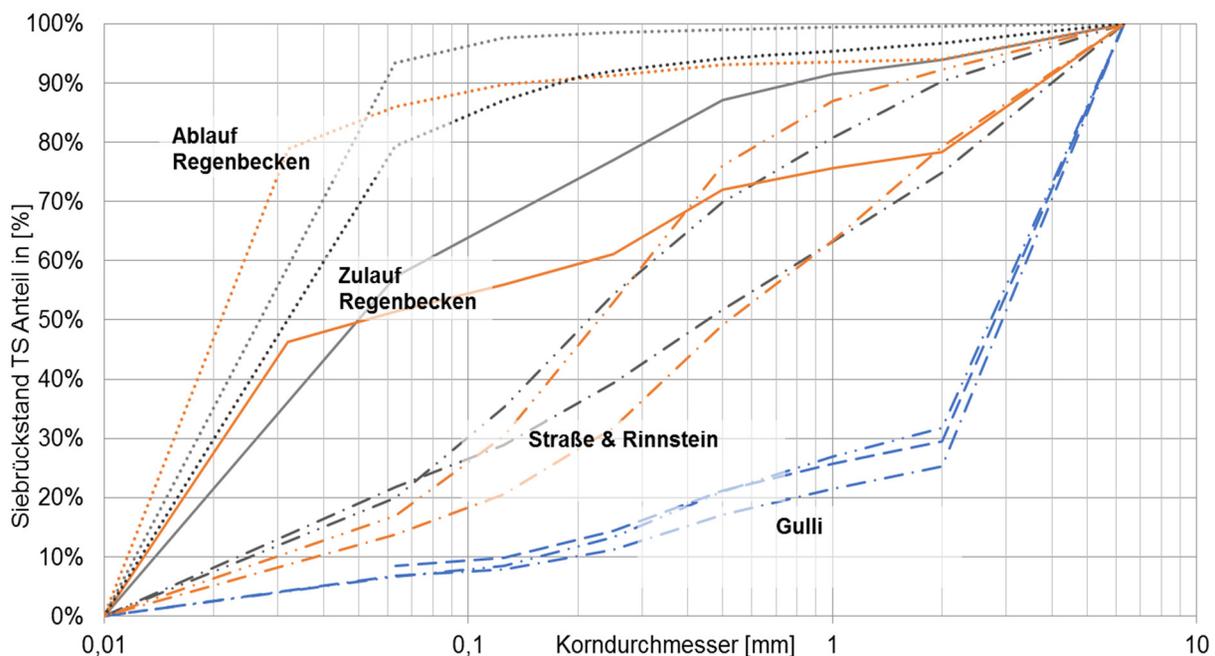


Bild 2.3: Korngrößenverteilung über den Transportweg (Kemper, 2018)

Über den Fließweg des Entwässerungsnetzes erfolgt eine Fraktionierung der Substrate. Kemper (2018) hat hierzu von der Quelle bis zur Senke Proben genommen und auf ihre Korngrößenzusammensetzung analysiert. Bild 2.3 zeigt die Sieblinien der Proben, die auf Straßen, im Straßeneinlauf (Gully) und im Zu- und Ablauf von Regenbecken genommen wurden.

Die Substrate aus dem Einzugsgebiet weisen einen hohen Anteil grobkörniger Partikel auf, wohingegen der feinpartikuläre Anteil der Fraktion ($< 0,063$ mm) mit 10-20 % auf Straßen und ca. 10 % in Gullys liegt. Der geringere Anteil an Feinmaterial in Gullys kann auf die grobmaschigen Körbe zurückgeführt werden, welche die Feinpartikel nicht zurückhalten. Ein Rückhalt feiner Partikel ist im Straßeneinlauf lediglich aufgrund der Filterwirkung bereits vorhandener Grobstoffe denkbar. Ein hoher Anteil der Partikel mit großer Korngröße verbleibt im Entwässerungsnetz und bildet dort Schmutzablagerungen, die bei starken Niederschlagsereignissen remobilisiert werden können. Die resultierenden hohen Ablaufkonzentrationen im Zulauf von Regenbecken sind als „First-Flush“ bekannt. Bei einem großen Teil der Regenereignisse werden die grobkörnigen Substrate jedoch nicht bis zum Regenbecken transportiert. Daher dominieren im Zulauf der Regenbecken oftmals die feinkörnigen Substrate das Korngemisch. Der Ablauf von Regenbecken ist zu ca. 80 % von der Feinfraktion dominiert, was auf die Sedimentationswirkung zurückzuführen ist. Lediglich organische Materie mit geringer Dichte wurde im Ablauf vorgefunden. Typischerweise sind Vegetationsreste, Zellulose, Kunststoffe und häufig Filter von Zigaretten vorzufinden.

Auf dem Transportweg vom Einzugsgebiet mit 80 % Grob- und 20 % Feinmaterial bis zum Ablauf aus den Regenbecken mit 80 % Fein- und 20 % Grobmaterial kehren sich die Massenanteile nahezu um.

2.4 Rauheit

Das Feststoffaufkommen in Einzugsgebieten wird durch äolische Sedimente, den Kfz-Verkehr bzw. durch Verbrennungsprozesse, Reifenabrieb etc., beeinflusst (siehe Kapitel 2.2). Je größer die Rauheit einer Fahrbahnoberfläche ist, desto mehr spezifische Oberfläche ist vorhanden, auf der sich Partikel ablageren können.

Zwei Asphaltoberflächen, welche verschiedene Oberflächentexturen aufweisen, aber ansonsten gleichen Bedingungen unterliegen, akkumulieren unterschiedliche Mengen an Feststoffen. Daher ist die Ermittlung der Rauheit eine wichtige Größe bei der Interpretation des Feststoffaufkommens.

Der Begriff „Rauheit“ bezieht sich auf die Oberflächentextur im Wellenlängenbereich von wenigen Mikrometern bis hin zu Dezimetern. Anhand der Wellenlänge wird zwischen der Mikro-, Makro- und Megarauheit differenziert, siehe Bild 2.4. Die Definitionen ermöglichen eine Zuordnung der Auswirkungen der Oberflächentextur auf die Gebrauchseigenschaften, in diesem Falle der Straßen. Die Mikrorauheit (Feinrauheit) bezeichnet Wellenlängen von $\lambda < 0,5$ mm und ist für den Verkehr hauptsächlich für die Haftreibung von Bedeutung. Die Makrorauheit mit Wellenlängen zwischen $\lambda = 0,50$ -50 mm ist für den Verkehr vor allem für die Griffigkeit, das Reflexionsvermögen in Bezug auf das Scheinwerferlicht, das Drainagevermögen, die Sprühhafenbildung, die Reifengeräusche und den Rollwiderstand maßge-

bend. Die Megaraueheit beeinflusst vor allem die Geräuschemissionen und den Rollwiderstand (Momber und Schulz, 2006).

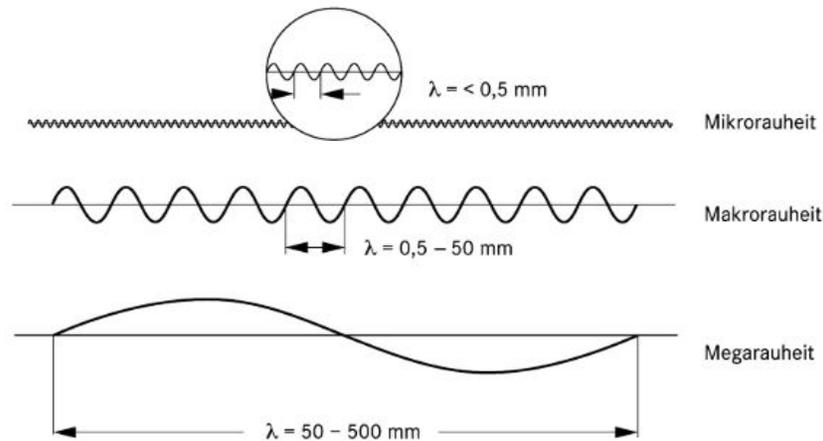


Bild 2.4: Unterteilung der Rauheit von Fahrbahnoberflächen nach Wellenlängenbereichen (Momber und Schulz, 2006)

Die Oberflächentextur von Fahrbahnen wirkt sich nicht nur auf die Fahreigenschaften aus, sondern auch auf die Feststoffakkumulation. Mit zunehmender Rauheit steigt die Verschmutzungsneigung von Oberflächen (Momber und Schulz, 2006).

Wicke et al. (2012) haben in ihren Untersuchungen die Abflusskonzentrationen für AFS in Abhängigkeit der Rauheit an drei unterschiedlichen Materialien bestimmt. Tabelle 2.1 beinhaltet die Ergebnisse der Studie. Bei einer Betonoberfläche mit glatter Textur wurden hohe Abflusskonzentrationen von bis zu 100 mg/l, bei glattem Asphalt wurden Abflusskonzentrationen von ca. 52-65 mg/l, und die geringsten Abflusskonzentrationen wurden für rauhen Asphalt mit 27-50 mg/l gemessen.

Tabelle 2.1: Textureigenschaften der drei unterschiedlichen Probeflächen (Wicke et al., 2012)

	Beton	Asphalt (glatt)	Asphalt (rau)
min. Erhebung [mm]	-0,6	-2,4	-3,2
max. Erhebung [mm]	0,6	3,2	5,9
Standardabweichung [mm]	0,13	0,51	0,76
AFS Konzentration [mg/l]	91-100	52-65	27-50

Zur Ermittlung der Makrotextur von Straßen können z. B. das Profilometerverfahren (DIN13473-1) oder das Sandflächenverfahren (DIN 13036-1) angewandt werden. In diesem Vorhaben ist das Sandflächenverfahren angewandt worden. Dieses Verfahren ist nach bisherigen Erfahrungen für die Praxisanwendung sehr gut geeignet.

2.5 Behandlung von Niederschlagswasser

Die Behandlungsbedürftigkeit von Niederschlagswasser wird nach den Herkunftsflächen und der Nutzung geregelt. Grundlagen hierzu finden sich in BWK-Merkblatt 3, DWA-Merkblatt 153, den Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wasserschutzgebieten und den Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS-EW, RiStWag), Teil Entwässerung. Zukünftig wird das DWA-Arbeitsblatt 102 die Empfehlungen beinhalten. Ergänzend zu den übergeordneten Regularien haben die jeweiligen Landesvorschriften Gültigkeit. In NRW wird die Behandlungsbedürftigkeit in dem „Trennerlass – Anforderungen an die Niederschlagsentwässerung im Trennverfahren“ (2004) festgelegt.

Neben den Herkunftsflächen wird die Behandlungsbedürftigkeit anhand der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV) festgelegt. Mit einer Verkehrsstärke von über 2.000 DTV sind die Abflüsse in der Regel behandlungsbedürftig. Auch die Nutzung als Industrie- und Gewerbegebiet macht eine Behandlung erforderlich. Tabelle 2.2 zeigt einen Auszug aus dem Entwurf des DWA-Arbeitsblatt 102 (2016), welches die für das Vorhaben relevanten Gruppen V2a-V3 und die zugehörige Belastungskategorie beinhaltet.

Im DWA-Arbeitsblatt 102 wird die Belastung in drei Kategorien eingeteilt. Lediglich die Kategorie I (Belastung = gering) ist nicht behandlungsbedürftig. Für die Kategorie II (mäßig) und Kategorie III (stark belastet) besteht eine Behandlungsbedürftigkeit.

Tabelle 2.2: Auszug der Kategorien des Niederschlagsabflusses bebauter oder befestigter Flächen nach dem DWA-Arbeitsblatt 102 (Tabelle 3)

Gruppe	Kategorie / Belastung
V2a => Verkehrsflächen außerhalb von Misch-, Gewerbe- und Industriegebieten Kfz-Verkehr (DTV < 2.000) / Hof- und Verkehrsflächen in Misch-, Gewerbe- und Industriegebieten Kfz-Verkehr (DTV < 300)	II – mäßig (280 kg/ha*a)
V2b => Verkehrsflächen außerhalb von Misch-, Gewerbe- und Industriegebieten Verkehrsaufkommen (2.000 < DTV < 15.000) / Misch-, Gewerbe- und Industriegebieten Kfz-Verkehr (300 < DTV < 2.000)	II – mäßig (530 kg/ha*a)
V3 => Hof- und Verkehrsflächen in Misch-, Gewerbe- und Industriegebieten Kfz-Verkehr (DTV > 2.000) oder Umgang mit wassergefährdenden Stoffen / Park- und Stellplätze (z. B. bei Einkaufsmärkten) mit hoher Frequentierung Kfz-Verkehr (DTV > 15.000)	III – stark (760 kg/ha*a)

3 Material und Methoden

3.1 Monitoring der Einzugsgebiete und Regenklärbecken

Das Untersuchungsgebiet liegt in der Stadt Rastatt in einem Gebiet, das in dem Flächennutzungsplan (FNP) der Stadt als „*Gewerbliche Baufläche*“ ausgewiesen ist. Das Gebiet wird als Gewerbegebiet genutzt mit einem geringen Anteil eines Mischgebietes, in dem eine Wohnnutzung erfolgt. Das Gebiet grenzt nordöstlich an eine Bundesstraße und südöstlich an die Bundesautobahn 5 (A5), siehe Bild 3.1.

Von der im FNP ausgewiesenen Fläche stehen zwei Teilgebiete im Fokus dieses Vorhabens. Es handelt sich um die Einzugsgebiete des „RKB Federbach“ und des „RKB Lochfeld“. Eine Niederschlagswasserbehandlung erfolgt in jedem Einzugsgebiet zentral über eine Retentionsbodenfilteranlage, die ein Regenklärbecken und ein Retentionsbodenfilterbecken umfasst. Die Abgrenzung der Einzugsgebiete und Lage der Regenklärbecken wurden in Bild 3.1 zusammengestellt.

Die Untersuchungen der beiden Einzugsgebiete beinhalten die Quantifizierung des Feststoffaufkommens auf den Straßen in zweiwöchigen Turnus sowie die Beprobung der Regenklärbecken mittels Feststoffsammler (siehe 3.2.4).

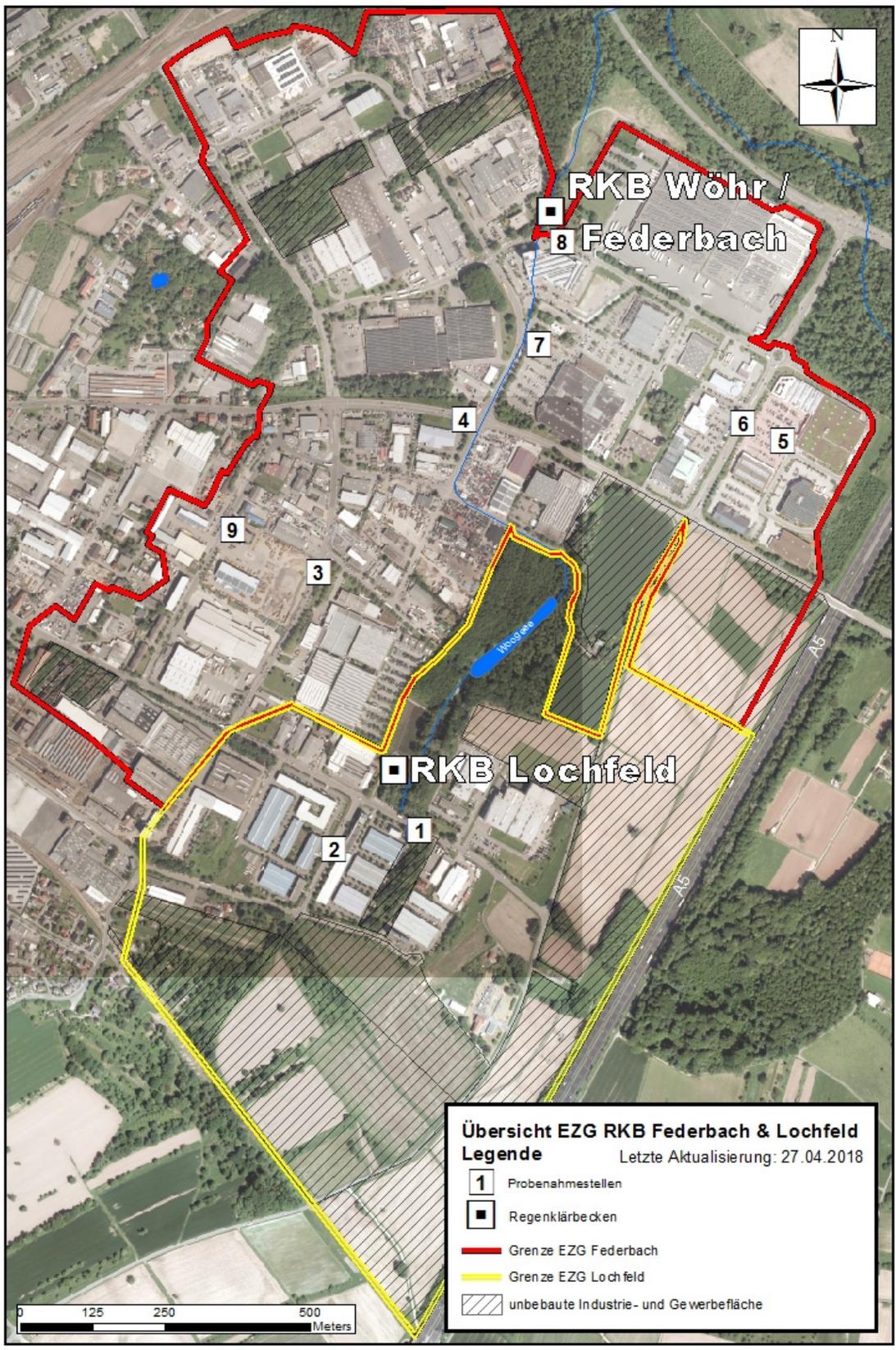


Bild 3.1: Lage und Einzugsgebiete der Regenklärbecken Federbach und Lochfeld

3.1.1 Lochfeld

Die in dem FNP ausgewiesene gewerbliche Baufläche hat eine Größe von ca. 73 ha. Von dieser Fläche war lediglich ein geringer Teil bebaut und an die Kanalisation angeschlossen. Ein hoher Anteil bestand aus Grünfläche oder wurde landwirtschaftlich genutzt. Eine Teilfläche ist als Solarpark ausgebaut worden. Für die weitergehenden Untersuchungen des Einzugsgebietes wurden zwei Durchfahrtsstraßen ausgewählt. In der Lochfeldstraße ist die Messstelle 1 gelegen. Es liegt hier ein relativ hoher Vegetationsbestand vor. In der Stockfeldstraße lag die Messstelle 2 mit einem geringeren Vegetationsbestand.

Kennnummer	Name	Fahrdynamik
1	Lochfeldstr.	konstant
2	Stockfeldstr.	konstant



A1 Lochfeldstr.



A2 Stockfeldstr.

Bild 3.2: Messstellen A1 Lochfeld (links) und A2 Stockfeld (rechts) im EZG Lochfeld

Das RKB Lochfeld ist als Rechteckbecken in Betonbauweise errichtet und wird ohne Dauerstau betrieben. Der Zulauf zum Regenklärbecken erfolgt über ein Zulaufrohr mit Kastenprofil mit einem Geschiebeschacht. Hinter dem Geschiebeschacht öffnet sich das Bauwerk in seiner Breite, was näherungsweise als ein Diffusor beschrieben werden kann. In diesem Abschnitt des Bauwerks, zwischen dem Geröllschacht und dem Verteilerbauwerk, befinden sich beidseits des Beckens Federstauklappen, welche den Beckenüberlauf ableiten. Das Verteilerbauwerk ist als Lamellenwand errichtet worden, bei der das mittige Lamellenelement verbreitert worden ist und somit als eine Art Prallwand fungiert. Die Geometrie des Rechteckbeckens beträgt 22 m Länge x 7,2 m Breite x 1,8 m Tiefe. Das Speichervolumen beträgt ca. 285 m³. Im Endausbauzustand würde dies einem spezifischen Volumen von etwa 4 m³/ha entsprechen. Dann übernimmt das Becken planmäßig nur noch die Funktion des Grobstoffrückhaltes.

Der Klärüberlauf ist mit zwei Federstaublechen ausgestattet, die als selbstregulierende Drosselorgane den Durchfluss beschränken. Mit einer Länge von jeweils 3,3 m wird die

Klarwasserzone über nahezu die gesamte Breite des Beckens abgezogen. Die gleichmäßige Durchströmung der Sedimentationskammer wird dadurch begünstigt.

Der Entlastungsabfluss vom BÜ und KÜ wird über ein Gerinne zu dem nachgeschalteten Retentionsbodenfilter weitergeleitet.

Eine Entleerung des Beckens erfolgt, indem die Klarwasserzone auf den Retentionsbodenfilter gepumpt wird. Mittels Wirbeljet werden das verbleibende Wasser sowie die Sedimente homogenisiert und in den Schmutzwasserkanal gepumpt. Bild 3.3 bildet das Bauwerk in einer Schemaskizze ab.

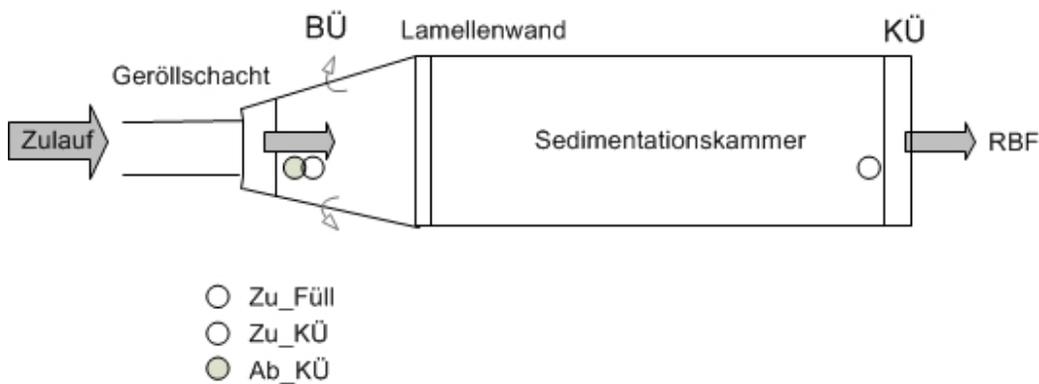


Bild 3.3: Schemaskizze RKB Lochfeld

Die automatische Beckenreinigung erfolgt nach Ereignisende durch einen Wirbeljet. Eine manuelle Reinigung des RKB erfolgt einmal im Frühjahr und Herbst.

Die Abflussermittlung erfolgte über die vom Hersteller vorgegebene Wasserstand-Abflusskurve, die als Polynom in die Steuerung AQUA implementiert wurde. Die Orte der Probenahmepumpen sind im nachfolgenden Bild erkennbar.



Bild 3.4: Ansicht auf die Lamellenwand Richtung Sedimentationskammer



Bild 3.5: Zulaufgerinne mit Geröllschacht u. beidseitigen Federstaublechen

3.1.2 Federbach (ehemals „Im Wöhr“)

Die in dem FNP ausgewiesene gewerbliche Baufläche hat eine Größe von ca. 114 ha. Diese Fläche ist bereits voll erschlossen und entsprechend des Kanalnetzplanes an die Kanalisation angeschlossen. Das Industrie- und Gewerbegebiet wird vielseitig genutzt. Für die weitergehenden Untersuchungen im Einzugsgebiet wurden sieben Probenahmestellen auf Straßen ausgewählt. Die Messstellen wurden in der Übersichtskarte in Bild 3.1 verortet. Weitere Eindrücke von den Messstellen vermitteln die nachfolgenden Fotos in Bild 3.8. Die Stellen wurden so gewählt, dass sie sich hinsichtlich der Verkehrsfrequenz und dem Einfluss der umgebenden Vegetation unterscheiden und möglichst weit verteilt im EZG liegen.

Tabelle 3.1: Liste der Messstellen

Kennnummer	Name	Kfz-Fahrdynamik
3	Berliner Ring	Kein Abbremsen oder Beschleunigen
4	Rauentaler Str.	Abbremsen 10 m vor Kreuzung
5	Bauhaus Parkplatz	Parkplatz
6	Untere Wiesen	Konstant
7	Real Parkplatz	Beschleunigung nach Kurve,
8	Im Wöhr	konstant



3 Berliner Ring



4 Raentaler Straße



5 Bauhaus Parkplatz



6 Untere Wiesen



7 Real Parkplatz



8 Im Wöhr

Bild 3.6: Beprobte Straßen im Einzugsgebiet des RKB Federbach

Das RKB Federbach ist als Rechteckbecken in Betonbauweise errichtet und wird ohne Dauerstau betrieben. Nach einer mehrjährigen Sanierung der alten Anlage und einem Probebetrieb wurde die Anlage Mitte des Jahres 2017 abgenommen. Das neue Becken wurde in die bestehende Kubatur eingebaut und entspricht konzeptionell den Regenklärbecken in Lochfeld, siehe Bild 3.7.

Bei der Sedimentationskammer liegt eine Geometrie von 21,7 m Länge, 10,4 m Breite und 2,0 m Höhe am KÜ (max. Höhe WSP) vor. Das Speichervolumen beträgt nach dem Umbau noch ca. 370 m³ oder spezifisch 3,2 m³/ha.

Der Zulauf zum Regenklärbecken erfolgt über ein Zulaufrohr mit Kastenprofil (DN 1800). Im Zulaufbereich befindet sich ein Geröllschacht. Der Beckenüberlauf wird über Federstauklappen reguliert, die beidseitig im Einlaufbereich angeordnet sind. Als Verteilerbauwerk wurde im Zulauf zu der Sedimentationskammer eine Lamellenwand errichtet, bei der das zentrale Lamellenelement verbreitert wurde. Diese Verbreiterung übernimmt eine Prallwandfunktion und soll die Energiedissipation des Zuflusses fördern. Der Klärüberlauf zum nachgeschalteten Retentionsbodenfilter ist selbstregulierend über die gesamte Breite der Sedimentationskammer angeordnet (2 x 3,6 m Breite). Unter Berücksichtigung einer bestimmten Aufenthaltszeit wird die Klarwasserzone aus der Sedimentationskammer auf den Retentionsbodenfilter gepumpt. Das restliche Wasser wird mittels Wirbeljet aufgewirbelt und in den Schmutzwasserkanal gepumpt. Eine Schemaskizze des Bauwerks ist in Bild 3.7 dargestellt.

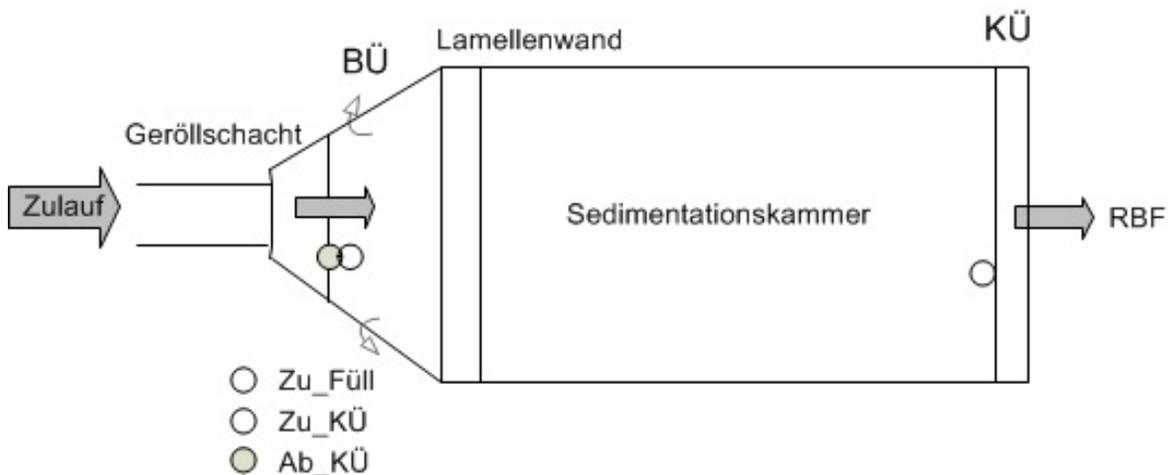


Bild 3.7: Schemaskizze RKB Federbach (ehemals „Im Wöhr“)



Bild 3.8: RKB Federbach, links = Blick Richtung Zulauf und Verteilerbauwerk (Lamellenwand), rechts = Blick vom Zulauf Richtung Klärüberlauf

3.2 Analysemethoden

3.2.1 Verkehrsfrequenz

Die Verkehrsfrequenz wurde mit Seitenradargeräten (SR4) der Firma Sierzega ermittelt. Basierend auf der Fahrzeuglänge differenziert das Gerät zwischen „Einspurig“ (Zweiräder), Pkw und Lkw mit/ohne „Zug“ (Anhänger). Des Weiteren zeichnen die Messgeräte die Geschwindigkeit, den Abstand der Kfz zueinander und die Fahrtrichtung mit zugehörigem Zeitstempel auf. Die Fahrtrichtung wird mit + bzw. – gekennzeichnet. Bei der Erkennung werden die Fahrzeuglängen wie folgt in 4 Klassen eingeteilt:

Klasse 1	Einspurig (0-20 dm bei +; 0-15 dm bei -)
Klasse 2	Pkw (20-60 dm bei +; 15 bis 60 dm bei -)
Klasse 3	Lkw (60-120 dm bei +/-)
Klasse 4	Lkw Zug(120-255 dm bei +/-)

Die Messgenauigkeit beträgt +/- 3 % bei der Geschwindigkeit und +/- 20 % bei der Fahrzeuglänge. Somit zeichnet das Gerät alle aus dem Verkehr stammenden relevanten Kennzahlen auf. Diese werden zur Interpretation des Feststoffaufkommens auf Straßen herangezogen. Die Messungen erfolgten an den in Abschnitt 3.1.2 und 3.1.1 genannten Stellen, an denen auch die Feststoffproben von den Straßen genommen wurden.

3.2.2 Oberflächentexturtiefe (Rauheit)

3.2.2.1 Verfahren

Um die Textur von Straßenoberflächen zu messen, wurde auf das sogenannte „Sandfleckverfahren“ zurückgegriffen. Es handelt sich hierbei um ein Prüfverfahren, das bereits seit den 70er-Jahren Verwendung findet. Es dient dazu, die mittlere Makrotexturtiefe der Fahrbahn zu ermitteln. Das Verfahren liefert keine Aussagen über die Merkmale der Oberflächentextur wie die Form, Größe und Gesteinskörnung der Fahrbahndecke, welche in Bezug auf die hier festgelegten Fragestellungen auch nicht von Relevanz sind.

Das Verfahren wird in der DIN EN 13036-1 (2010) beschrieben, welche darauf hinweist, dass das Verfahren insbesondere für Feldversuche geeignet ist. Es wird hierbei ein definiertes Volumen von Glaskugeln auf einer sauberen und trockenen Straßenoberfläche ausgeleert. Das Granulat wird mit einem Verteilerwerkzeug kreisrund verteilt, bis das definierte Substratvolumen die Oberflächenhöhlräume der Fahrbahnoberfläche vollständig ausfüllt. Von dem kreisförmigen Fleck wird der Durchmesser gemessen. Das Sandvolumen wird durch die bedeckte Fläche dividiert, woraus die mittlere Tiefe der Sandschicht hervorgeht, die als mittlere Texturtiefe betrachtet werden kann.

Bei der Durchführung sind die Vorgaben für die Materialien einzuhalten, die in der DIN EN 13036-1 konkretisiert werden. So müssen die verwendeten Glaskugeln zu mindestens 90 % Massenanteil einen Korngrößenbereich von 0,18-0,25 mm abdecken. Das Verteilerwerkzeug besteht aus einer Scheibe mit einem Durchmesser von etwa 65 +/-1 mm mit einer harten Gummiplatte von 2 (+/- 0,5) mm auf der Unterseite.

Bild 3.9 beinhaltet eine Fotoserie, die bei der Durchführung einer Messung entstanden ist. An jeder Messstelle wurden drei Messungen auf nebeneinanderliegenden Flächen durchgeführt. Die Glaskugeln wurden für die Messung in einer kreisförmigen Fläche verteilt. Anschließend wurde eine Plexiglasscheibe auf die Fläche gelegt, um diese ohne Beeinflussung auszumessen. Der Durchmesser des Kreises wurde 6-mal millimetergenau ausgemessen. Zur genauen Orientierung wurde das Lineal entsprechend im Uhrzeigersinn angelegt und der Durchmesser des Kreises zwischen folgenden gegenüberliegenden Ziffern ausgemessen: 12-6 Uhr, 1-7 Uhr, 2-8 Uhr, 3-9 Uhr, 4-10 Uhr und 5-11 Uhr. Der aus den sechs Werten gebildete Mittelwert ist in die Formel zur Berechnung der mittleren Oberflächentexturtiefe (MTD) eingegangen.

$$MTD = 4 \cdot V \text{ [mm}^3\text{]} / \pi \cdot D^2 \text{ [mm]}$$



Bild 3.9: Ausbringung und Verteilung der Glaskugeln sowie Vermessung des Kreisdurchmessers Griesbaum (2017)

3.2.3 Beprobung der Straßen und Gehwege

In diesem Vorhaben wurden umfangreiche Messungen zum Feststoffaufkommen der Straßen durchgeführt. Andere Eingangsdaten, z. B. Immissionsdaten zur Feinstaubbelastung, werden in Rastatt nicht erhoben, können daher in die vorliegenden Untersuchungen nicht einbezogen werden.

Die methodische Vorgehensweise zur Beprobung von Straßenoberflächen wurde im Rahmen von drei Abschlussarbeiten ausgearbeitet. Es wird hierbei in zwei Schritten vorgegangen. Zuerst wird das Grobmaterial von den Oberflächen mittels Fegen aufgenommen. Für das Abfegen wurde ein Handfeger mit kurzen Borsten und eine Kehrschaufel aus Metall verwendet. Als nächstes wird ein etwa 27 cm breiter Streifen der Straßenfläche mit einem Pflanzensprüher befeuchtet und danach mit dem Akku-Fensterreiniger WV 2 Plus von Kärcher langsam und kontinuierlich abgesaugt.

Die Oberfläche ist soweit anzufeuchten, dass ein Wasserfilm, jedoch kein Abfluss entsteht. Der Sauger wird langsam über das Messfenster gezogen. In Anlehnung an die Erfahrungen der Abschlussarbeiten von Schwarz (2017) und Ngari (2017) wurde dieses Vorgehen drei Mal an demselben Streifen wiederholt. Das grobkörnige Material vom Abfegen der Fläche wird mit dem Schmutzwassertank des Saugers als eine Probe zusammengeführt.

Legende:

- Straßeneinlauf 
- Probenahmestelle (serienmäßig) 
- Probenahmestelle (orientierend) 

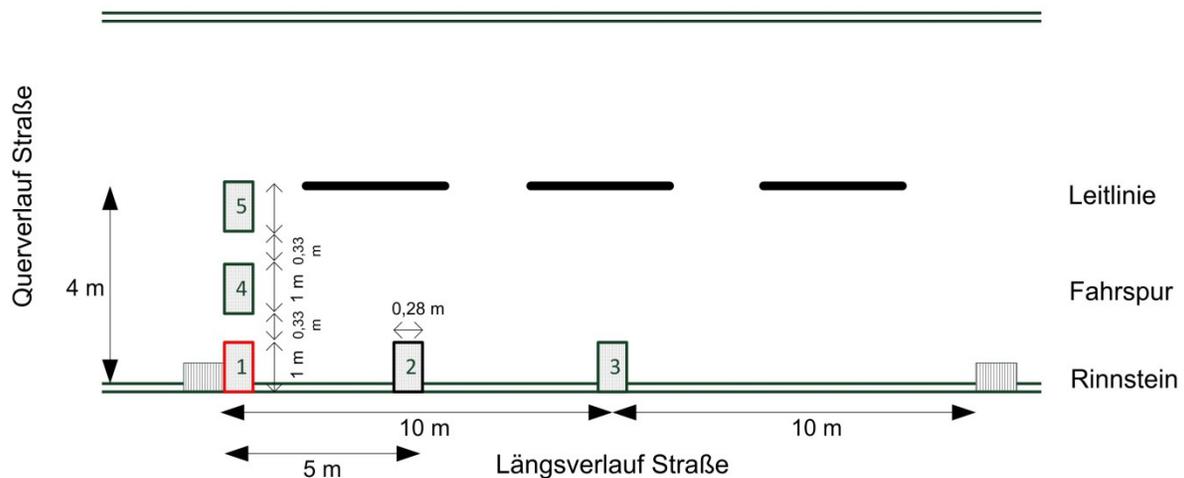


Bild 3.10: Lage der Probenahmestelle

Die Serienversuche wurden nach der beschriebenen Methodik neben den Straßeneinläufen durchgeführt (Probenahmestelle 1), siehe Bild 3.10. Von der serienmäßig beprobten Fläche wurde ein Berechnungsansatz entwickelt, der es ermöglicht, die Feststoffmenge von der beprobten Stelle auf die gesamte Fläche der Straße zu übertragen. Hierfür wurden orientierend Proben im Längs- und Querverlauf der Straße genommen.

Im Längsverlauf wurde die Probenahmestelle 3 auf die Hälfte der Wegstrecke zwischen zwei Straßeneinläufen gelegt, eine weitere mittig zwischen Probenahmestelle 1 und 3. Die Flächen im Querverlauf wurden nach demselben Muster festgelegt. Eine Fläche grenzt unmittelbar an die Leitlinie (Probenahmestelle 5) und eine weitere zwischen Probenahmestelle 1 und 5.

Die Probenahmeflächen weisen eine Breite von 0,28 m und eine Länge von 1,0 m auf, ähnlich zu dem Foto in Bild 3.11.

Tabelle 3.2 gibt einen Überblick der Probenahmestellen in den Einzugsgebieten der Regenklärbecken Lochfeld und Federbach (ehemals „Im Wöhr“).



Bild 3.11: Probenahmestelle der Straßen- (links) und Gehwege (rechts)

Tabelle 3.2: Straßenbreite an den Messstellen

Kenn- nummer	Einzugs- gebiet	Name	Straßenbreite gesamt	Breite einer Fahrbahnseite	Breite des Rinnstein pro Fahrbahn
1	Lochfeld	Lochfeld Straße	9,5	4,45	0,3
2		Stockfeld Straße	6,6	3	0,3
3	Federbach	Berliner Ring	9,5	4,6	0,15
4		Raumentaler Straße	11,0	5,2	0,3
5		Bauhaus			0
6		Untere Wiesen	11,0	5,2	0,3
7		Real		0	
8		Im Wöhr	7,5	3,45	0,3
9		Hohlohstraße	7,5	3,45	0,3

3.2.4 Feststoffsammler

Alle Feststoffe wurden hinsichtlich der Korngrößenverteilung, des organischen Anteils sowie der Beladung mit den Stoffen Phosphor und dem Element Zink als Leitparameter für Schwermetalle untersucht.

In Bild 3.12 ist die Vorgehensweise der Probenaufbereitung im Labor dargestellt.

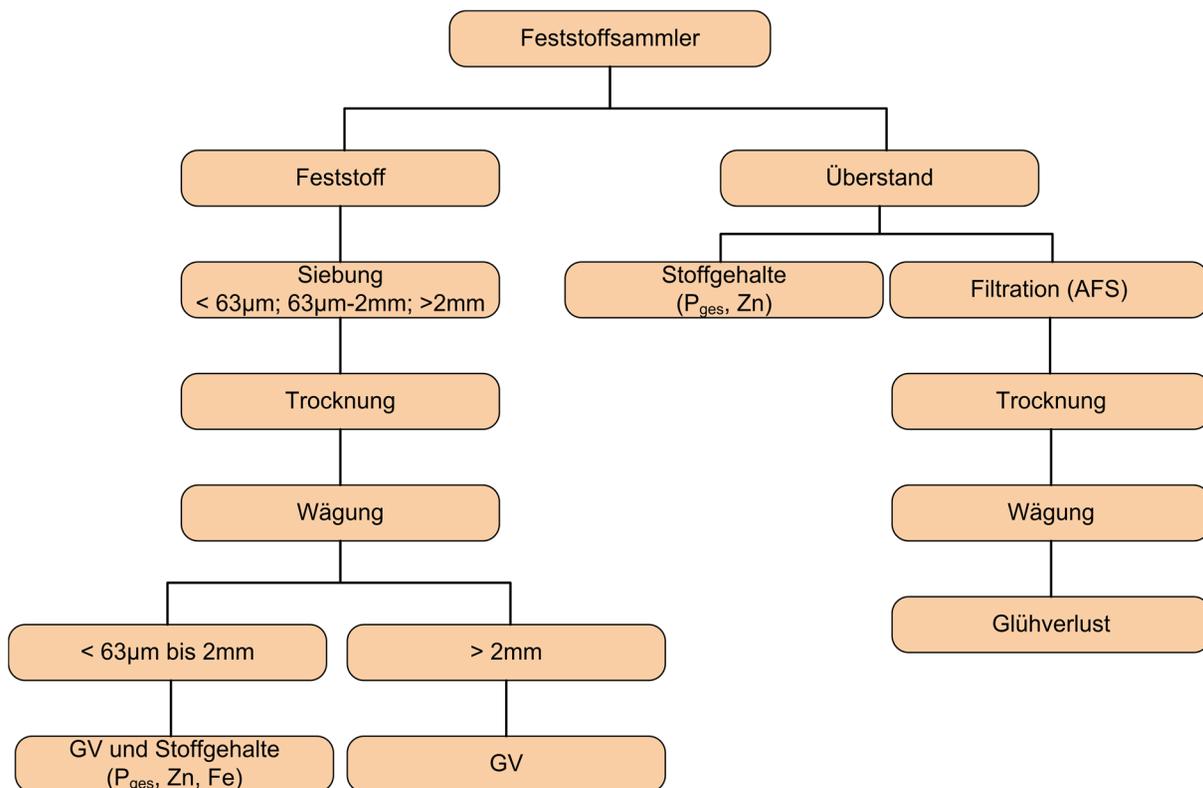


Bild 3.12 Schema zur Behandlung der Proben aus den Feststoffsammlern

Das Vorgehen der Aufbereitung der Sedimentproben, die bei der Anlagenbegehung entnommen wurden, entspricht dem Ast „Feststoff“ in Bild 3.12. Es wurden zusätzlich Stichproben aus dem Winterhalbjahr auf die Schwermetalle Eisen, Blei und Kupfer untersucht.

Die abgelagerten Feststoffe der Feststoffsammler wurden im Labor zunächst über Nasssiebung mit den Maschenweiten 2 mm und 63 µm fraktioniert. Für die Nasssiebung wurde das überstehende Wasser der Probe verwendet. Wenn nicht genügend Wasser vorhanden war, wurde mit Leitungswasser nachgespült.

Die einzelnen Fraktionen wurden in Eimern aufgefangen. Im Labor sedimentierte die Probe ca. 24 h, bevor sie weiterverarbeitet wurde. Der Fraktion < 63 µm wurde nach Bedarf ein Flockungsmittel zugegeben (Polyaluminiumchlorid), um die Absetzbarkeit zu erhöhen.

Anschließend wurde das überstehende Wasser in den Eimern dekantiert, das verbliebene fraktionierte Sediment entnommen und im Trockenschrank bei 105 °C getrocknet. Es folgte

die Gewichtsbestimmung der getrockneten Sedimente und die Bestimmung des Glühverlustes (GV) je Fraktion.

Die entnommenen Proben des Überstandswassers wurden homogenisiert und auf abfiltrierbare Stoffe, GV, P_{ges} und Zink analysiert. Die Analyse des Überstandswassers auf AFS erfolgte, um sicherzustellen, dass sich die Sedimente im Feststoffsammler gut abgesetzt haben. Zusätzlich wurden zum Vergleich mit der Feststoffanalytik Gesamtphosphor und Zink (teilweise auch gelöst) bestimmt.

Die Stoffanalytik fand im Labor des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung, Fachbereich Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütwirtschaft sowie dem Engler-Bunte-Institut am KIT statt.

Tabelle 3.3: Verwendete Analysemethoden

Parameter	Methode
Trockenrückstand (TR)	DEV S2, DIN 38414: 2001
Glühverlust (GV)	DEV S3, DIN 38414: 2001
Abfiltrierbare Stoffe (AFS)	DEV H2-3, DIN 38409: 1987
Glühverlust (GV)	DEV H2-3, DIN 38409: 1987
Phosphor - P_{ges}	DEV D11-7, DIN EN 1189: 1996
Schwermetalle (Cd, Cu, Pb)	DEV E4, EN ISO 15586: 2003
Schwermetalle (Zn)	DEV E8, DIN 38406-8: 1960-10

3.2.5 Feststoffkonzentration

Die Ermittlung der Feststoffkonzentration C_{fest} in mg TS/l erfolgte nach folgendem Schema: Das Wasservolumen der Feststoffsammler wurde vor Ort ermittelt. Nach Probenfraktionierung und -trocknung wurde die Feststoffmasse auf das Volumen des Feststoffsammlers bezogen.

Da die Beprobung volumenproportional erfolgte, ist die so ermittelte Konzentration der mittleren, dem Becken zufließenden bzw. über den Klärüberlauf abfließenden Konzentration über den beprobten Zeitraum gleichzusetzen.

3.2.6 Trübungssonden

Trübungsmessungen werden vielfach als Surrogat für die Messung von Partikelkonzentrationen eingesetzt. Die Installation und der Betrieb von Trübungssonden sind verhältnismäßig einfach, wenig zeitaufwendig und liefern zeitlich hochaufgelöste Daten.

Zur Beschreibung der Dynamik von Niederschlagsereignissen und Sedimentationsvorgängen wurde das RKB Federbach mit zwei Datenloggern und drei Trübungssonden ausgerüstet. Die optische Trübungsmessung erfolgte im Infrarotbereich (bei einer Wellenlänge von 880 nm) nach dem Prinzip der Streulichtmessung in einem Messintervall von fünf Minuten. Die Trübungssonden verfügen über einen Messbereich von 0-500 FTU. Da Trübungsmessungen geräteabhängig sind, wurden die Sonden im Labor mit dem Standard Formazin kalibriert. Dies ermöglichte einen Vergleich der Sonden untereinander und eine Umrechnung der Einheit FTU in FNU.

Je eine Sonde wurde im Zulauf, in der Mitte und am Klärüberlauf des RKB Federbach positioniert, siehe Bild 3.13. Durch die Auswahl dieser Messpunkte sollte der Sedimentationsvorgang in diesem RKB genauer betrachtet werden. Die Sonden im Zulauf und in der Mitte wurden ca. 30 cm über dem Beckenboden angebracht, um Kontakt zum Sediment zu vermeiden. Die Sonde am KÜ wurde höher angebracht, um das ablaufende Wasser zu charakterisieren. Durch die höhere Position dieser Sonde entsteht eine Zeitverzögerung in den Messungen, da die Sonde während der Füllphase des Beckens verspätet Kontakt zum Wasser bekommt.

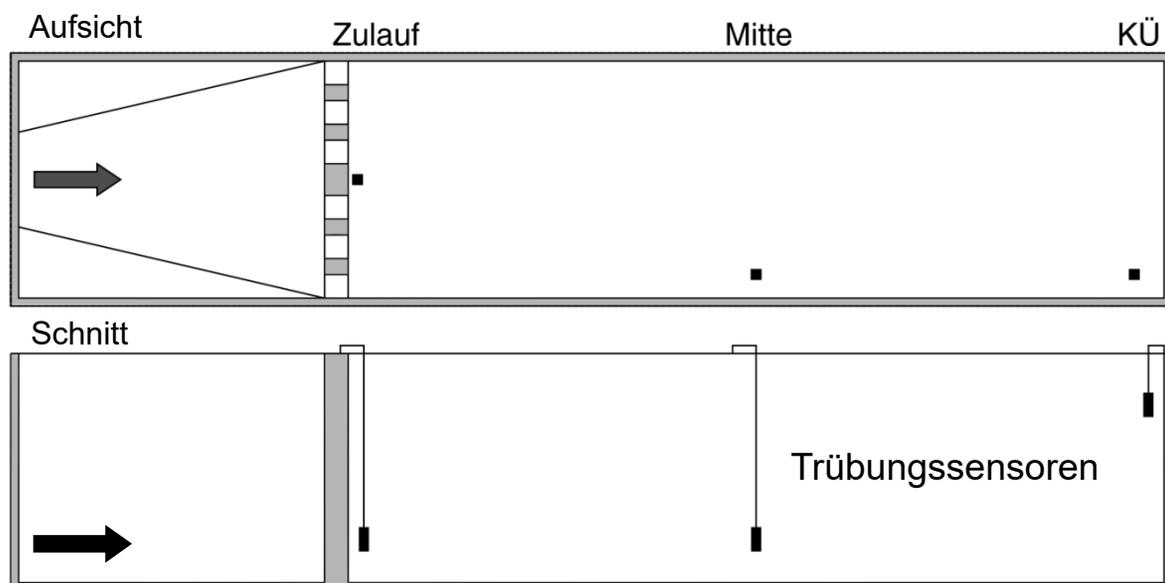


Bild 3.13: Positionierung der Trübungssonden im RKB Federbach

3.2.7 Auswertung der Trübungsmessungen

Einzelne größere Partikel oder Luftblasen können stärkere Signale erzeugen, die aus dem Messverlauf herausragen. Auch der Übergang von Luft zu Wasser an der Messsonde führt zu sehr hohen Peaks, die nicht mit hohen Partikelkonzentrationen gleichgesetzt werden können. Der Einfluss solcher einzelner Messdaten kann durch Signalfilter reduziert werden (DWA, 2014). Die Daten der Trübungssonden wurden deshalb unter Nutzung des Savitzky-Golay-Filters geglättet, wofür das Paket „pracma“ (Borchers, 2017) in der Statistik-Software R (R Core Team, 2016) genutzt wurde. Ein Beispiel zeigt Bild 3.14 anhand der Messungen der Sonde im Zulauf des RKB Federbach für ein Regenereignis am 11.09.2017. Für die weitere Auswertung der Trübungsmessungen während der Regenereignisse wurden die Maxima und Mittelwerte der Trübung von der Zulaufsonde am RKB Federbach ermittelt.

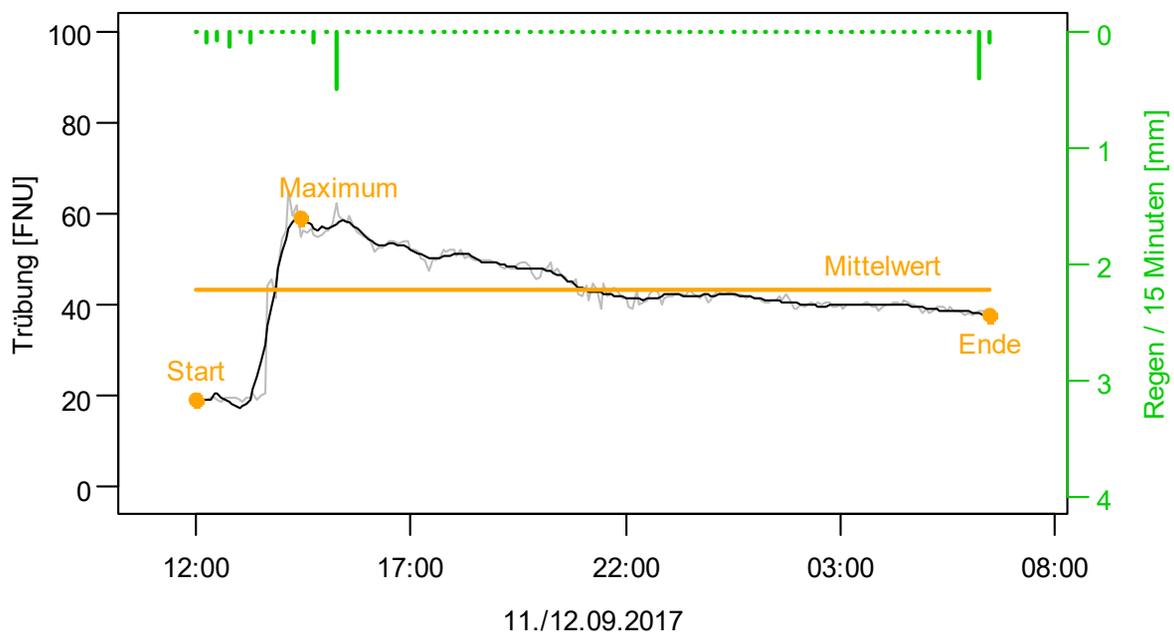


Bild 3.14: Auswertung der Trübungsmessungen am Beispiel eines Regenereignisses am 11.09.2017.

Die graue Hintergrundlinie zeigt die Rohdaten der Sonde im Zulauf des RKB Federbach. Die schwarze Linie repräsentiert die mittels des Savitzky-Golay-Filters geglätteten Trübungswerte. Orangene Punkte geben die Trübungswerte für den Beginn, das Maximum und das Ende des dargestellten Regenereignisses (hier gleichzeitig der Beginn eines neuen Regenereignisses) sowie den Mittelwert der Trübung für das Regenereignis an.

4 Ergebnisse

4.1 Einzugsgebietscharakterisierung Rastatt

4.1.1 Differenzierte Flächenaufnahme

In Abschnitt 3.1 wurde das Industrie- und Gewerbegebiet in Rastatt entsprechend der Angaben aus dem Flächennutzungsplan beschrieben. Das Industrie- und Gewerbegebiet, in dem die beiden Einzugsgebiete der Regenklärbecken liegen, wird vielseitig genutzt.

- Kfz-Dienstleistungen (Autohaus, Werkstatt, Tankstelle, Autovermietung, Waschpark)
- Unternehmen des Einzelhandels (Supermärkte, Baumärkte, Gartencenter, Elektrofachhandel etc.) und Großhandels
- Speditionen
- Bauunternehmen, Baustoffhandel, Holzhandel
- Grünflächen
- Sonstige Flächen, z. B. Solarpark, Gewässer

Die Einzugsgebietsflächen wurden in der Software ArcGIS anhand von Luftbildern nach deren Nutzung in Rubriken unterteilt. In einer Ortsbegehung wurden die Flächenzuweisungen überprüft und damit sichergestellt, dass die Nutzungen den aktuellen Bedingungen vor Ort entsprechen. Bei der Flächenaufnahme wurde zwischen Dachflächen, Parkplätzen und Hofflächen, Straßen und Grünflächen differenziert.

Bild 4.1 stellt die Ergebnisse der Flächenanalyse grafisch dar und Tabelle 4.1 beinhaltet die zahlenmäßigen Flächenanteile der Einzugsgebietsanalyse.

Das EZG Lochfeld ist derzeit noch nicht voll erschlossen. Die abflusswirksame Fläche beträgt $A_U = 16$ ha und die nicht versiegelte Fläche beträgt 57 ha. Darunter ist auch eine Fläche, die als Solarpark genutzt wird und somit auch bei einer vollen Erschließung des Gebietes nicht abflusswirksam wird. Die in der Planung mit $A_U = 34$ ha angesetzte abflusswirksame Fläche ist im Bestand noch nicht erreicht worden.

Das EZG Federbach ist voll erschlossen und weist 78 ha abflusswirksame Fläche auf. 36 ha wurden der nicht abflusswirksamen Fläche zugeordnet. Bei dieser handelt es sich zum Beispiel um Grünstreifen entlang von Straßen oder begrünte Flächen auf Grundstücken. Den zugrunde gelegten Planungsunterlagen in dem REFEN I Vorhaben lag eine Fläche von $A_U = 75$ ha zugrunde, sodass die versiegelte Fläche im Bestand nahezu identisch mit der Planung ist.



Bild 4.1: Differenzierung der Einzugsgebiete anhand der Flächenanteile der Dachfläche, Parkplätze und Hofflächen sowie Straßen und Gehwege

Tabelle 4.1: Differenzierung der Einzugsgebietsfläche nach der Nutzung

Nutzung	EZG Lochfeld		EZG Federbach	
	Fläche (ha)	Prozent	Fläche (ha)	Prozent
Dachfläche	7	9	33	28
Parkplatz	6	8	35	30
Straße	3	4	7	6
Gehweg	1	1	3	2
Abflusswirksame Fläche Zwischensumme	16	21	78	68
Nicht abflusswirksame Fläche (Grünfläche und sonstige)	58	79	36	32
Summe	74	100	114	100

4.1.2 Verkehrsfrequenz

Die Bewertung der Verschmutzung von Niederschlagsabflüssen erfolgt basierend auf der Nutzung der Fläche sowie dem Verkehrsaufkommen in den Einzugsgebieten, das in der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV) Ausdruck findet.

Es waren acht Seitenradargeräte verfügbar, die an allen Messstellen installiert wurden, die in Bild 3.1 eingetragen sind, außer der Messstelle 7 „Real“, da hierfür keine Genehmigung vorlag. Der ausgewertete Messzeitraum betrug sieben Tage. Aus dieser Datenlage wird zunächst die absolute Verkehrsbelastung pro Tag ersichtlich. Bild 4.2 zeigt beispielhaft die Verkehrsfrequenz innerhalb der untersuchten Woche an der Messstelle 4 „Rauentaler Straße“. An den Werktagen ist ein mittleres Verkehrsaufkommen von etwa 10.758 Kfz/Tag gegeben. Am Wochenende reduziert sich das Aufkommen in dem Industrie- und Gewerbegebiet an einem Samstag auf etwa 9.008 Kfz/Tag und an einem Sonntag auf ca. 3.343 Kfz/Tag.

Anhand der erhobenen Zeitreihe von einer Woche wurde das durchschnittliche tägliche Verkehrsaufkommen berechnet, welches sich auf einen Zeitraum von 24 Stunden bezieht. Der DTV-Wert ist ein gewichteter Mittelwert, der Tage mit hoher und geringerer Verkehrsfrequenz berücksichtigt. Basierend auf den Daten konnte für jede Messstelle der DTV-Wert berechnet werden.

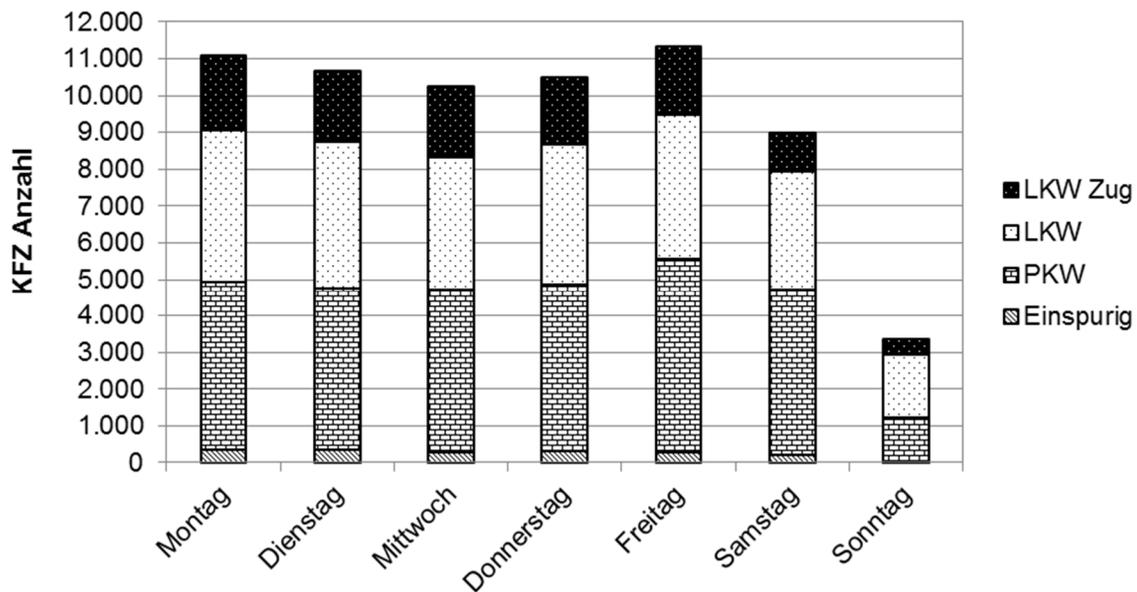


Bild 4.2: Verkehrsaufkommen innerhalb einer Woche am Beispiel des Messpunktes 4 Rauentaler Straße im Einzugsgebiet des RKB Federbach

In Bild 4.3 werden die Ergebnisse des DTV-Aufkommens für alle Messpunkte der Einzugsgebiete Lochfeld und Federbach vergleichend dargestellt.

Das mittlere Kfz-Aufkommen im Einzugsgebiet **Lochfeld** beträgt für die Messstelle 1 „Lochfeldstraße“ 1.386 und für die Messstelle 2 „Stockfeldstraße“ 1.855 Kfz. In der Stockfeldstraße sind die absoluten Werte etwas höher, jedoch sind die prozentualen Anteile der Kfz relativ ähnlich. Der Pkw-Anteil beträgt in beiden Straßen ca. 70 % und der Anteil an Lkw (gemeinsam mit dem Lkw-Zug) beträgt ca. 26 %. Bedingt durch eine Erschließung des Baugrundes ist der Lkw-Verkehr in dem Zeitraum der Messung höher als dieser bei dem üblichen Anlieferungsverkehr zu erwarten wäre.

- Aufgrund des Verkehrsaufkommens ist das EZG nach Arbeitsblatt A 102 (Entwurf) in die Fläche als „Hof- und Verkehrsflächen in Misch-, Gewerbe- und Industriegebieten mit mäßigem Kfz-Verkehr (300 < DTV < 2.000) ...“ der Belastungskategorie II mäßig (V2b) einzuordnen.

Nach dem DWA-M 153 (Tabelle A.3) fällt dieses Gebiet unter die Flächenverschmutzung „mittel (F4)“.

In dem Einzugsgebiet des RKB Federbach liegen im Vergleich mit dem Einzugsgebiet Lochfeld an allen Messstellen höhere Verkehrsbelastungen. Das EZG Federbach ist das ältere Gewerbegebiet, welches direkt an die stark befahrene B 36 und die B 462 angeschlossen ist, die an die A 5 anknüpft.

Bei Betrachtung der Messstellen des EZG Federbach wird deutlich, dass sich die Messstellen sowohl hinsichtlich des absoluten Verkehrsaufkommens als auch die jeweiligen Anteile der Kfz unterscheiden.

Das geringste Aufkommen ist mit ca. 2.200 DTV in der Hohlohstraße und das höchste Verkehrsaufkommen mit 9.449 DTV in der Rauentaler Straße ermittelt worden.

Bei der prozentualen Verteilung der Kfz zeigte sich, dass die Messstellen 4 bis 6 mit ca. 2.400 bis 5.000 ein erhöhtes Lkw-Verkehrsaufkommen aufweisen. Prozentual betrachtet beträgt der Lkw-Anteil an diesen Stellen $\geq 34\%$. Das Pkw-Aufkommen ist an den Messstellen 4, 6 und 8 mit > 4.000 bis 5.200 Pkw pro Tag am höchsten.

Die durchschnittliche Geschwindigkeit der Fahrzeuge wurde ebenfalls ausgewertet. Diese schwankt an den Messstellen zwischen 28 und 41 km/h im Tagesmittel (siehe Bild 7.2). Die Messstellen „Berliner Ring“ und „Hohlohstraße“ sind als Einbahnstraßen ausgewiesen. Bei den anderen Messstellen werden beide Fahrrichtungen ähnlich stark frequentiert (siehe Bild 7.3)

- Für das Einzugsgebiet Federbach liegt somit eine Belastung vor, die nach dem DWA-A 102 der Kategorie III „stark“ (V3) zuzuordnen ist.

Nach dem DWA-M 153 ist die Flächenverschmutzung „mittel“ (Straßen mit 5.000-15.000 Kfz (F5)).

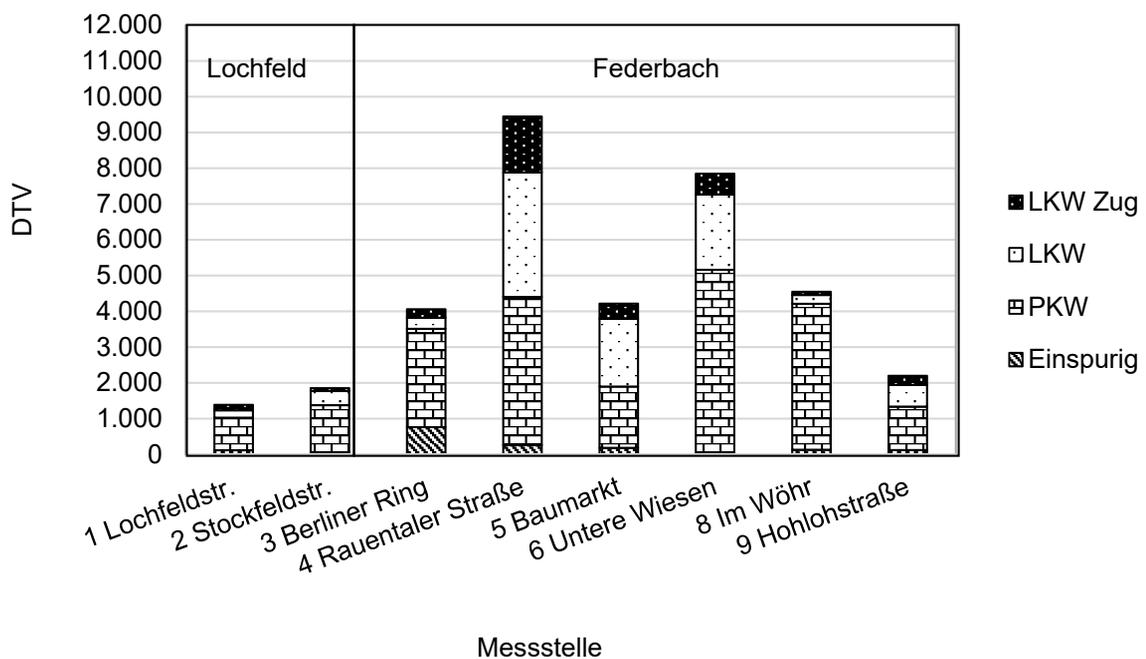


Bild 4.3: Durchschnittliches Kfz-Aufkommen pro Tag

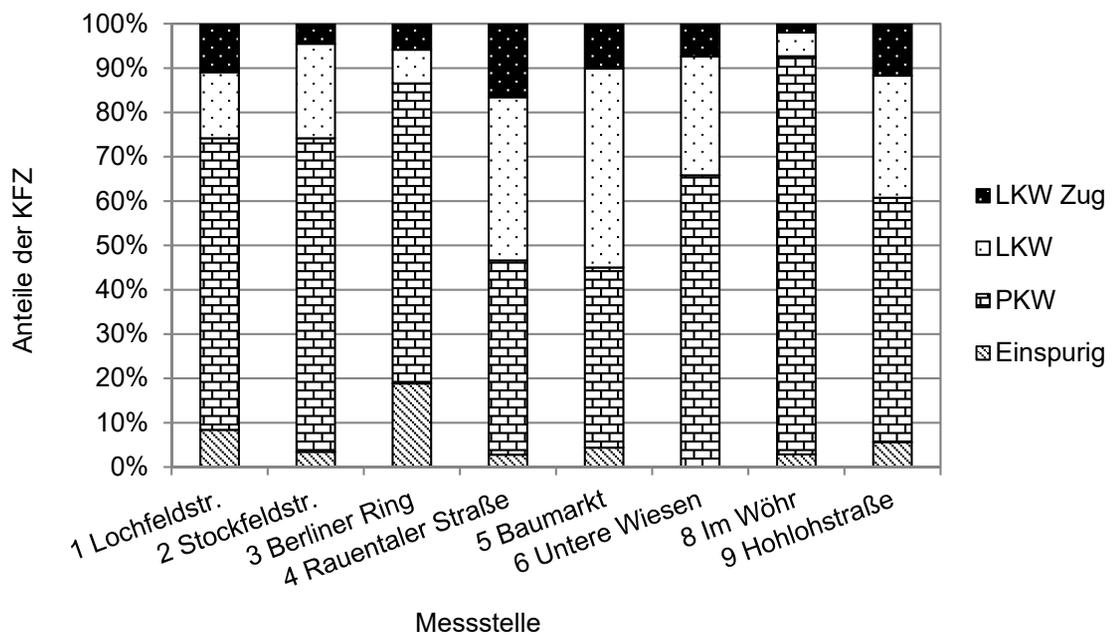


Bild 4.4: Prozentuale Anteile der Kfz nach Art

4.1.3 Oberflächentexturtiefe

An den neun Messstellen wurde die Oberflächentexturtiefe ermittelt. An jeder Stelle sind vier Messungen durchgeführt worden, aus denen die mittlere Oberflächentexturtiefe der Fahrbahn ermittelt wurde.

Die Ergebnisse in Bild 4.5 veranschaulichen, dass im EZG Lochfeld beide Straßen über ein sehr raues Profil verfügen. Bedingt durch die raue Oberfläche kann davon ausgegangen werden, dass ein hoher Anteil feiner Partikel zurückgehalten wird und nach Wicke et al. (2012) geringe Abflusskonzentrationen im Bereich von 27-50 mg/l (Tabelle 2.1) zu erwarten sind.

In dem EZG Federbach verfügen drei Messstellen über eine raue und vier Messstellen über eine glatte Oberfläche mit +/- 0,4 mm. Nach Wicke et al. (2012) sind also grundsätzlich höhere Abflusskonzentrationen zu erwarten, die seiner Erfahrung nach zwischen 52 und 65 mg/l liegen.

Bedingt durch die Oberflächentextur sind im EZG Federbach gegenüber dem EZG Lochfeld höhere Abflusskonzentrationen zu erwarten. Auf die ermittelten Abflusskonzentrationen wird in Abschnitt 4.2.3 eingegangen.

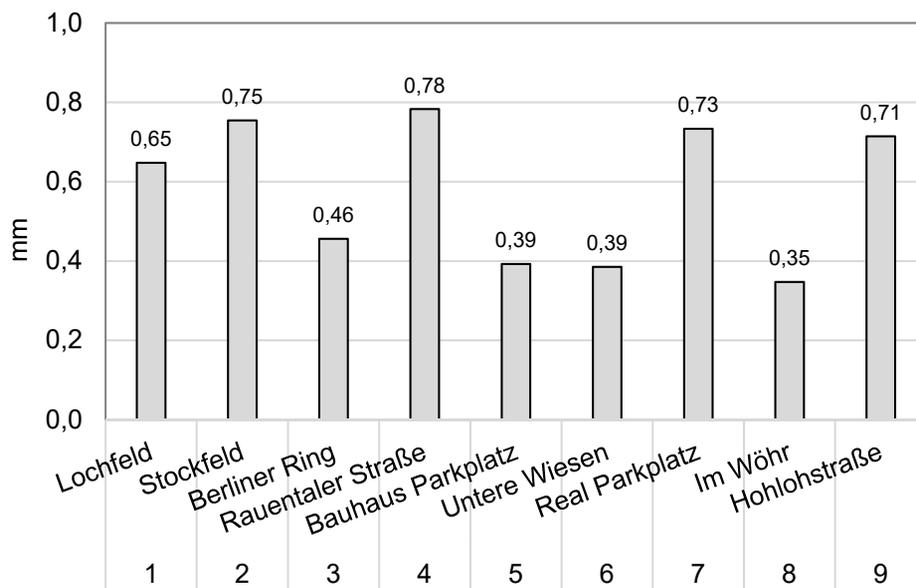


Bild 4.5: Mittlere Oberflächentexturtiefe

4.1.4 Feststoffcharakteristik

In dem Messprogramm wurden standardmäßig Flächen am Rand der Fahrbahn neben den Straßeneinläufen untersucht. Die Maße der Fläche betragen 1,0 m Länge und 0,28 m Breite und schließt den Rinnstein und die Fahrbahn mit ein. Bei den Serienversuchen bildeten die auf der beprobte Fläche von 0,28 m² geborgenen Feststoffe eine Probe.

Der aus den Probenahmen hervorgegangene Datenbestand wurde hinsichtlich der Gewichtsanteile der Trockensubstanz in einem Boxplot Diagramm ausgewertet, siehe Bild 4.6. Hierbei wurde zwischen drei Kornfraktionen differenziert.

Der Gewichtsanteil für die Kornfraktion < 0,063 mm beträgt für den gesamten Datenbestand von Straßenproben 18 %. Der dominierende Gewichtsanteil ist der Fraktion 0,063 bis 2,0 mm zuzuordnen und der Median beträgt 67 %. Der geringste Gewichtsanteil kommt der Kornfraktion >2,0 mm zu, der im Median 9 % an der Gesamtmasse ausmacht.

Die Auswertung zeigt, dass die Feststoffe auf den Straßen eher durch Korngrößen > 0,063 mm dominiert werden.

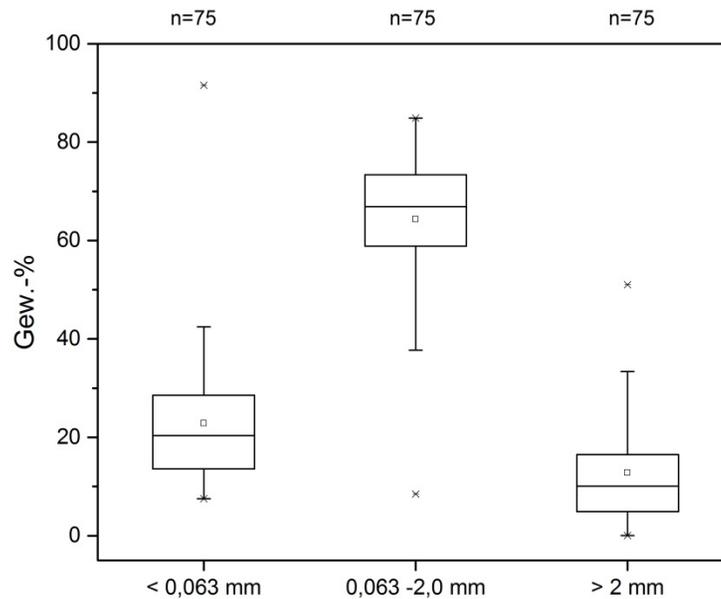


Bild 4.6: Gewichtsanteile der Trockensubstanz für den Datenbestand der Straßenproben

Für die zuvor dargestellte Datenbasis wurde der Glühverlust ermittelt. Die Anzahl der Proben weicht voneinander ab, da nicht bei jeder Probe ausreichend Feststoffe für die Analyse zur Verfügung standen. Der Parameter repräsentiert den Anteil organischer Substanz in der Feststoffmatrix.

In den Straßenproben beträgt der Glühverlust in der Fraktion < 0,063 mm im Median 15,4 %, für die 0,063-2,0 mm Kornfraktion 5,1 % und für die > 2,0 mm Kornfraktion 10,5 %.

Die vorliegenden Proben bestehen in dem Messzeitraum zwischen 05/2017 und 02/2018 vorwiegend aus mineralischer Substanz. Eine Monatsbetrachtung der Glühverluste zeigt, dass die höchsten Anteile organischer Substanz in der Feinfraktion vorzufinden sind und dieser Gehalt über die Jahreszeiten nur gering schwankt. Die beiden größeren Kornfraktionen haben einen geringeren organischen Anteil und auch diese Werte zeigen eine geringe Varianz über die Monate auf.

Als Fazit ist also festzuhalten, dass der Vegetationseinfluss in diesem Industrie- und Gewerbegebiet insgesamt als gering zu betrachten ist und er gegenüber der mineralischen Masse in den Hintergrund tritt.

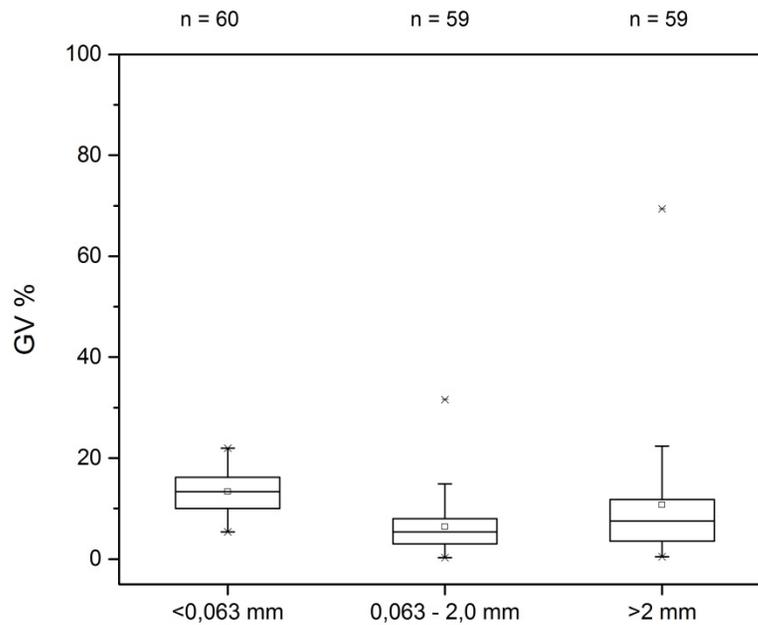


Bild 4.7: Glühverluste der Kornfraktionen für den Datenbestand der Straßenproben

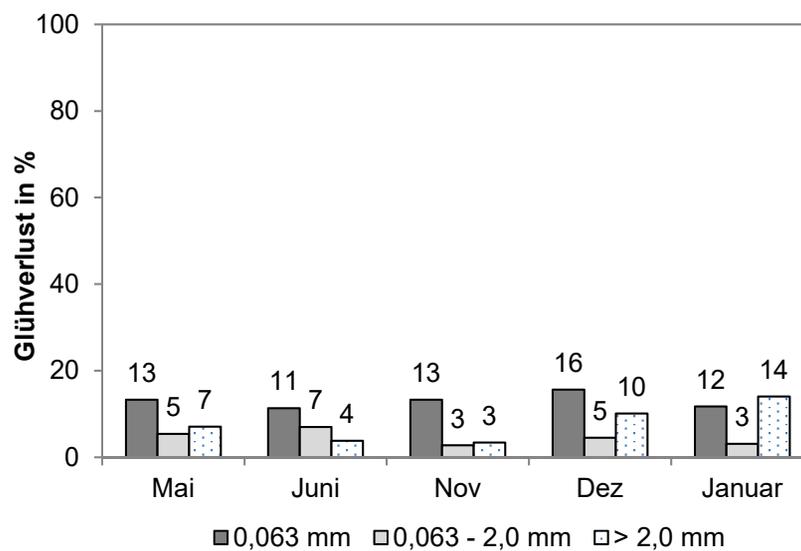


Bild 4.8: Saisonale Variabilität des Glühverlustes

Die Korngrößenverteilung des Materials, welches neben dem Straßeneinlauf deponiert wird, ist für die Proben aller Messstellen vom 15.01.2018 einer differenzierten Korngrößenanalyse mit sieben Maschenweiten unterzogen worden. Die Ergebnisse wurden als Sieblinien in Bild 4.9 dargestellt.

Insgesamt ist zwischen den Kurvenverläufen nur eine geringe Streuung zu beobachten. Demzufolge resultieren die in den beiden Einzugsgebieten vorherrschenden Transportprozesse in einer relativ gleichmäßigen Klassierung der Feststoffe an der Probenahmestelle.

Die Charakteristik der Kurven zeigt einen nahezu linearen Verlauf der Sieblinien aus den Einzugsgebieten Lochfeld und Federbach. Dies weist darauf hin, dass die auftretenden Partikel eine Matrix bilden, in der die Kornfraktionen relativ ausgewogen vertreten sind.

Betrachtet man die Kurvenschar im Detail wird deutlich, dass der Standort A 5 Bauhaus Parkplatz und A1 Lochfeld Straße sich bei den Anteilen der Feinfraktion geringfügig von den übrigen Kurven abhebt. Der Trockensubstanzanteil der Feinfraktion beträgt bei diesen Proben etwa 30 bzw. 40 % und liegt damit etwas höher gegenüber den anderen Kurven. Ein relativ hoher Anteil von ca. 25 % der TS ist der Kornfraktion $< 0,032$ mm zuzuordnen, dessen Anteil sich bei den übrigen Kurven der Messstellen ± 10 % bewegt.

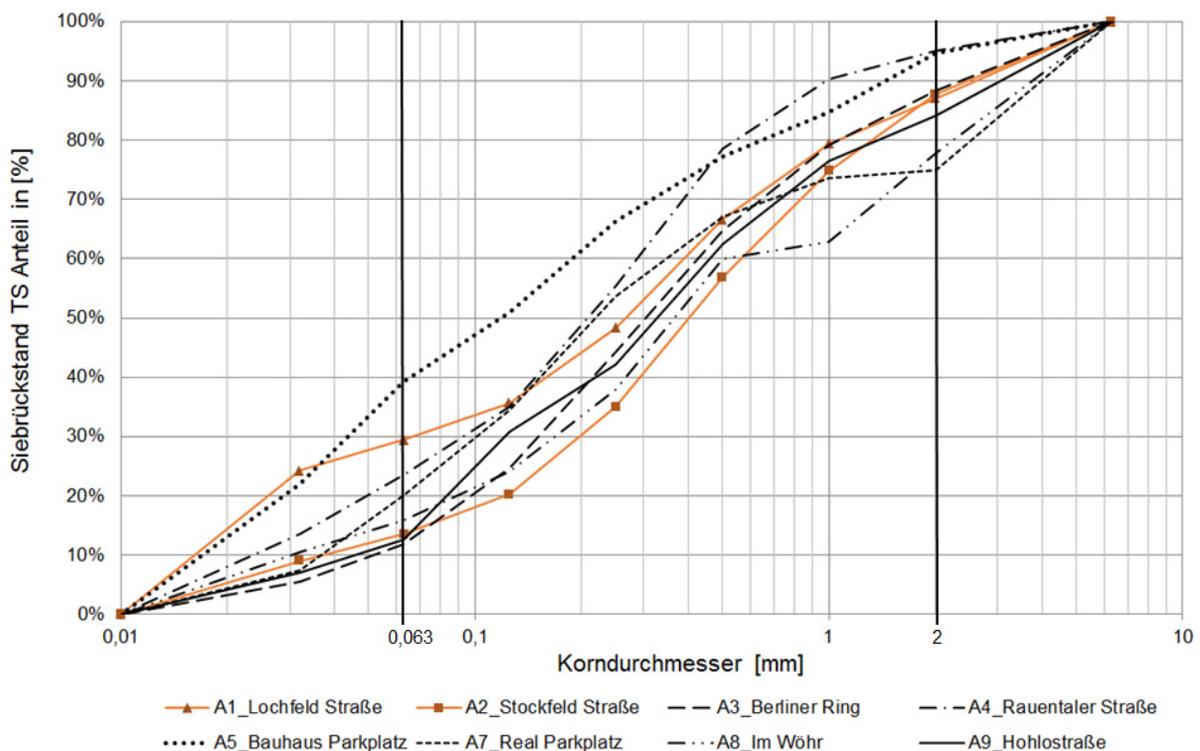


Bild 4.9: Sieblinien (TS) der Messstellen vom 15.01.2018 (orange = EZG Lochfeld, schwarz = EZG Federbach)

Die von der Kurvenschar ausgehende Charakteristik der Korngrößenanteile wurde auf ihre Repräsentativität für den Gesamtdatenbestand überprüft. Das Ergebnis zeigt, dass die Kurven den gesamten Datenbestand für das Winterhalbjahr sehr gut widerspiegeln. Die Mediane der Kornfraktionen sind bei den Sieblinien nahezu identisch mit den Medianen der Kornfraktionen aus dem Gesamtdatenbestand (siehe Tabelle 4.2).

Tabelle 4.2: Vergleich der Gewichtsanteile der Sieblinie mit dem Gesamtdatenbestand

	< 0,063 mm	0,063 - 2 mm	> 2 mm
Alle Daten ausgenommen vom 15.01.18 (n = 45)	18 %	68 %	8 %
Auf drei Kornfraktionen aggregierte Daten der Sieblinien vom 15.01.2018 (n = 9)	18 %	67 %	12 %

4.1.5 Feststoffaufkommen der Einzugsgebiete Lochfeld und Federbach

Im Folgenden wird die Verteilung des Feststoffaufkommens in g/m^2 für den Gesamtdatenbestand dargestellt. Die Auswertung bezieht sich auf die gesamte Feststoffmasse. Bild 4.10 (linkes Diagramm) stellt die in beiden Einzugsgebieten erhobenen Feststoffdaten in einer gemeinsamen Grafik dar. Es ist zu erkennen, dass das Feststoffaufkommen neben den Straßeneinläufen zwischen dem 25 % und 75 % Quartil 26 bzw. 89 g/m^2 beträgt. Der Median aller Daten beträgt 55 g/m^2 .

Das linke Diagramm in Bild 4.10 stellt die Ergebnisse der Trockensubstanz (g/m^2) aller Messstellen aus den Einzugsgebieten Lochfeld (1-2) und Federbach (3-9) in einem Boxplot dar. Der erhobene Datensatz wird durch die 25 % und 75 % Quartil von 26 bzw. 89 g/m^2 sehr gut beschrieben. Durch die Punktwolke ist ein Schwankungsbereich zu erkennen, bei dem das Maximum der Trockensubstanz bis zu $\sim 450 \text{ g}/\text{m}^2$ erreicht.

In dem rechten Diagramm erfolgt eine differenzierte Auswertung, die deutlich macht, dass die vorhandenen Trockensubstanzgehalte an den Messstellen stark variieren.

Im EZG Lochfeld lassen sich die Ergebnisse der Messstelle 1 und 2 mit 79 und 30 g/m^2 relativ gut in den Gesamtdatenbestand einordnen. Die Daten liegen sehr nahe an dem 25 % und 75 % Quartil. Auffällig ist jedoch, dass sich die beiden Messstellen bei sehr ähnlicher Verkehrsfrequenz und einer sehr geringen Distanz zueinander um mehr als 100 % in dem Feststoffaufkommen voneinander unterscheiden.

Die Daten der Messstellen 3-9 aus dem Einzugsgebiet Federbach weisen eine höhere Streuung des mittleren Feststoffaufkommens auf. Als Ausreißer mit einem Feststoffaufkommen von nur 4 g/m^2 im Median ist die Messstelle 5 „Untere Wiesen“ zu nennen sowie die Messstelle 6 „Real Parkplatz“ mit etwa 157 g/m^2 . Die übrigen Messstellen lassen sich recht gut zwischen dem 25 % und 75 % Quartil einordnen.

Das hohe Feststoffaufkommen an der Messstelle 6 könnte auf geringe Reinigungsintervalle der Zufahrt des Parkplatzes zurückzuführen sein.

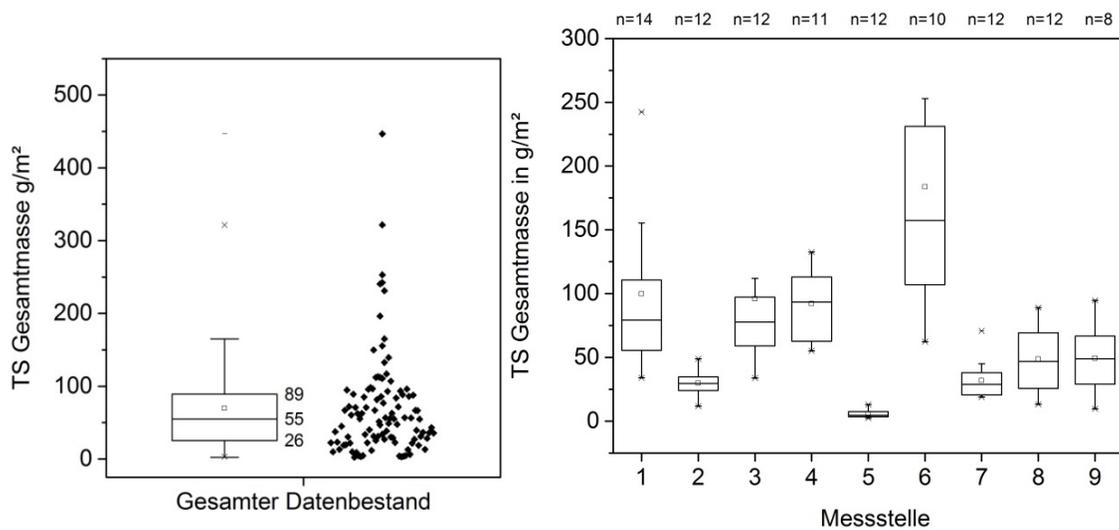


Bild 4.10: Summe Trockensubstanz in g/m² (links: gesamter Datenbestand, rechts differenziert nach Messstellen¹)

Tabelle 4.3: Trockensubstanz der gesamten Feststoffmasse in g/m² (Untersuchungszeitraum 10/2016 – 02/2018)

	Lochfeld				Federbach				
Messstelle	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Datensätze	14	12	12	11	12	10	12	12	8
Median der Gesamt TS	79	30	78	93	4	157	29	47	49
Median der TS < 0,063 µm	22	5	11	23	2	32	5	7	6
Anteil < 0,063 mm an der Gesamt TS	28 %	17 %	14 %	25 %	50 %	20 %	17 %	15 %	12 %

Das Feststoffaufkommen der Fraktion < 0,063 mm wurde in den Grafiken in Bild 4.11 ausgewertet. Aus dem Boxplot in der linken Grafik wird deutlich, dass das 25 % Quartil mit 5 g/m² und das 75 % Quartil 19 g/m² beträgt. Der Median beträgt 8 g/m², woraus erkennbar wird, dass die Grundgesamtheit der Daten nicht normal verteilt ist.

Die nach Messstellen differenzierte Auswertung ergibt für das EZG Lochfeld Konzentrationen von 5 und 22 g/m² (Mediane) und für das EZG Federbach zwischen 2 und 32 g/m² (Mediane).

Ausgehend von der Hypothese, dass feinstpartikuläre Feststoffe (Feinstaub) durch den Verkehr aufgewirbelt werden und anschließend absinken, wäre bei den Feinstpartikeln auch eine gleichmäßigere Ablagerung im Vergleich zur Gesamtmasse über die Einzugsgebietsfläche zu erwarten gewesen. Eine geringere Streuung der Daten gegenüber den Daten der Gesamtmasse wurde jedoch nicht beobachtet. Selbst nahegelegene Messstellen weisen signifikant unterschiedliche Feststoffmassen auf.

¹ Nummerierung der Messstellen: 1 Lochfeldstraße.; 2 Stockfeldstraße 3 Berliner Ring; 4 Rauentaler Straße; 5 Bauhaus Parkplatz; 6 Untere Wiesen; 7 Real Parkplatz Zufahrt; 8 Im Wöhr; 9 Hohlohstraße

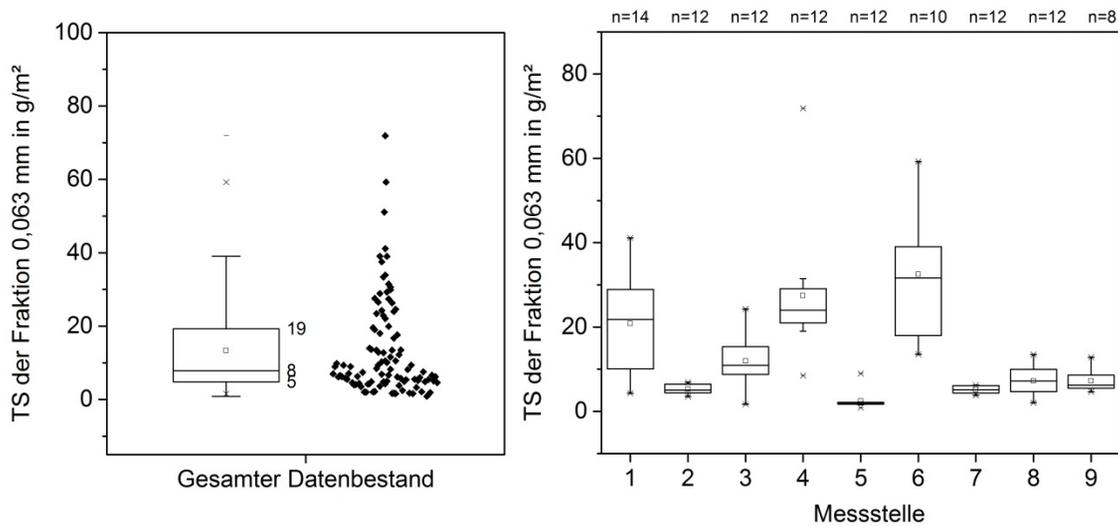


Bild 4.11: Trockensubstanz der Fraktion < 0,063 mm in g/m²

Ein statistischer Zusammenhang zwischen dem Verkehrsaufkommen und dem mittleren Aufkommen der gesamten Feststoffmenge (Gesamtfraktion) oder der Kornfraktion < 0,063 mm konnte nicht nachgewiesen werden, siehe Bild 4.12.

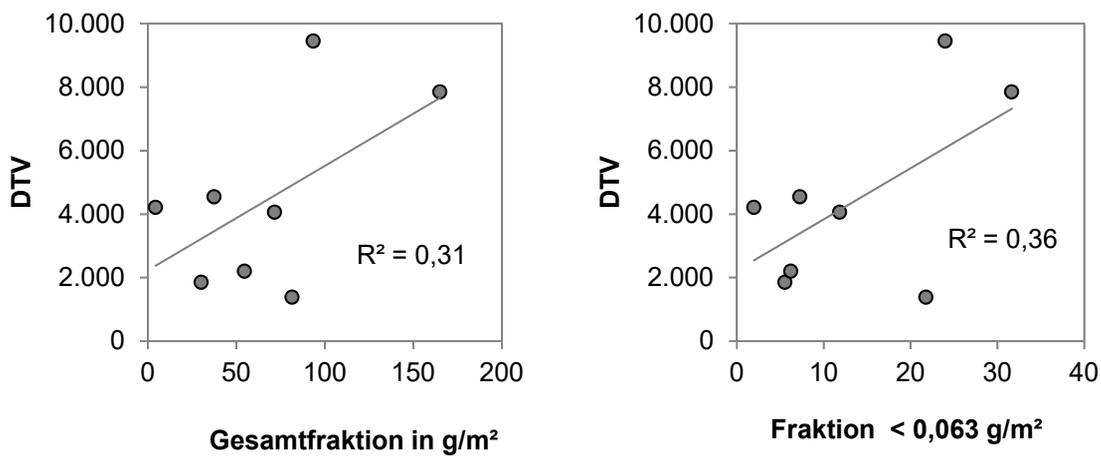


Bild 4.12: DTV und Feststoffaufkommen (Gesamtfraktion und Fraktion < 0,063 mm)

Offensichtlich sind weitere Einflussfaktoren vorhanden, welche einen monokausalen Zusammenhang ausschließen. Insbesondere sind die Makrostrukturen zu nennen, die den Oberflächenabfluss beeinflussen und damit die kleinräumigen Ablagerungs- und Transportmechanismen. Diese Makrostrukturen sind z. B. abgesenkte Fugen, Dellen oder Senken im Asphalt, bestimmte Neigungen im Straßenprofil, Bewuchs von Gras oder Moos in den Fugen des gepflasterten Rinnsteins oder den Bordsteinkanten, an denen sich Feststoffe ablagern.

4.1.5.1 Saisonalität des Feststoffaufkommens

Anhand der Datenreihe von zwölf Messungen konnte das Feststoffaufkommen über einen Zeitraum von einem Jahr ausgewertet werden. In Bild 4.13 wurde jeweils das Feststoffaufkommen der beprobten Messstellen für den jeweiligen Probenahmetag und das Einzugsgebiet summiert, um die jahreszeitlichen Schwankungen des Feststoffaufkommens abzubilden. Bedingt durch die geringere Anzahl von nur zwei Messstellen, sind die summierten Feststoffe im EZG Lochfeld gegenüber dem EZG Federbach mit sieben Messstellen geringer. Da hier nicht die Fracht des Einzugsgebietes berechnet, sondern nur die Saisonalität abgebildet wird, ist die absolute Feststoffmenge in diesem Kontext nicht von Bedeutung.

Die Datenlage spiegelt die Erwartungen nur bedingt wider. Die beiden Peaks im Einzugsgebiet Federbach im Mai und November können mit dem Beginn und dem Ende der Vegetationsperiode in Verbindung gebracht werden. Im Winter sind in beiden Einzugsgebieten nur geringe Feststoffmengen ermittelt worden. Andere Studien (z. B. Grotehusmann et al 2017, LfU, Bayern 2008) berichten über höchste Konzentrationen im Winter, die im Zusammenhang mit der Tausalanzwendung stehen. In Rastatt gab es im Untersuchungszeitraum nur zwei Frosttage Anfang Dezember.

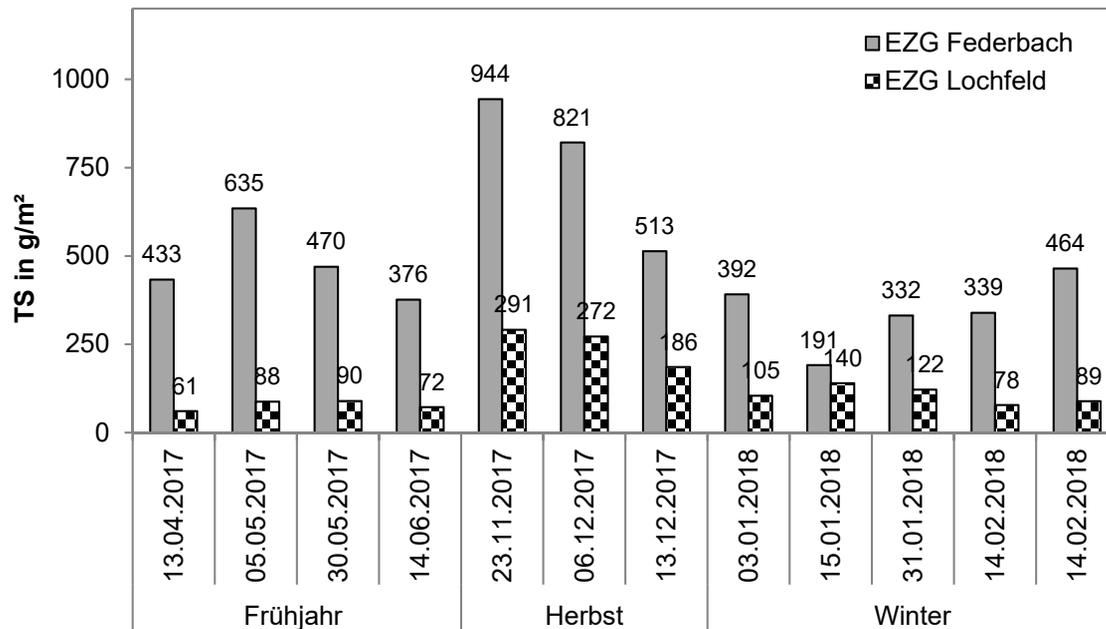


Bild 4.13: Variabilität des Feststoffaufkommens der Messstellen in Summe, differenziert nach Einzugsgebiet und Jahreszeit

4.1.5.2 Metallanalyse der Straßensedimente

Die Metallanalyse der Straßensedimente erfolgte einzugsgebietsspezifisch für den Zeitraum vom 23.11.2017 bis zum 14.02.2018 für die Parameter Zink, Cadmium, Kupfer, Blei und Eisen.

Es wurden die Sedimente von acht Probenahmetermenen untersucht, die einzugsgebietsspezifisch und entsprechend der Kornfraktion zu einer Mischprobe aggregiert wurden. Die Proben eines Probenahmetages bilden jeweils eine Mischprobe für die Kornfraktion < 0,063, 0,063-2,0 und > 2 mm. Für das EZG Lochfeld wurden die Proben der Messstellen 1 und 2, für das Einzugsgebiet Federbach die Feststoffproben der Messstellen 3 bis 9 aus gleichen Anteilen zu einer Mischprobe zusammengesetzt. Vorteil dieser Methode ist, dass sich hieraus eine für das Einzugsgebiet mittlere Konzentration der Metalle und des jeweiligen Korngrößenspektrums ergeben. Diese Vorgehensweise ermöglicht jedoch keine differenzierte Analyse der Daten, z. B. auf einen Zusammenhang zwischen Verkehrsaufkommen und der Fahrweise.

Die Datenauswertung zeigt, dass alle untersuchten Metalle dominierend in der Feinfraktion auftreten. Die Schwermetalle Zink, Kupfer und Blei liegen zu einem Anteil von 74-88 % in der Partikelfraktion < 0,063 mm vor. Zwischen 9-21 % treten in der Fraktion 0,063-2,0 mm auf. Der Anteil in der > 2 mm Fraktion ist vernachlässigbar. Cadmium konnte in keiner Probe nachgewiesen werden, da die Konzentrationen in jeder Probe unterhalb der Bestimmungsgrenze lagen.

Eisen weist eine im Vergleich zu den Schwermetallen unterschiedliche Verteilung in den Kornfraktionen auf. Im Vergleich mit den zuvor genannten Schwermetallen, ist der Eisenanteil in der Feinfraktion geringer und in den Grobfraktionen höher. Es liegen zwischen 55-59 % des Eisens in der Feinfraktion, 24-29 % in der Fraktion 0,063-2,0 mm und zwischen 16-17 % in der > 2 mm Fraktion vor. Durch diese Verteilung nimmt der Parameter Eisen eine gewisse Sonderstellung ein. Der hohe Anteil grober Eisenfragmente kann auf die Korrosion von Kfz zurückgeführt werden.

Tabelle 4.4: Verteilung der Metallbeladung der verschiedenen Korngrößen (n = 8)

	Zink		Kupfer		Blei		Eisen	
	Lochfeld	Federbach	Lochfeld	Federbach	Lochfeld	Federbach	Lochfeld	Federbach
> 2,0mm	2 %	4 %	3 %	3 %	3 %	8 %	16 %	17 %
0,063-2mm	11 %	21 %	14 %	21 %	9 %	19 %	29 %	24 %
< 0,063mm	87 %	75 %	84 %	76 %	88 %	74 %	55 %	59 %

Bild 4.14 stellt die Messwerte der Metalle für die Kornfraktion < 0,063 mm in Boxplot Diagrammen dar. Für den Parameter Zink weichen die Mediane der beiden Einzugsgebiete mit 807 mg/kg in Lochfeld zu 946 mg/kg in Federbach nur gering voneinander ab. Für das EZG Federbach sind die Konzentrationen über den Messzeitraum sehr stabil. Auffallend hingegen

ist die hohe Streuung der Daten im EZG Lochfeld. Anhand von Bild 4.15 wird deutlich, dass die breite Streuung daraus resultiert, dass in den ersten drei Messungen die Werte deutlich geringer gegenüber dem Median ausgefallen sind.

Bei Kupfer ist die Median-Konzentration im EZG Federbach mit 240 mg/kg um den Faktor 1,7-mal größer als im EZG Lochfeld (140 mg/l). Für die Parameter Blei und Eisen sind die Median-Konzentrationen der beiden EZG nahezu identisch. Sie liegen für Blei zwischen 61-63 mg/kg und für Eisen bei 22-26 g/kg.

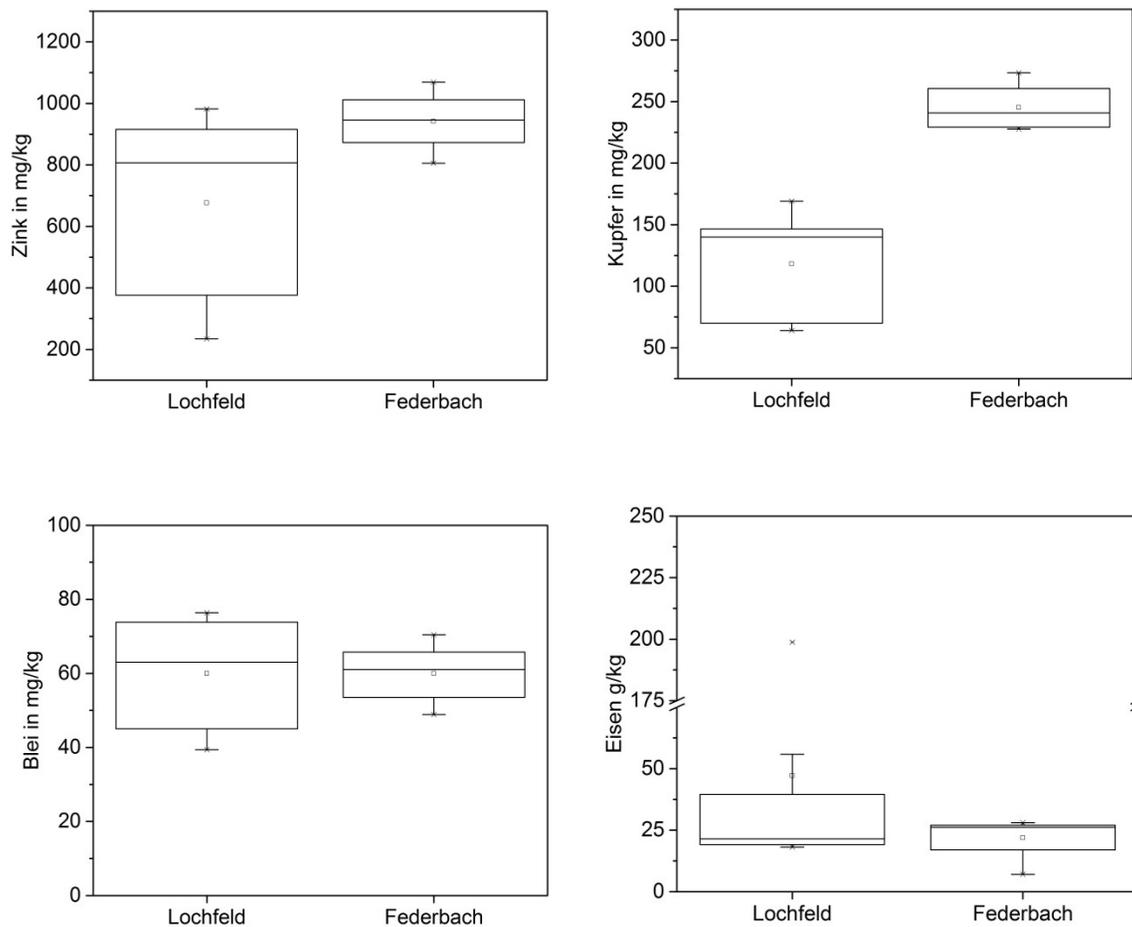


Bild 4.14: Konzentrationen von Zink, Kupfer, Blei und Eisen im Straßensediment der Einzugsgebiete Lochfeld und Federbach in der Kornfraktion <math>< 63 \mu\text{m}</math> ($n = 8$)

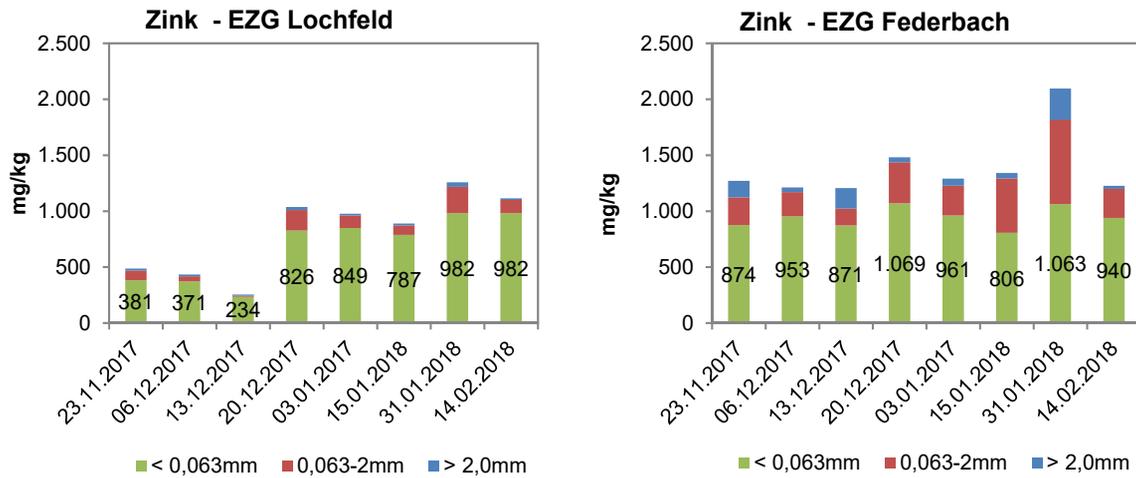


Bild 4.15: Zeitchronologische Darstellung der Zink-Konzentrationen im EZG Lochfeld²

Die in diesem Vorhaben ermittelten Konzentrationen werden zur Orientierung mit Konzentrationen eines Vorhabens, das von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) gefördert wurde, verglichen. Der Vergleich der Konzentrationen des Straßenkehrichts mit den Sedimenten aus dem Straßenabfluss von Bundesautobahnen erfolgt in Tabelle 4.5. Die Daten wurden anhand der DTV absteigend sortiert.

Anhand der Messergebnisse wird ersichtlich, dass die Sedimente der Bundesautobahnen deutlich stärker belastet sind, als der Straßenkehricht aus den Industrie- und Gewerbegebieten Lochfeld und Federbach.

Unter Berücksichtigung des hohen Verkehrsaufkommens der Bundesautobahnen von bis zu 85.600 DTV, entspricht dieses Ergebnis den Erwartungen.

Tabelle 4.5: Vergleich der Metallkonzentrationen (Mediane) von Feststoffen aus Autobahnabflüssen mit Straßenkehricht aus den Einzugsgebieten Lochfeld und Federbach

Messstelle	DTV	Zink mg/kg	Kupfer mg/kg	Blei mg/kg	Cadmium mg/kg	Eisen g/kg
Steinsfurt BAB A 6*	85.600	2.499	914	113	0,80	42
Großburgwedel BAB A 7*	66.200	2.209	613	122	0,97	31
Kirchhorst BAB A 37*	45.000	1.663	716	174	0,90	38
EZG Federbach - Straßensediment	4.381	946	241	61	< BSG	26
EZG Lochfeld - Straßensediment	1.621	807	140	63	< BSG	21

*Quelle: Grotehusmann et al. (2017)

Basierend auf den Datenreihen aus Tabelle 4.5, wurde der statistische Zusammenhang zwischen dem DTV-Verkehrsaufkommen und der Beladung der Feststoffe mit den Metallen untersucht, siehe Bild 4.16. Es zeigt sich ein hoher Zusammenhang zwischen dem Verkehrs-

² Weitere Diagramme zu den Metallkonzentrationen im zeitchronologischen Verlauf sind Kapitel 7.4 im Anhang zu entnehmen.

aufkommen und der Beladung der Feststoffe mit den Metallen Zink ($R^2=0,99$) und Kupfer ($R^2=0,90$). Für Blei ist dieser Zusammenhang nicht so deutlich erkennbar.

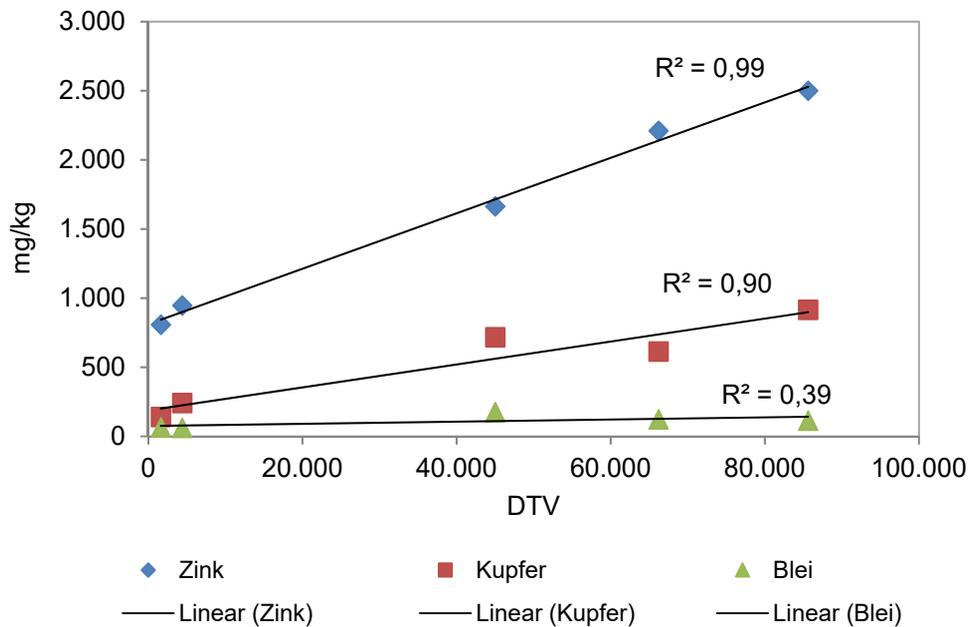


Bild 4.16: Korrelation DTV und Konzentrationen von Metallen an Straßensedimenten

4.1.6 Verteilung der Feststoffe auf Straßen

Die Verteilung der Feststoffe auf den Straßen wurde entsprechend der Beschreibung in Absatz 3.2.3 mit einer Stichprobe untersucht. Ergänzend zu der standardmäßig genommenen Probe neben dem Straßeneinlauf, wurden also zwei weitere Proben im Längsverlauf der Straße am Fahrbahnrand sowie zwei Proben im Querverlauf der Straße auf der Fahrbahn genommen, siehe Abschnitt 3.2.3. Die Daten beziehen sich auf die absolute Masse, die auf den Messfenstern ermittelt wurden, bezogen auf eine Fläche von 1 m². Die Ergebnisse dieser Stichprobe werden verwendet, um die genommenen Proben auf die Einzugsgebietsfläche (Straßen) zu übertragen. Darüber hinaus geben sie Hinweise auf Transportmechanismen und systematische Ablagerungen von Feststoffen auf Straßen.

An dem Untersuchungsstandort liegt der DTV bei ca. 2.000 vor, bei der die Geschwindigkeit auf 50 km/h begrenzt ist. Die Ergebnisse der Messpunkte 1-3 am Straßenrand weisen die höchsten Feststoffmassen auf.

In der Summe lagern etwa 22 g der Feststoffe auf dem Messfenster am Straßeneinlauf, 16 g auf dem mittleren Messfenster und 17 g auf dem Messfenster, das zwischen den beiden Straßeneinläufen liegt. Auf der Fahrbahn lagern im vierten Messfenster ca. 6 g und auf dem fünften Messfenster etwa 4 g, siehe Bild 4.17. Somit konnte bestätigt werden, dass sich am

Fahrbahnrand das größte Feststoffdepot aufbaut. Mit zunehmender Entfernung zum Straßeneinlauf reduziert sich die Gesamtmasse am Fahrbahnrand.

Basierend auf diesen Ergebnissen lagern etwa 70 % der Gesamtmasse am Fahrbahnrand und etwa 30 % der Feststoffmasse auf der übrigen Fahrbahnoberfläche. Der prozentuale Anteil am Fahrbahnrand ist mit knapp 70 % deutlich geringer wie zuvor angenommen wurde.

Obwohl die absoluten Massen auf der Fahrbahn recht unterschiedlich sind, wird durch die Betrachtung der Gewichtsanteile deutlich, dass sich die Korngrößenanteile zumindest an diesem Standort relativ gering unterscheiden. Die Kornfraktion > 2 mm hat mit 8-19 % geringe Gewichtsanteile an der Gesamtmasse. Mit 59-69 % dominiert die Masse der Kornfraktion zwischen 2,0 und 0,063 mm. Der feinpartikuläre Anteil der Kornfraktion < 0,063 mm ist mit 19-25 % relativ homogen verteilt.

Anhand der Stichproben, die im Längsverlauf am Fahrbahnrand genommen wurden, ist in der Stockfeldstraße ersichtlich, dass die höchste Feststoffmasse vor dem Straßeneinlauf deponiert wird, insgesamt die Mengen am Fahrbahnrand aber nur gering variieren (16-17 g/m²).

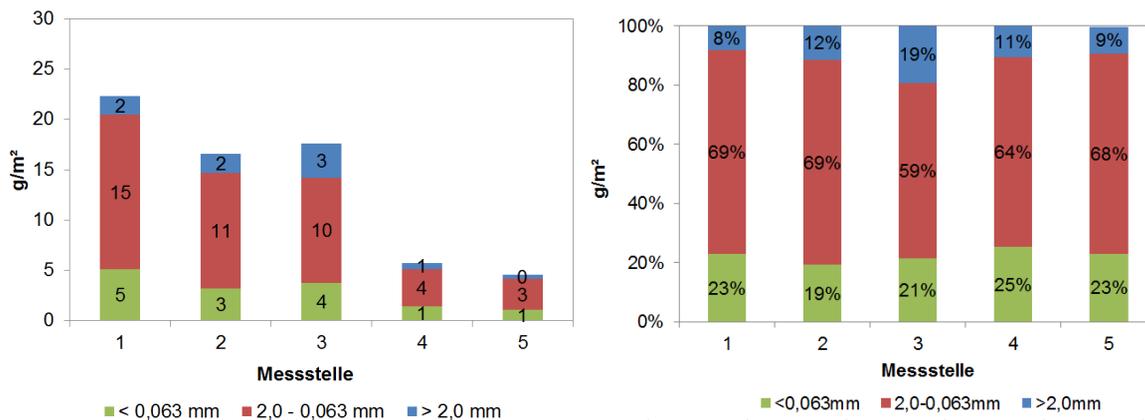


Bild 4.17: Feststoffverteilung auf der Stockfeldstraße am 14.02.2018 (Messstelle 1-3 Rinnstein, Messstelle 4-5 Fahrbahn)

Eine weitere Stichprobe in der Rauentaler Straße, an der die Verteilung der Feststoffe ebenfalls im Längsverlauf am Fahrbahnrand untersucht wurde, veranschaulicht, dass die Fraktionierung entlang des Fahrbahnrandes noch weitaus stärker ausgeprägt sein kann. An diesem Standort ist das tägliche Verkehrsaufkommen mit einem DTV > 9.000 höher als am Standort in der Stockfeldstraße und weist ein ca. 10-mal höheres Feststoffaufkommen auf. An diesem Standort nimmt die Gesamtstoffmasse mit der Entfernung zum Straßeneinlauf exponentiell ab. Insbesondere die Grobfraktion nimmt maßgeblich ab, während die absolute Masse der Feststoffe < 0,063 mm relativ konstant bleibt.

Aus den Standortuntersuchungen kann abgeleitet werden, dass

- auf der Fahrbahn als auch am Fahrbahnrand die Feststoffe mit der Kornfraktion 0,063 bis 2,0 mm dominieren,
- die gesamte Feststoffmasse nahe des Straßeneinlaufes am höchsten ist und mit zunehmender Distanz abnimmt,
- der Feststoffanteil > 2 mm auf der Fahrbahn gegen Null geht und
- die absolute Masse der Kornfraktion $< 0,063$ mm lokal (Straßenabschnitt) relativ konstant ist, aber innerhalb eines Einzugsgebietes stark schwankt.

Die zuvor geschilderten Ergebnisse sind nicht nur von lokaler Bedeutung. Da davon auszugehen ist, dass allgemeingültige Transportmechanismen und Prozesse zugrunde liegen, sollte dieses Ablagerungsverhalten auch auf andere Straßen übertragbar sein.

Die auf der Fahrbahn abgelagerten Partikel werden durch den Oberflächenabfluss Richtung Straßeneinlauf verfrachtet. Bei abnehmender Niederschlagsintensität verringert sich die Schleppkraft und gröbere Partikel lagern sich auf dem Transportweg Richtung Straßeneinlauf ab. Entlang des Transportweges kommt es dadurch zu einem stetig zunehmenden Feststoffdepot Richtung Ablauf. Die Gewichtsanteile des Substrates werden mit zunehmender Nähe zum Straßeneinlauf durch Partikel der Kornfraktionen $> 0,063$ mm dominiert. Die Feststoffe werden über den Transportweg klassiert.

Auf Grundlage der ermittelten Feststoffablagerungen auf den Straßen im Längsverlauf (Messstellen 1, 2, 3) und Querprofil (Messstellen 1, 4, 5) wurde ersichtlich, dass die feinp Partikulären Feststoffe (lokal z. B. ein Straßenabschnitt) homogen über die Fläche einer Fahrbahn verteilt sind. Die größeren Partikel unterliegen einer heterogenen Verteilung auf der Fläche.

Für die Berechnung der Fracht einer Straßenabschnittsfläche kann daher nicht der Messwert der standardisiert beprobten lokalen Fläche herangezogen und auf eine beliebig große Fläche übertragen werden. Auf Grundlage der zuvor dargestellten Daten zur Verteilung der Feststoffe auf der Fläche wurde ein Korrekturfaktor ermittelt, der mit dem standardisiert beprobten Messfenster multipliziert wird. Der Korrekturfaktor basiert auf einem gewichteten Mittelwert der Messwerte für die Probenahmeflächen 1 bis 5 und nur auf den Gewichtsanteilen der Kornfraktionen nicht auf der absoluten Masse. Die Werte der rot markierten Messfelder werden auf die benachbarten Flächen übertragen und das gewichtete Mittel über die nachfolgende Formel berechnet, siehe Bild 4.18.

Der auf diese Weise ermittelte Korrekturfaktor wird für die charakteristische Verteilung der Feststoffe in den untersuchten Einzugsgebieten angenommen.

$$\text{Korrekturfaktor} = \frac{(12 * \text{Messwert } 5 + 12 * \text{Messwert } 4 + 4 * \text{Messwert } 1 + 4 * \text{Messwert } 2 + 4 * \text{Messwert } 3)}{36}$$

Der **Korrekturfaktor** beträgt **0,45** für die Fracht der Kornfraktion < 0,063 mm und **0,44** für die Fracht der Gesamtmasse. Diese Faktoren werden für die Übertragung der Ergebnisse von den neben den Straßeneinläufen gelegenen Messstellen (TS g/m²) auf die Teileinzugsgebietsfläche der Straßen angewandt.

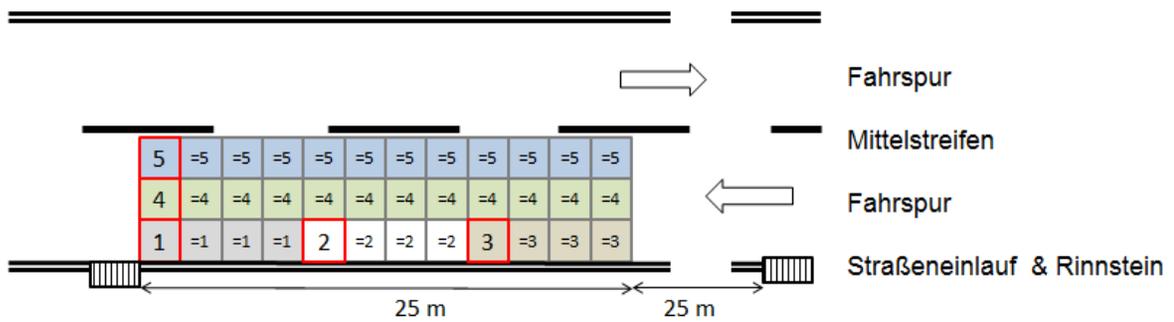


Bild 4.18: Ermittlung des Korrekturfaktors für die Berechnung der Fracht einer Straßenabschnittsfläche basierend auf dem gewichteten Mittel

4.1.7 Überprüfung des Feststoffdargebots auf Straßen in Zusammenhang mit dem Niederschlag

Die für das Untersuchungsgebiet ermittelten Niederschlagsdaten sind in Bild 4.19 illustriert. Dargestellt wurden die Niederschlagsereignisse in mm/m² und Stunde für den Zeitraum 01.01.2017 bis 30.03.2018. Innerhalb dieses Zeitraums erfolgte das Monitoring der Feststoffe auf den Straßen.

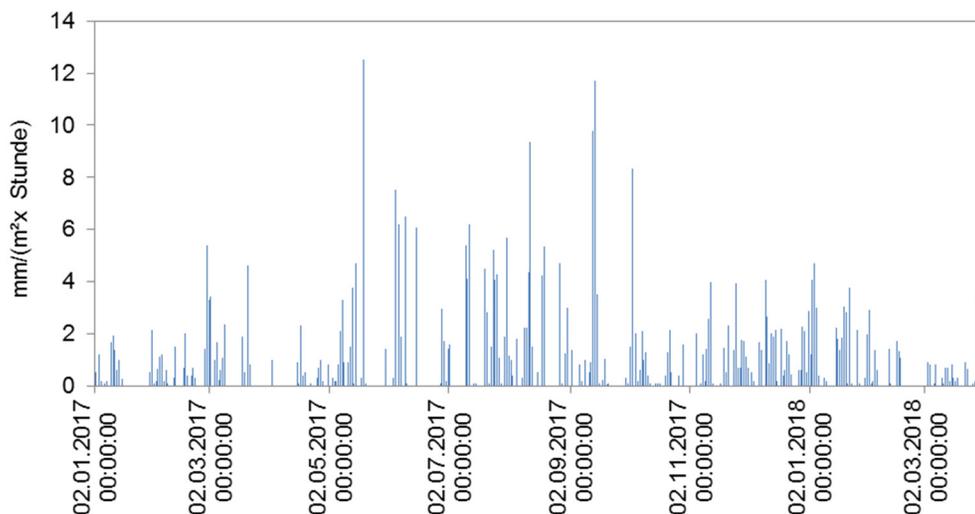


Bild 4.19: Niederschlagsdaten für das Untersuchungsgebiet

Eine Auswertung der Niederschlagsdaten erfolgt in Tabelle 4.6. für den Zeitraum der Probenahmen. Insgesamt sind zwischen 17 und 91 l/m² in den Zeiträumen gefallen. Die Nieder-

schlagsereignisse waren von unterschiedlicher Intensität. Für den Zeitraum gibt es die Tendenz, dass hohe Niederschlagssummen mit hohen Intensitäten verknüpft sind.

Für die Einteilung der Niederschlagsdaten nach der Niederschlagsintensität wurde eine Einteilung des DWD³ zugrunde gelegt.

leicht	Niederschlagshöhe in 60 Minuten < 2,5 mm
mäßig	Niederschlagshöhe in 60 Minuten ≥ 2,5 mm bis < 10,0 mm
stark	Niederschlagshöhe in 60 Minuten ≥ 10,0 mm
sehr stark	Niederschlagshöhe in 60 Minuten ≥ 50,0 mm

Anhand der Auswertung in Tabelle 4.6 wird ersichtlich, dass in Summe 666 Datensätze in die Kategorie „leicht“ < 2,5 mm, 10 Regenereignisse als „mäßig“ (≥ 2,5 -10 mm) und 1 Regenereignis als „stark“ (≥ 10 mm) zugeordnet werden können.

Tabelle 4.6: Auswertung der Niederschlagsdaten

Zeitraum Probenahme		Tage	Trocken-Tage	Summe Niederschlag l/m ²	Max. Intensität l/m ²	Regen			
von	bis					leicht < 2,5 mm	mäßig ≥ 2,5-10,0 mm	stark ≥ 10,0 mm	sehr stark ≥ 50 mm
13.04.-	05.05.2017	22	10	17,10	2,3	100	-	-	-
05.05.-	30.05.2017	25	12	74,76	12,5	65	6	1	-
30.05.-	14.06.2017	15	8	35,30	7,53	24	1	-	-
23.11.-	06.12.2017	13	4	60,80	4,0	85	5	-	-
06.12.-	13.12.2017	7	1	37,00	4,1	41	3	-	-
13.12.-	20.12.2017	7	0	26,50	2,2	32	-	-	-
20.12.-	03.01.2018	14	3	43,60	2,9	87	1	-	-
03.01.-	15.01.2018	12	6	32,50	4,7	34	3	-	-
15.01.-	31.01.2018	16	4	91,00	3,8	117	4	-	-
31.01.-	14.02.2018	14	7	40,90	2,9	81	1	-	-
Summe						666	24	1	-

Im Rahmen des Monitorings wurden die Straßen in unterschiedlichen Zeitintervallen beprobt. Diese Zeitintervalle lagen zwischen sieben und 25 Tagen. In drei Prüfschritten wurde geprüft, ob das Feststoffaufkommen auf den Straßen einen Zusammenhang mit der verfügbaren Akkumulationszeit, dem Niederschlagsabflussvolumen oder der Niederschlagsintensität zeigt. Bild 4.20 stellt die Ergebnisse zum Feststoffaufkommen des Einzugsgebietes Federbach als Summe den unterschiedlichen Probenahmezeiträumen gegenüber. Es wird zwischen der gesamten Feststoffmasse und nur der feinstpartikulären Feststoffmasse der Fraktion 0,063 mm differenziert.

³ <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101812&lv3=101906>

Der zu erwartende Zusammenhang, dass mit einem größeren zeitlichen Abstand zwischen den Probenahmen das Feststoffaufkommen steigt, wird durch die vorliegenden Daten nicht bestätigt. Es kann vermutet werden, dass sich in Abhängigkeit vom Betrieb der Straßen in kurzer Zeit eine für den Standort charakteristische Gleichgewichtskonzentration einstellt (siehe auch Bild 4.2.5).

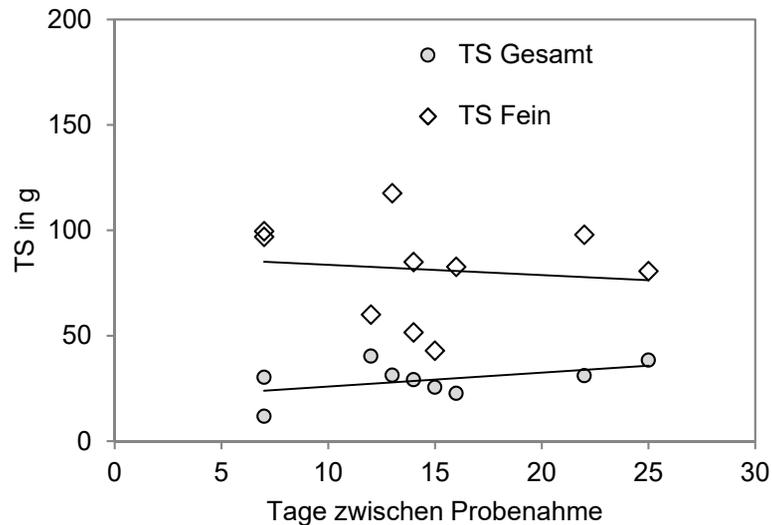


Bild 4.20: Feststoffaufkommen in Abhängigkeit von der Zeit zwischen den Probenahmen am Beispiel des EZG Federbach

Für Bild 4.21 wurde die Feststoffsumme der Messstellen aus dem EZG Federbach herangezogen und auf einen Zusammenhang mit der Niederschlagshöhe im Zeitraum zwischen den Probenahmen überprüft.

Die Hypothese, dass mit zunehmenden Niederschlagsvolumen die Flächen stärker abgespült werden und weniger Feststoffe auf den Flächen zurückbleiben, konnte hier nicht bestätigt werden. Zu diesem Ergebnis kommt auch eine Überprüfung, bei der die Daten differenziert nach den Messstellen ausgewertet wurden. Ein Zusammenhang zwischen der Niederschlagshöhe und einem sinkenden Feststoffaufkommen der Kornfraktion $< 0,063$ mm ist nicht erkennbar.

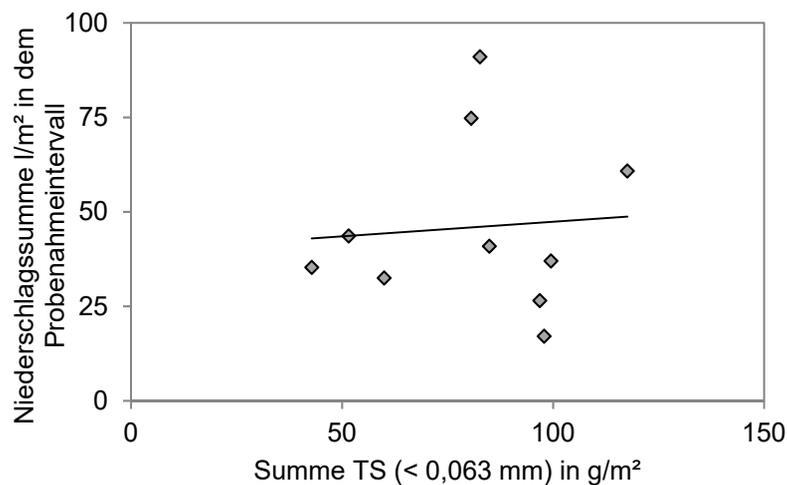


Bild 4.21: Zusammenhang zwischen Feststoffaufkommen und Niederschlagshöhe am Beispiel der Trockensubstanz (Fraktion <0,063 mm) des EZG Federbach

Im Folgenden wurde der Zusammenhang zwischen dem Dargebot an Feststoffen der Kornfraktion < 0,063 mm und der Niederschlagsintensität geprüft. Bild 4.22 stellt die Datenlage in einer Grafik dar. Ein statistischer Zusammenhang konnte nicht nachgewiesen werden.

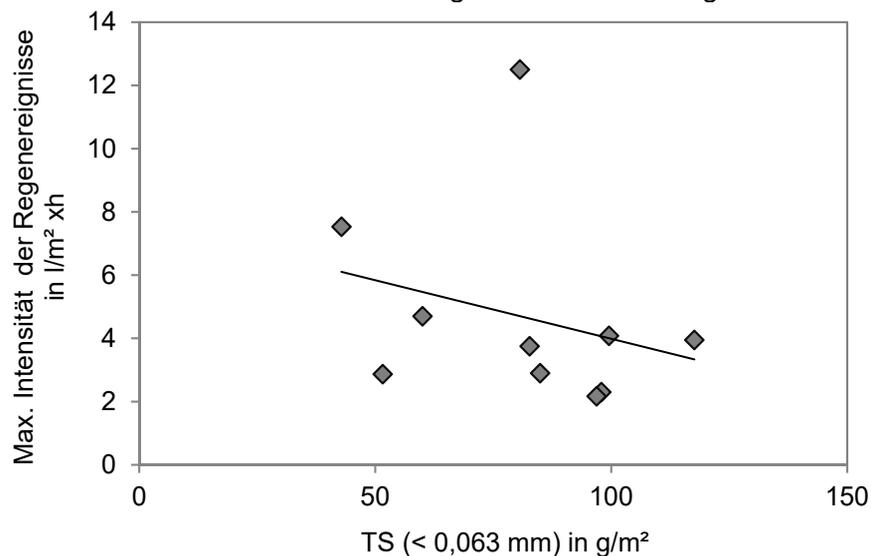


Bild 4.22: Feststoffdargebot (TS) der Fraktion < 0,063 mm im Zusammenhang mit dem Auftreten der maximalen Intensität der Regenereignisse am Beispiel EZG Federbach

Eine Ursache für den nicht signifikanten Zusammenhang in diesem Monitoring ist in der geringen Anzahl der Regenereignisse mit hoher Niederschlagsintensität zu sehen. Lediglich zwei Datensätze gehen über 5 l/(m²xStunde) hinaus.

In Bezug auf die bereits ausgewerteten Daten erscheint es nun plausibel, dass die Feststoffmenge der Kornfraktion < 0,063 mm in Bild 4.20 über die Zeit der unterschiedlichen Probenahmeintervalle relativ stabil zu bleiben scheint. Die Niederschlagsintensität ist nicht ausreichend, um die Feststoffe abzuwaschen.

Ähnliche Erfahrungen machten auch Hahn & Xanthopoulos (1993), die bis zu einer Regenhöhe von 12 mm ein transportlimitierendes Austragsverhalten feststellten.

Es kann angenommen werden, dass aus diesem Grund auch die in Bild 4.21 dargestellte Verteilung der Punktwolke bedingt durch Niederschläge mit geringer Intensität keine Abnahme im Feststoffdargebot erkannt wird, weil das Dargebot an Feinpartikeln durch die geringe Niederschlagsintensität nicht mobilisiert wird. Der Wash-off-Effekt ist bei den gemessenen Niederschlägen gering.

4.1.8 Berechnung des Feststoffdargebotes in den Einzugsgebieten

Die Berechnung des Feststoffdargebotes der beiden Einzugsgebiete basiert auf den Ergebnissen des Abschnitts 4.1.5. Tabelle 4.3 beinhaltet Mittelwerte (g/m^2) für das Feststoffaufkommen der Straßen und Gehwege, die an den Messstellen in dem Einzugsgebiet ermittelt wurden. Der Korrekturfaktor wurde hier bereits einbezogen. Über die n-teilige Einzugsgebietsfläche, die in der differenzierten Flächenaufnahme in Abschnitt 4.1.1 durchgeführt wurde, wurde das Feststoffdargebot der Fläche in kg/ha ermittelt. Für die Übertragung der Daten auf das jährliche Stoffaufkommen wurde das Feststoffdargebot von der Fläche (pro Monat) auf zwölf Monate hochgerechnet. Diese Ergebnisse berücksichtigen bereits die Stoffausträge aus dem Einzugsgebiet; darunter das in Deutschland übliche zweiwöchige Straßenkehren. Um die Dachflächen ergänzen zu können, wurde eine mittlere Feststoffkonzentration im Dachflächenabfluss von $10 \text{ mg}/\text{l}$, die sich nur aus Feinpartikeln zusammensetzt, angenommen. Zur Berücksichtigung der Parkflächen wurden die Daten des Bauhausparkplatzes übernommen. In Tabelle 4.7 ist auf dieser Grundlage das geschätzte Feststoffaufkommen der Einzugsgebiete Lochfeld und Federbach zusammengefasst.

Tabelle 4.7: Spezifisches Feststoffdargebot der Fraktion $< 0,063 \text{ mm}$ in den Einzugsgebieten

	Lochfeld				
	$A_{e,k,b,a}$ in ha	Ψ -	Abfluss in m^3/a	$\text{AFS}_{\text{gesamt}}$ in $\text{kg}/(\text{ha}\cdot\text{a})$	AFS_{fein} in $\text{kg}/(\text{ha}\cdot\text{a})$
Dach	6,63	0,80	37.658	57	57
Park	5,84	0,60	24.878	240	120
Straße	2,74	0,80	15.563	2.299	366
Gehweg	0,55	0,70	2.734	224	4
Summe	15,7	-	80.834	2.820	547
nur Verkehrsflächen	9	-	43.175	2.763	490
	Federbach				
	$A_{e,k,b,a}$ in ha	Ψ -	Abfluss in m^3/a	$\text{AFS}_{\text{gesamt}}$ in $\text{kg}/(\text{ha}\cdot\text{a})$	AFS_{fein} in $\text{kg}/(\text{ha}\cdot\text{a})$
Dach	32,8	0,80	186.304	57	57
Park	35,1	0,60	149.526	240	120
Straße	7,25	0,80	41.180	2886	369
Gehweg	2,72	0,70	13.518	1603	49
Summe	77,8	-	390.528	4785	595
nur Verkehrsflächen	45	-	204.224	4.729	538

Die spezifische Jahresfracht der gesamten Feststoffe beträgt im Einzugsgebiet Lochfeld etwa 2.820 kg/(ha·a). Für die Kornfraktion $< 0,063$ ergibt sich eine Masse von etwa 547 kg/(ha·a). Der Feinanteil beträgt in diesem Einzugsgebiet damit etwa 19 %.

Das spezifische Feststoffdargebot für die gesamten Feststoffe ist im Einzugsgebiet Federbach mit 4.785 kg/(ha·a) um den Faktor 1,6 höher. Eine Ursache hierfür ist die hohe Verkehrsfrequenz, die dazu führt, dass sowohl auf den Straßen als auch den Gehwegen ein hohes Feststoffpotenzial gefunden wurde.

Das spezifische Feststoffdargebot für die feinen Partikel $< 0,063$ unterscheidet sich mit 595 kg/(ha·a) dagegen kaum von dem im Einzugsgebiet Lochfeld. Der Feinpartikelanteil an der Gesamtfracht beträgt etwa 12 %.

Bei den ermittelten Frachten handelt es sich um das Dargebot auf der Fläche. Zu welchem Anteil diese Frachten tatsächlich abgeschwemmt und bis zum Regenbecken transportiert werden, wird in Kapitel 5 diskutiert.

4.2 Untersuchungen der Regenklärbecken

4.2.1 Gewichtsanteile und Glühverluste der Feststoffe

Die an den Regenbecken gezogenen Proben wurden über die Gewichtsanteile auf ihre Korngrößenverteilung analysiert. Im Hinblick auf einen Vergleich mit den Einzugsgebietsdaten ist die Verteilung des Korngrößenspektrums in den Zulaufproben der beiden Regenklärbecken von besonderem Interesse

In Bild 4.23 wurden in einem Boxplot die erhobenen Messdaten im Zulauf während der Entlastungsphase (Zu_KÜ) ausgewertet. Die Feststoffe sind an beiden Regenklärbecken durch die Partikel der Feinfraktion dominiert. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Ergebnissen der Untersuchung beider Becken in REFENI 1.

Für das RKB Lochfeld beträgt der Anteil der Fraktion $< 0,063$ mm im Median 97 % und für das RKB Federbach 91 %. Dieses Ergebnis ist unter anderem auf die Geschiebeschächte, die zulaufseitig dem Becken vorgeschaltet sind, zurückzuführen.

Da bei beiden Standorten bereits zulaufseitig nur feine Partikel ankommen, ist der Sedimentationsprozess in den Regenbecken nicht mit einer weiteren signifikanten Abreicherung der Grobfraktion verbunden.

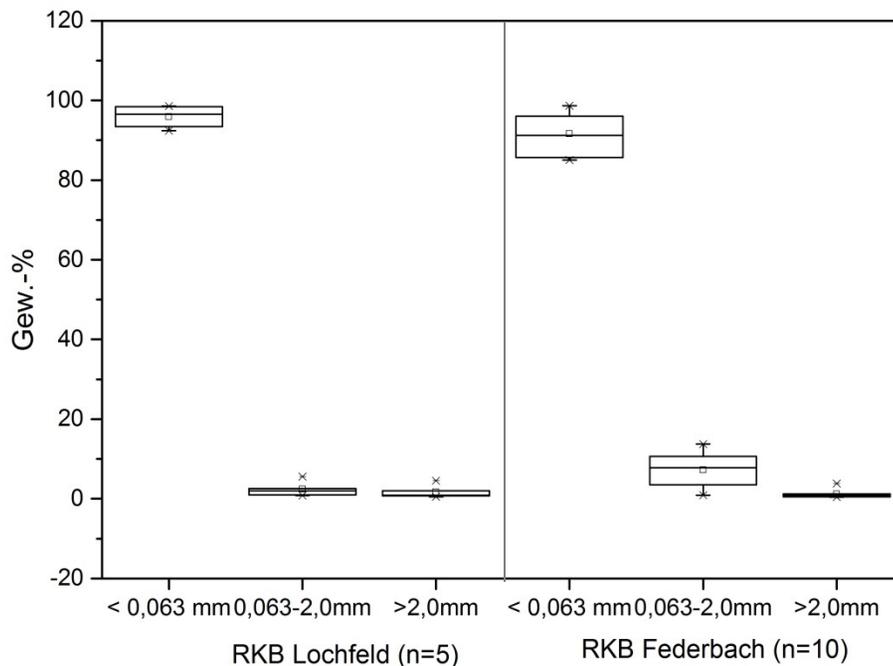


Bild 4.23: Gewichtsprozent der Kornfraktionen aus dem Zulauf der Regenklärbecken Lochfeld und Federbach

Die Proben des Monitorings wurden standardmäßig auf ihren Glühverlust analysiert. Bild 4.24 zeigt die Messwerte des RKB Federbach. Der Glühverlust beträgt in der Phase der Beckenvollfüllung (Zu_Füll) etwa 34 % (Median) für die Fraktion < 0,063 mm. Dieser Wert ist in den zu- und ablaufseitig gezogenen Proben während der Entlastung stabil.

In der Kornfraktion 0,063-2,0 mm ist der Glühverlust mit 54 % im Median deutlich höher gegenüber der Feinfraktion. In dieser Kornfraktion steigt der Glühverlust in der Entlastungsphase. Im Zulauf während der Entlastung beträgt er 63 % und im Ablauf 71 %. Derselbe Effekt ist auch in der Kornfraktion > 2,0 mm zu erkennen, da auch hier der Glühverlust in den Proben während der Entlastung zunimmt. Etwas höhere Glühverluste in den gröberen Kornfraktionen weisen darauf hin, dass organische Feststoffe verhältnismäßig zunehmen, da die mineralischen Anteile aufgrund der höheren Dichte leichter abgeschieden werden können.

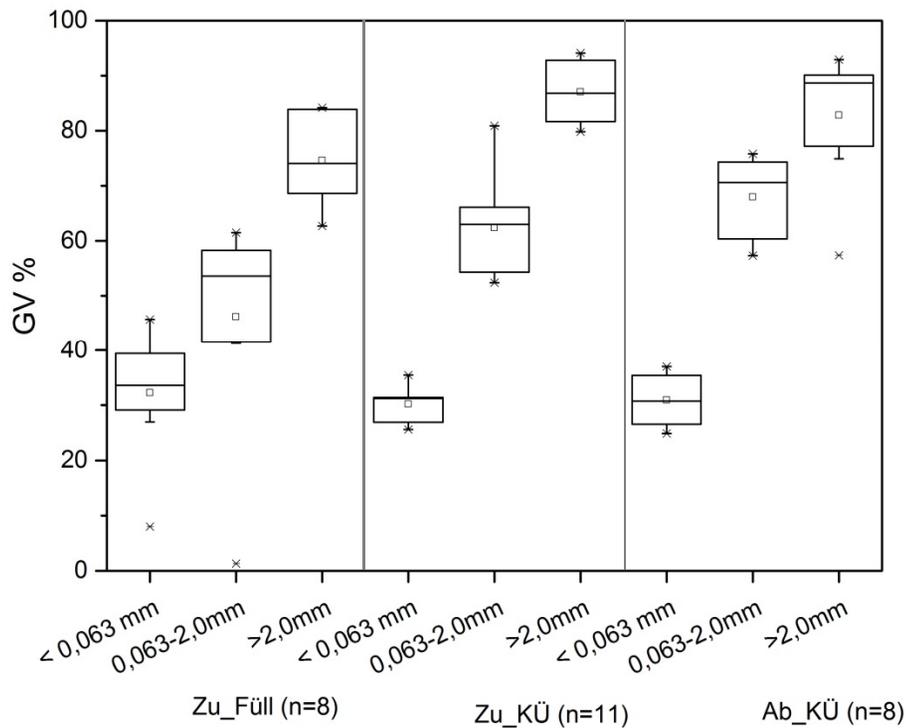


Bild 4.24: Glühverlust der Kornfraktionen am Regenklärbecken Federbach

Die Datenlage für das RKB Lochfeld zeigt dieselbe Tendenz einer Zunahme des Glühverlustes mit größeren Kornfraktionen sowie höhere Glühverluste im Ablauf gegenüber dem Zulauf in der Grobfraction. Aufgrund einer geringeren Stichprobenanzahl wurden die Ergebnisse an dieser Stelle nur für das RKB Federbach dargestellt.

4.2.2 Metall- und Nährstoffanalyse der Feststoffe

Die über das Feststoffsammler-Monitoring generierten Sedimente wurden auf die Metalle Zink, Kupfer, Cadmium, Blei und Eisen sowie auf Phosphor analysiert. Wie die Grafik zu den Gewichtsanteilen bereits zeigte, bestehen über 90 % der in der Probenahmen erfassten Feststoffe aus der Kornfraktion < 0,063 mm. Da nachweislich an der feinpartikulären Fraktion die höchsten Konzentrationen von Schadstoffen absorbieren, beschränkt sich die Analyse der Proben aus den Regenbecken auf die Korngröße < 0,063 mm.

Tabelle 4.8 stellt die Zu- und Ablaufkonzentrationen der beiden Regenklärbecken vergleichend dar. Anhand der Stichproben zeigt sich, dass die Konzentrationen von P_{ges} und den Metallen für das RKB Lochfeld im Mittel niedriger sind als die Konzentrationen für das RKB Federbach. Insbesondere für Kupfer ist die Konzentration am RKB Federbach um den Faktor drei höher. Die Mediane der Stoffkonzentrationen aus dem Zulauf sind um das 2- bis 3-fache höher als die Konzentrationen im Ablauf, lediglich bei Zink ist die Ablaufkonzentration nicht in diesem Maße reduziert.

In der von Bannerman et al. (1993) durchgeführten Messkampagne wurden für industrielle und gewerbliche Flächen Stoffkonzentrationen verschiedener Metalle ermittelt. Straßen waren in der Studie als Hauptemittenten benannt worden. Die Konzentrationen für Zink lagen zwischen 220 und 575 µg/l und für Kupfer zwischen 24 und 74 µg/l. Die für Rastatt ermittelten Stoffkonzentrationen der Metalle sind um ein vielfaches geringer. Dies ist an den beiden Standorten auf die sehr geringen Feststoffkonzentrationen zurückzuführen.

Tabelle 4.8: Median-Konzentrationen für Zink, Kupfer, Blei, Cadmium, Eisen, Phosphor gesamt im Zu- und Ablauf der Regenklärbecken für die Kornfraktion < 0,063 mm

Standort	P _{ges.}		Zn		Cd		Cu		Pb		Fe		
	mg/l	n	µg/l	n	µg/l	n	µg/l	n	µg/l	n	g/l	n	
Zulaufkonzentrationen													
Lochfeld	0,03		12,9		0,01		1,05		0,52		0,28	Min	
	0,04	6	41,5	6	0,03	6	2,89	6	1,45	6	0,596	6	Median
	0,21		155		0,11		12,4		5,59		2,90	Max	
Federbach	0,03		25,3		0,02		4,15		1,11		0,469	Min	
	0,1	12	60,8	12	0,05	11	10,3	11	3,18	11	1,04	11	Median
	0,25		198		0,15		29,1		10,4		4,21	Max	
Ablaufkonzentrationen													
Lochfeld	0,01		22,9		0,01		0,96		0,46		0,09	Min	
	0,02	5	30,4	4	0,01	4	1,24	4	0,57	4	0,20	4	Median
	0,03		46,9		0,01		1,331		0,69		0,22	Max	
Federbach	0,02		25,9		0,01		3,72		0,09		0,54	Min	
	0,09	7	41,1	8	0,04	7	7,78	8	2,90	8	1,03	8	Median
	0,13		75,9		0,06		13,6		4,63		1,55	Max	

In Tabelle 4.9 wurden die Ergebnisse der Metallgehalte von Feststoffen der Bundesautobahnen mit den Gehalten aus dem Zulauf der Regenbecken verglichen. Die Messstellen wurden nach dem Zinkgehalt der Feststoffe absteigend sortiert.

Die Emissionen von Zink sind bei dem voll ausgebauten Industrie- und Gewerbegebiet Federbach ähnlich hoch wie auf den Bundesautobahnen A 6 und A 7. Die Messwerte für Blei, Cadmium und Eisen sind sogar höher als die mittleren Gehalte der Bundesautobahnen.

Tabelle 4.9: Vergleich Metallkonzentrationen (Mediane) von Feststoffen aus Autobahnabflüssen mit Feststoffen aus dem Zulauf von Regenbecken

Messstelle	Zink mg/kg	Kupfer mg/kg	Blei mg/kg	Cadmium mg/kg	Eisen g/kg
Steinsfurt BAB A 6*	2.499	914	113	0,80	41,5
Federbach - Zulauf Regenklärbecken	2.428	434	128	2,30	47,0
Lochfeld - Zulauf Regenklärbecken	2.335	190	86	1,80	38,0
Großburgwedel BAB A 7*	2.209	613	122	0,97	30,5
Kirchhorst BAB A 37*	1.663	716	174	0,90	38,4

*Quelle Grotehusmann et al. (2017)

4.2.3 Feststoffkonzentration und Frachten

Basierend auf dem in Abschnitt 4.1.1 berechneten Anteil abflusswirksamer Fläche, wurde das gegenwärtig vorhandene spezifische Speichervolumen der Regenbecken ermittelt.

Das Regenklärbecken Lochfeld verfügt mit 285 m³ bei derzeit angeschlossenen 16 ha A_U über ein spezifisches Speichervolumen von ca. 18 m³/ha. Dieses relativ hohe spezifische Volumen hat zur Folge, dass das Regenbecken über das Kalenderjahr regelmäßig teileingestaut wird, aber nur wenige Entlastungsereignisse auftreten.

Für den Teileinstau des Beckens konnten drei Zulaufkonzentrationen ermittelt werden, die für die Fraktion < 0,063 mm 435 mg/l, 83 mg/l und 17 mg/l betragen. Die gemessenen Konzentrationen stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit der geringen Niederschlagsabflussmenge aus dem Einzugsgebiet. Die beiden ersten Ereignisse verdeutlichen den First-Flush-Effekt in dem vergleichsweise kleinen Einzugsgebiet.

Das RKB Federbach verfügt mit 463 m³ und 78 ha A_U über ein spezifisches Speichervolumen von 5,9 m³/ha. Entsprechend ist die Anzahl der in dem Monitoring beprobten Entlastungsereignisse deutlich höher. Für die Füllphase bis zur Vollfüllung des Beckens betragen die Konzentrationen der Fraktion < 0,063 mm im Median 22 mg/l mit einem Maximalwert von 86 mg/l und einem Minimum von 11 mg/l.

Die Feststoffkonzentrationen im Zu- und Ablauf der Entlastungsphase sind bei beiden Regenbecken außergewöhnlich niedrig. Einen Überblick der Messergebnisse liefert der Boxplot in Bild 4.25.

Für das RKB Lochfeld wurden Konzentrationen von 7 mg/l im Zulauf und 5 mg/l im Ablauf ermittelt. Diese Konzentrationen sind vergleichbar mit den Werten, die bereits im REFENI 1-Vorhaben ermittelt wurden.

Bei dem RKB Federbach sind die Konzentrationen mit 23 mg/l im Zulauf und 21 mg/l im Ablauf ebenfalls niedrig. Diese Werte sind geringer als Konzentrationen aus dem Vorhaben REFENI 1, in dem eine Zulaufkonzentration (SMC) von 91,6 mg/l ermittelt wurde.

Als Ursache für die geringeren Konzentrationen ist der hohe Fremdwasseranteil zu nennen, der bei diesem Becken eingeleitet wird. Nach dem Umbau der Regenwasserbehandlungsan-

lage führt der Fremdwasseranteil regelmäßig zu einem Einstau des Beckens. Für das Monitoring war die Konsequenz, dass das Regenbecken häufig bereits zu Beginn eines Regenerignisses mit Klarwasser eingestaut war und es somit zu einer starken Verdünnung der Proben im Zu- und Ablauf während der Entlastung kam, wodurch die mittleren Feststoffkonzentrationen sanken.

Die Abflusskonzentrationen aus dem Messzeitraum (REFENI 2) können daher für eine reale Abschätzung der stofflichen Abtragsfracht nicht herangezogen werden. Eine Bilanzierung der Frachten erfolgt in Kapitel 5. Für die Bilanz des Gebietes Federbach wird auf die mittlere Zulaufkonzentration des REFENI 1 mit 91,6 mg/l zurückgegriffen. Einen Überblick der Zulaufkonzentrationen aus den Messzeiträumen des REFENI 1 und 2 ist Bild 7.9 und Bild 7.10 im Anhang zu entnehmen.

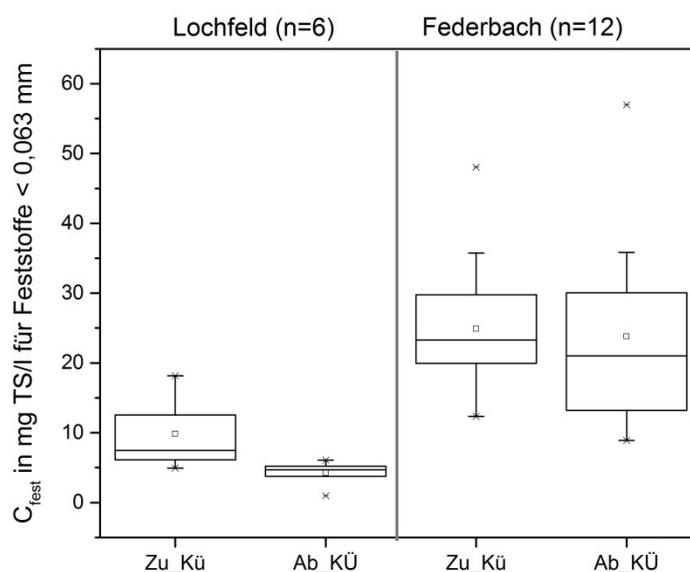


Bild 4.25: Feststoffkonzentration der Kornfraktion $< 0,063 \text{ mm}$ im Zu- und Abfluss während der Entlastung für den Messzeitraum 2017/2018 (REFENI II)

4.2.4 Oberflächenbeschickung

Bild 4.26 beinhaltet eine Auswertung zur Häufigkeitsverteilung der aufgetretenen Oberflächenbeschickungen an dem RKB Federbach. Eine grafische Auswertung der Daten für das RKB Lochfeld ist aufgrund geringer Messwerte nicht zielführend.

An dem RKB Federbach wurden Oberflächenbeschickungen zwischen $q_A = 3$ und 9 m/h erreicht. Die Bemessungsoberflächenbeschickung von $q_A = 10 \text{ m/h}$ wurde nicht überschritten. Für die Regenereignisse sind mittlere Oberflächenbeschickungen von $q_A = 2$ und 6 m/h gemessen worden, die als hoch betrachtet werden können. Erfahrungen aus anderen Vorhaben haben aufgezeigt, dass Sedimentationsanlagen zu einem sehr hohen Anteil der Entlas-

tungsereignisse mit sehr geringen $q_{A,mittel}$ beaufschlagt werden, siehe Schleifenbaum et al. (2016). In dem Vorhaben REFENI 1 haben 80 % der Regenereignisse ein $q_{A,Mittel} < 2$ m/h aufgewiesen. Die hydraulische Belastung dieser Anlage hat also in dem vorliegenden Messzeitraum zugenommen.

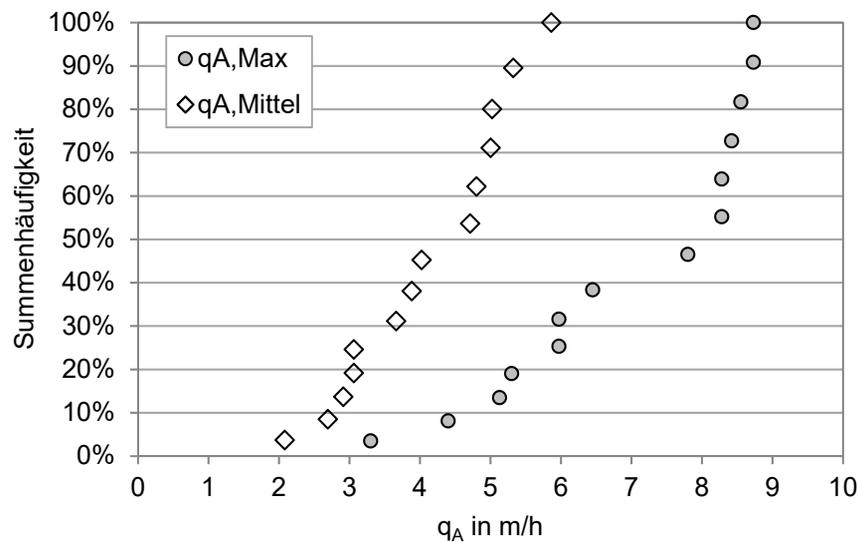


Bild 4.26: Häufigkeitsverteilung der mittleren und maximalen Oberflächenbeschickungen im Untersuchungszeitraum am RKB Federbach

4.2.5 Trübungsmessungen in der Sedimentationskammer

In dem Vorhaben wurden in beiden Regenklärbecken Messsonden zur Ermittlung der Trübe eingebaut. Im Antrag war ergänzend dazu vorgesehen Sedimentfallen in den Becken auszubringen, um ein Sedimentationsmuster erkennen zu können. Auf die Sedimentfallen wurde aus zwei Gründen verzichtet. Zum einen waren die Zulaufkonzentrationen an beiden Standorten zu gering, um durch eine Sedimentmassenbestimmung zu aussagekräftigen Ergebnissen zu kommen. Zum anderen hat sich gezeigt, dass durch den Einsatz von Trübungssonden und eine detaillierte Analyse der Daten ereignisspezifische Kenngrößen zur Sedimentation abgeleitet werden können.

Um die Trübungsmessungen mit der Dynamik der Niederschläge in Beziehung zu setzen, wurden die Daten eines Regenmessers an der Kläranlage Rastatt (Abwasserverband Murg) verwendet, die in 15-minütiger Auflösung vorlagen. Als ein Regenereignis wurde gewertet, wenn ein Niederschlag von 0,1 mm über eine Dauer von mindestens 30 Minuten und mit einer vorhergehenden Trockenperiode von mindestens 2 Stunden auftrat. Ereignisse, zwischen denen eine Trockenphase von weniger als 2 Stunden lag, wurden zu einem Regenereignis zusammengefasst. Für die Messzeiträume im Frühling (Mai bis Juni) und Herbst (September bis November) 2017 sowie im Winter (Januar bis März) 2018 konnten insgesamt 63 Regenereignisse ausgewertet werden, von denen verwertbare Trübungsmessungen vorla-

gen. Im Sommer 2017 war der Datenlogger für längere Zeit defekt und musste zur Reparatur eingeschickt werden, sodass in diesem Zeitraum keine Messungen vorliegen.

Für die ausgewerteten Regenereignisse wurden die folgenden Parameter aufgenommen:

- Regenmenge [mm],
- Regendauer [h],
- mittlere Intensität [mm/h],
- maximale Intensität [mm/h] und
- Dauer der vorherigen Trockenperiode [h].

Die Mehrzahl der ausgewerteten Regenereignisse war von eher kurzer Dauer (< 10 h) und von geringer mittlerer Intensität (< 2 mm/h). Besonders im Winter 2018 traten nur Regenereignisse mit einer geringen mittleren Intensität von < 2 mm/h auf.

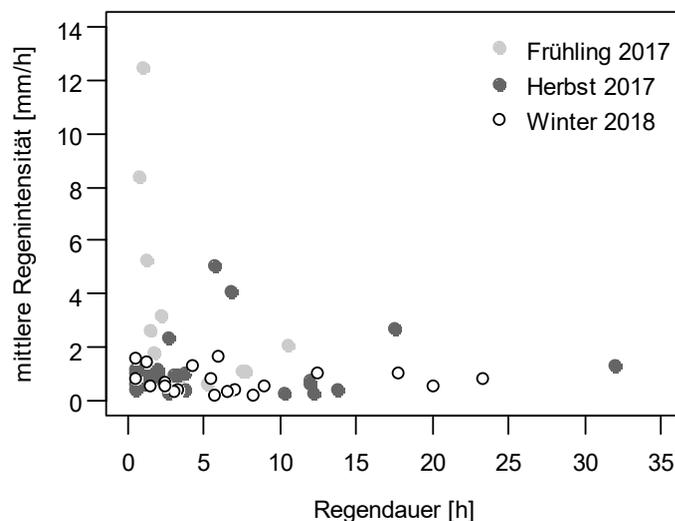


Bild 4.27: Mittlere Intensität und Dauer der ausgewerteten Regenereignisse im Frühling und Herbst 2017 sowie im Winter 2018 (n = 63)

4.2.5.1 Korrelation der Trübungsmessungen mit Regenereignissen

Für die Messzeiträume konnten saisonale Unterschiede in den Trübungsmessungen gefunden werden. Die mittlere und maximale Trübung war für die ausgewerteten Regenereignisse im Winter 2018 signifikant niedriger als im Frühling und im Herbst 2017, einfaktorische Varianzanalyse (ANOVA, $p < 0,001$). Ein Grund für diesen Unterschied kann sein, dass im Winter 2018 nur Regenereignisse mit vergleichsweise geringerer mittlerer Intensität auftraten, so dass möglicherweise weniger Feststoffe aus dem Einzugsgebiet mobilisiert wurden und eine geringere Trübung im Zulauf des RKB gemessen wurde.

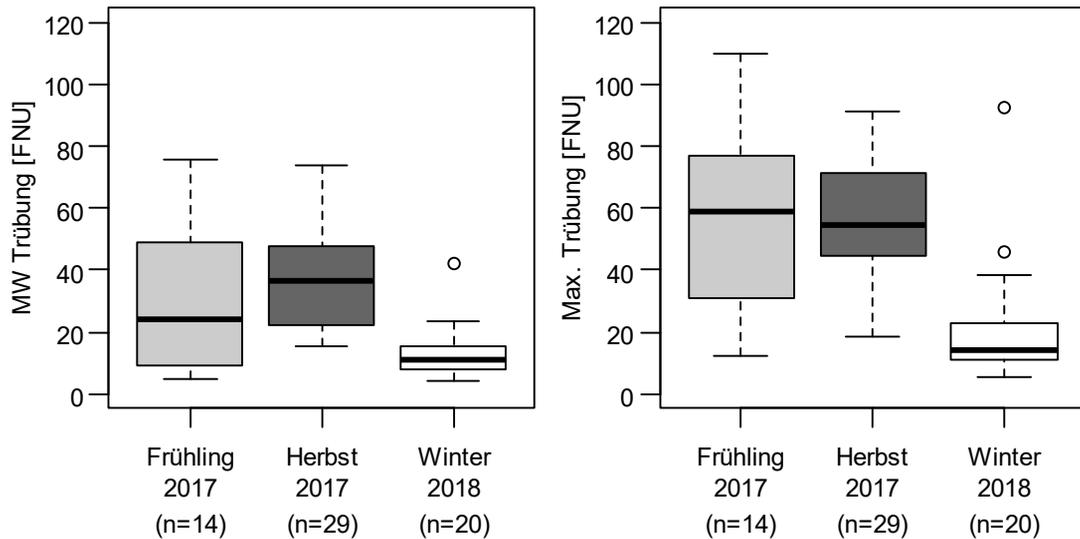


Bild 4.28: Saisonale Unterschiede in den mittleren (links) und maximalen Trübungswerten (rechts) (einfaktorielle ANOVA, $p < 0,001$). MW – Mittelwert, Max. – Maximum

Zwischen den aufgenommenen Parametern der Regenereignisse (Regenmenge, Regendauer, mittlere Intensität, maximale Intensität und Dauer der vorherigen Trockenperiode) und der Trübungsmessungen (Mittelwerte und Maxima) wurden für den gesamten Datensatz keine statistisch signifikanten Zusammenhänge gefunden. Für die aufgenommenen Daten vom Frühlung und Herbst 2017 zeigten sich jedoch signifikante negative Korrelationen zwischen den Trübungsmittelwerten und der Regenmenge sowie der mittleren bzw. maximalen Regenintensität ($r_s = -0,31$, $r_s = -0,38$ bzw. $r_s = -0,51$; $p < 0,04$; Korrelation nach Spearman).

Weiterhin wurde im gesamten Datensatz keine direkte Abhängigkeit der Trübung von der Dauer der vorherigen Trockenperiode gefunden.

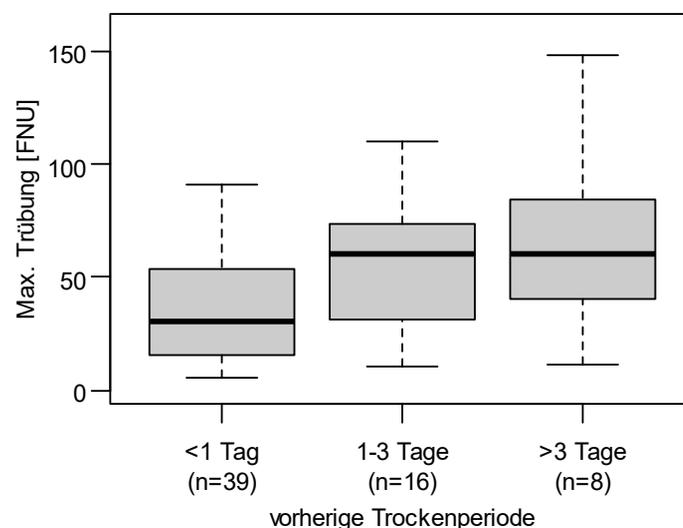


Bild 4.29: Maximalwerte der Trübung in Abhängigkeit von der Dauer der vorherigen Trockenperiode (einfaktorielle ANOVA, $p < 0,03$). Max. - Maximum

Höhere Maximalwerte der Trübung wurden jedoch verzeichnet, wenn die vorherige Trockenperiode länger als einen Tag andauerte.

Als Reaktion auf ein Regenereignis wurde im Messverlauf entweder keine Änderung in der Trübung, eine Ab- oder eine Zunahme sowie das Auftreten von Spitzen (Peaks) beobachtet, siehe Bild 4.30.

Die Art der Reaktion war unabhängig von der Regenintensität, korrelierte jedoch mit der Dauer der vorherigen Trockenperiode. Eine Abnahme oder keine Änderung der Trübung traten besonders häufig auf, wenn die vorherige Trockenperiode von eher kurzer Dauer war, was auf Verdünnungseffekte bzw. einen gleichbleibenden Zustrom von Feststoffen bei kurz hintereinander auftretenden Regenereignissen hindeutet. Dagegen wurden Peaks oder eine Zunahme der Trübung vorrangig nach länger andauernden Trockenphasen beobachtet, was auf einen First-Flush-Effekt bzw. einen verzögerten Transport von Feststoffen hindeutet.

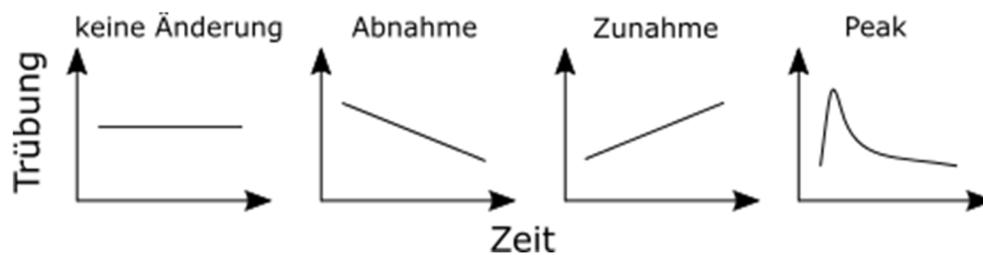


Bild 4.30: Schematische Darstellung von beobachteten Reaktionen im Messverlauf der Trübung im Zulauf des RKB Federbachs während eines Regenereignisses.

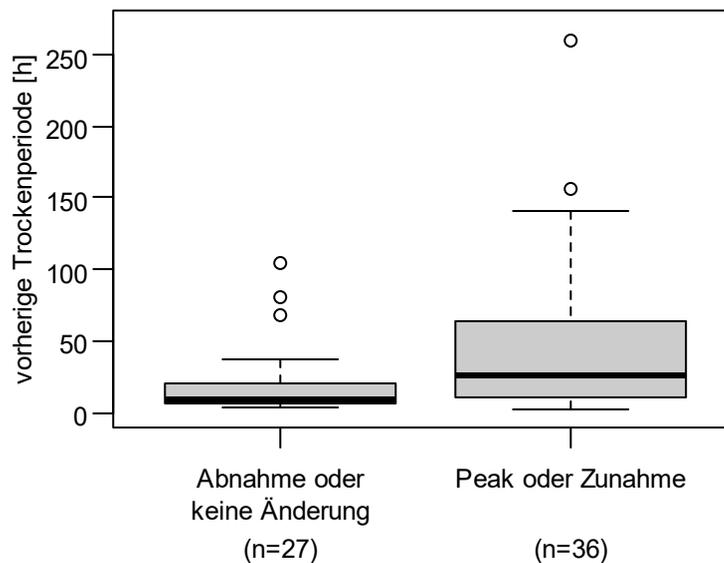


Bild 4.31: Beobachtete Reaktionen im Messverlauf der Trübung im Zulauf des RKB Federbachs in Abhängigkeit von der Dauer der vorherigen Trockenperiode.

Je länger eine Trockenphase andauert, umso mehr Feststoffe könnten sich theoretisch im Einzugsgebiet in Abhängigkeit vom Verkehrsaufkommen, der Oberflächenrauheit und den Partikeleigenschaften akkumulieren (Gunawardena et al., 2018).

Nur ein Teil dieser akkumulierten Feststoffe wird bei Regenereignissen im Einzugsgebiet mobilisiert (Egodawatta et al., 2007), wobei die Mobilisierung unter anderem von den Partikeleigenschaften abhängig ist. Kleinere Partikel werden bei Regenereignissen beispielsweise schneller abtransportiert als größere (Wijesiri et al., 2015). Für die Menge an mobilisierten Feststoffen spielen auch die Stärke und Dauer von Regenereignissen sowie die Dauer von Trockenperioden zwischen Regenereignissen eine Rolle. Dabei wurden in anderen Studien vor allem positive Zusammenhänge zwischen Feststoffkonzentrationen bzw. der Trübung von Regenwasser und der Regendauer, der Regenintensität sowie der Dauer der vorhergehenden Trockenperiode gefunden (Lacour et al., 2009; Liu et al., 2015; Wijesiri et al., 2015). Auch im hier ausgewerteten Datensatz ergab sich ein positiver Zusammenhang zwischen der maximalen Trübung und der Dauer der vorhergehenden Trockenperiode. Dagegen nahmen die mittlere und maximale Trübung für die Regenereignisse 2017 mit der Regenintensität ab, was auf Verdünnungseffekte schließen lässt.

Die entsprechenden Korrelationen sind sowohl für den hier aufgenommenen Datensatz als auch in anderen Studien generell eher schwach ausgeprägt. Vor allem bei Regenereignissen von schwacher Intensität konnten sowohl niedrige als auch hohe Trübungswerte gemessen werden. Dies deutet einerseits darauf hin, dass bei diesen Ereignissen möglicherweise nur wenige Feststoffe im Einzugsgebiet mobilisiert und transportiert wurden. Andererseits ist es auch möglich, dass solche Unterschiede durch einen verzögerten Transport von Feststoffen im Kanalnetz zustande kommen, sodass auch nach schwächeren Regenereignissen höhere Trübungswerte gemessen werden können. Beispielsweise konnten Langeveld et al., 2005 anhand von Trübungsmessungen in einem Mischwasserkanalsystem zeigen, dass die Trübung zum Teil mit den hydraulischen Bedingungen (Strömungsgeschwindigkeit und Schubspannung) fluktuierte und Trübungsspeaks sich nicht durch das Kanalsystem verfolgen lassen. Ganz ähnlich können auch bei Regenereignissen mit hoher Intensität sowohl erhöhte Feststoffkonzentrationen transportiert werden als auch Verdünnungseffekte auftreten, die eine direkte Korrelation zwischen Regenereignissen oder Trockenperioden und der Trübung bzw. der Feststoffkonzentration erschweren.

4.2.5.2 *Dynamik der Sedimentationsvorgänge*

Mittels der drei Trübungssonden im Zulauf, der Mitte und im Ablauf des RKB Federbachs wurde die Dynamik der Sedimentationsvorgänge genauer betrachtet. Durch das Absetzen von Partikeln im Becken lässt sich erwarten, dass die gemessene Trübung über die drei Sonden nach dem Muster Zulauf > Mitte > Ablauf abnimmt. Dieses Verhalten konnte besonders bei Regenereignissen mit geringer mittlerer Intensität beobachtet werden (beispielhaft gezeigt in Bild 4.32 oben). Ein davon abweichendes Verhalten konnte besonders bei Regenereignissen mit hoher mittlerer Intensität beobachtet werden. Dabei wurden z. B. die höchsten Trübungswerte von der Sonde im Ablauf des RKB gemessen (beispielhaft gezeigt in Bild

4.32 unten). Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten könnte sein, dass sich bei starken Regenereignissen bereits abgesetztes Material vom Beckenboden löst und aufgewirbelt wird, sodass die Sonde am Ablauf des RKB höhere Trübungswerte misst.

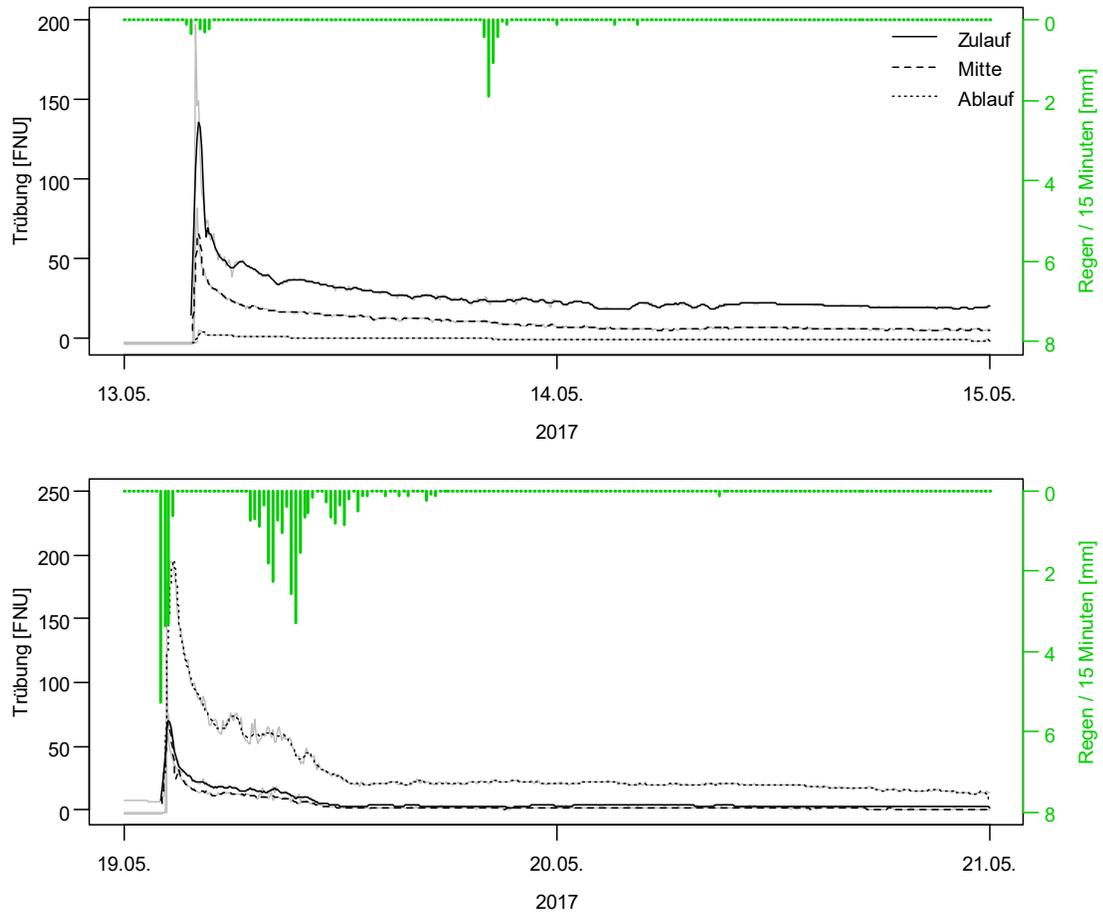


Bild 4.32: Vergleich der Trübungsmessungen im Zulauf, Mitte und Ablauf des RKB Federbach für zwei Regenereignisse im Frühling 2017 mit geringer (1,1 mm/h; oben) und hoher (12,5 mm/h; unten) Intensität. Die grauen Hintergrundlinien zeigen die Rohdaten, während die schwarzen Linien die geglätteten Werte darstellen (siehe Abschnitt 3.4.5).

5 Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse

In diesem Vorhaben wurden zwei Einzugsgebiete sowie die zugehörigen zentralen Regenklärbecken untersucht. Im Vordergrund der Untersuchungen stand die Erstellung einer Feststoffbilanz von der Quelle bis zum Ende des Entwässerungsnetzes. Im Detail wurden die Ergebnisse bereits vorgestellt, in diesem Kapitel erfolgt eine übergreifende Auswertung der Daten, in der die Zusammenhänge der Ergebnisse diskutiert werden sollen.

Über eine differenzierte Flächenanalyse konnte die aktuelle abflusswirksame Fläche ermittelt werden. Für das EZG Lochfeld lag eine abflusswirksame Fläche von 16 ha vor und für das EZG Federbach von 78 ha. Diese Angaben ermöglichten eine reale Einschätzung des spezifischen Volumens für Regenbecken, die als eine wichtige Kenngröße in der Siedlungsentwässerung zu betrachten ist. Das ermittelte spezifische Volumen im RKB Lochfeld ist mit $18 \text{ m}^3/\text{ha}$ momentan noch deutlich höher als die Standardvorgabe, die ein spezifisches Volumen von $5\text{-}10 \text{ m}^3/\text{ha}$ vorsieht. Dieses hohe spezifische Speichervolumen ist auf eine geringe Erschließung des Einzugsgebietes zurückzuführen. Hingegen stimmt das spezifische Volumen des RKB Federbach mit $5,9 \text{ m}^3/\text{ha}$ mit den Planungsdaten überein.

Das Monitoring der Straßen hat bestätigt, dass die Feststoffablagerungen auf Straßen ein Ablagerungsmuster aufweisen, das standortbezogen systematisch ist. Insgesamt war das Depot im Rinnstein immer höher und wies einen höheren Anteil grobkörniger Kornfraktionen auf als das Feststoffaufkommen auf den Straßen. Mit zunehmendem Abstand zu den Straßeneinläufen verringerte sich der Massenanteil der Grobfraction, während sich der Feinanteil nur unwesentlich zu verändern schien. Die orientierenden Untersuchungen, bei denen die Verteilung der Feststoffe auf der Fläche analysiert wurde, zeigten, dass der aktuelle Kenntnisstand noch gering ist und hier weiterer Untersuchungsbedarf besteht. Für die Übertragung der systematisch erhobenen Feststoffmassen nahe des Straßeneinlaufes wurden Korrekturfaktoren für die Gesamtfeststoffe und die Feinfraktion ermittelt, die eine Übertragung der Messwerte auf die gesamte Straßenfläche ermöglicht.

Das mittlere Feststoffaufkommen für das EZG Lochfeld beträgt $1,26 \text{ g}/\text{m}^2$ und für das EZG Federbach $3,98 \text{ g}/\text{m}^2$.

Anhand der Datenreihen aus dem Probenahmezeitraum wurde der Median des Feststoffaufkommens für jede Messstelle ermittelt. Eine Korrelationsprüfung mit den Daten der Oberflächentexturtiefe zeigt keinen signifikanten Zusammenhang, sondern lediglich die Tendenz, dass das Feststoffdepot mit zunehmender Rauheit der Oberfläche ebenfalls zunimmt.

Ein weiterer Parameter, der darauf Einfluss nimmt, ob Niederschlagsabfluss behandlungsbedürftig ist, ist das mittlere Verkehrsaufkommen (DTV). Basierend auf den Daten der Verkehrsmessungen wurde überprüft, ob allein aufgrund des Verkehrsaufkommens auch eine

Behandlungsbedürftigkeit gegeben wäre. Aufgrund des Verkehrsaufkommens in den beiden Gebieten sind die Gebiete in ihrer Belastung der Kategorie II und III einzuordnen.

Ein statistischer Zusammenhang zwischen dem Verkehrsaufkommen und den ermittelten Feststoffmengen der Messstellen ist in diesen Daten weder für die Gesamt- noch für die Feinfraktion nachweisbar. Makrostrukturen wie abgesenkte Fugen, Dellen oder Senken im Asphalt, bestimmte Neigungen im Straßenprofil, Bewuchs von Gras oder Moos in den Fugen des gepflasterten Rinnsteins oder den Bordsteinkanten können als Beispiele genannt werden, die einen monokausalen statistischen Zusammenhang überlagern.

5.1 Übergreifende Betrachtung der Feststoffcharakteristik aus den Einzugsgebieten und Regenbecken.

Vergleicht man die Daten aus den Einzugsgebieten und den Regenklärbecken in den Boxplots in Bild 5.1 zeigt sich, dass die Gewichtsanteile im Einzugsgebiet deutlich stärker von größeren Kornfraktionen dominiert werden. Dieses Ergebnis wurde erwartet und spiegelt die bisherigen Erfahrungen wider. Überraschenderweise ist weniger die Kornfraktion $> 2,0$ mm (Kies), sondern vielmehr die Kornfraktion $0,063-2,0$ mm am stärksten vertreten. Es wird davon ausgegangen, dass die Fraktion mit > 2 mm Korngröße besser von den Straßenkehrmaschinen erfasst wird und daher nur in geringem Anteil auf den Straßen in den Einzugsgebieten vorzufinden ist.

Die im Einzugsgebiet erfassten 10 % Massenanteil der Kiesfraktion kommen in den Regenklärbecken nur zu einem kleinen Bruchteil an. Zum einen lagert sich das mineralische Material im Kanalnetz ab und zum anderen sind den beiden Regenbecken Geröllschächte vorgelegt, in denen die Grobstoffe verbleiben. Der $> 2,0$ mm Anteil, der bis in die Regenbecken transportiert und im Monitoring erfasst wird, ist fast ausschließlich organisch.

Dieselbe Argumentation kann auch für die Sande der Kornfraktion $0,063-2,0$ mm herangezogen werden, die zwar im Einzugsgebiet stark vertreten sind, in dem Monitoring der Regenklärbecken aber nahezu nicht mehr erfasst wurden. Auch dieses Material bewegt sich sohin, lagert sich zum Teil im Kanalnetz ab und kumuliert letztlich im Geröllschacht vor den Regenklärbecken.

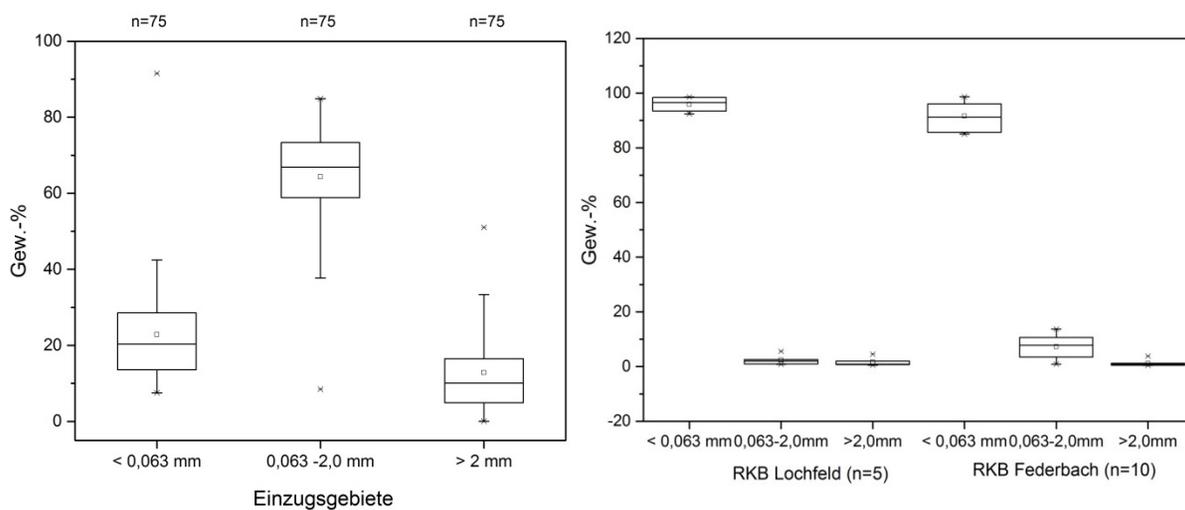


Bild 5.1: Gewichtsanteile der Trockensubstanz der beprobten Straßen und Regenbecken

In den Einzugsgebieten ermittelte Ergebnisse zum Glühverlust sind in allen Kornfraktionen geringer gegenüber den Glühverlusten der Sedimente aus den Regenklärbecken Lochfeld und Federbach.

Hierbei ist zu beachten, dass insbesondere im Einzugsgebiet allein schon durch die geringe Dichte der organischen Substanz im Vergleich zur mineralischen Substanz diese insgesamt einen sehr viel geringeren Massenanteil ausmacht.

Von der Ausgangsmatrix verbleibt ein hoher Anteil mineralischer Fracht im Kanalnetz und im Geröllschacht. Entsprechend erfolgt über die Fließstrecke prozentual eine Anreicherung der organischen Anteile. Die organische Substanz wird gegenüber der mineralischen Substanz aufgrund geringerer Dichte deutlich besser transportiert. Auffallend ist außerdem der Anstieg des Glühverlustes der feinpartikulären Feststoffe. Diese Zunahme resultiert aus der mechanischen Zerkleinerung und Zersetzung des organischen Materials.

Es sind jedoch noch weitere Einflussfaktoren denkbar, welche die allgemeine Zunahme des Glühverlustes in den Regenklärbecken erklären. So kann nicht ausgeschlossen werden, dass Fehlan schlüsse, d. h. Schmutzwassereinleitungen, den Anteil organischer Materie zusätzlich erhöhen und damit der Glühverlust steigt. Die Eintragspfade Gehwege, Hof- und Dachflächen sind in diesen Untersuchungen nicht berücksichtigt worden, auch diese können nennenswerte Quellen für erhöhte Organikgehalte darstellen. Zuletzt kann nicht ganz ausgeschlossen werden, dass organische Materie (z. B. Laub, Zweige etc.) im Monitoring der Straßen eventuell nicht ausreichend erfasst werden konnten, da das Material schnell in die Straßenschächte abtransportiert wird oder sich sehr lokal und konzentriert ablagert.

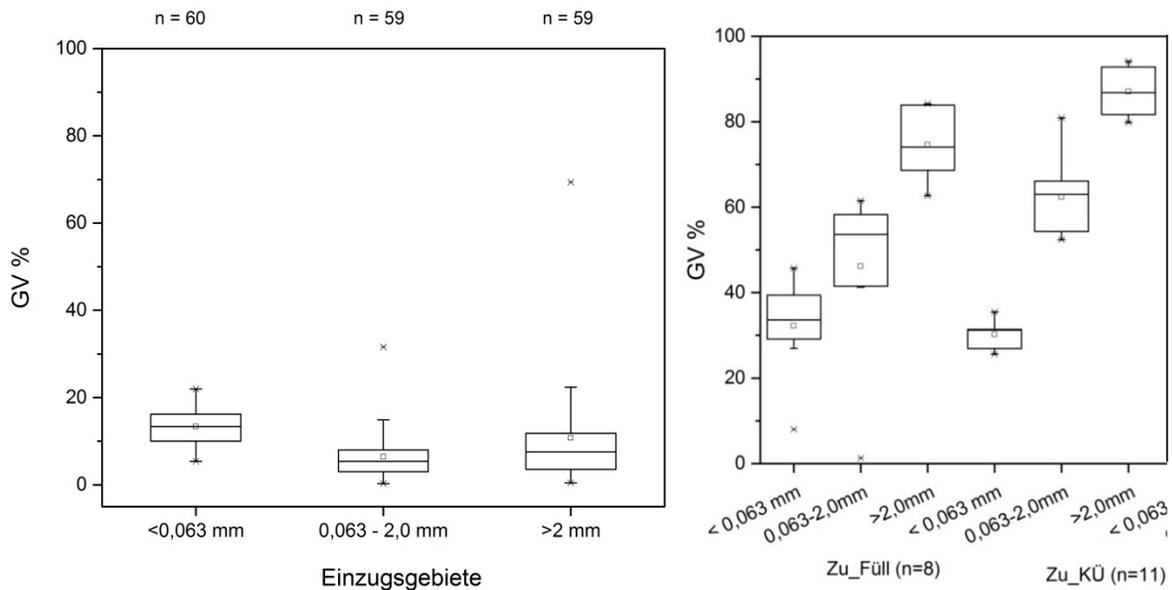


Bild 5.2: Anteile des Glühverlustes in den Einzugsgebieten (Grafik links) und in den Regenbecken (Grafik rechts)

5.2 Bilanzierung der Feststofffracht

In Abschnitt 4.1.8 wurde das Feststoffdargebot der beiden Einzugsgebiete für die gesamte Feststoffmasse und für den feinpartikulären Anteil ermittelt. Die Eingangsdaten basieren auf dem Monitoring der Straßen und Gehwege.

In den Daten zeigte sich, dass in den Einzugsgebieten Lochfeld mit 2.820 kg/(ha·a) und Federbach mit 4.786 kg/(ha·a) eine hohe spezifische Gesamtfracht vorzufinden war, die zu 81 % bzw. 88 % durch die grobpartikuläre Fracht der Korngröße > 0,063 mm geprägt wurde. Die in den Regenbecken ermittelten Gewichtsanteile der Kornfraktion > 0,063 mm sind mit < 10 % sehr gering. Die groben Kornfraktionen verbleiben auf den Oberflächen und im Kanalnetz oder werden spätestens im Geröllschacht zurückgehalten. Anzumerken ist, dass das vorliegende Plangebiet über ein Kanalnetz verfügt, in dem die Kanäle eine sehr geringe Neigung aufweisen, was einen Rückhalt der Grobfraktion im Kanalnetz begünstigt.

Für das Einzugsgebiet Lochfeld wurde ein spezifisches Feststoffdargebot der Kornfraktion < 0,063 mm von ca. 547 kg/(ha·a) ermittelt. Demgegenüber steht eine aus der mittleren Konzentration und dem Jahresabfluss aus dem Gebiet abgeschätzte spezifische Zulauffracht am Regenklärbecken von nur 34 kg/(ha·a). Das bedeutet, dass selbst mit Bezug auf die feinen Feststoffe nur ein Anteil von 6 % des Feststoffdargebotes aus dem Einzugsgebiet an der Regenwasserbehandlungsanlage ankommt.

Eine Erklärung für diese Diskrepanz ist die hohe Rauheit des Asphaltes im Einzugsgebiet, der gemeinsam mit der geringen Gebietsnutzung dazu führt, dass auf den Straßenflächen und im Kanal ein erhöhter Feststoffrückhalt auch für die Fraktion < 0,063 mm stattfindet.

In dem EZG Federbach wurde ein spezifisches Feststoffdargebot für die gesamten Feststoffe von 4.786 kg/(ha·a) ermittelt. Für die Kornfraktion < 0,063 mm beträgt das spezifische Feststoffdargebot ca. 595 kg/(ha·a). Aus den Zulaufkonzentrationen des Regenklärbeckens Federbach aus der Phase 1 und dem ermittelten mittleren Jahresabfluss ergibt sich für diesen Standort eine spezifische Jahresfracht von 495 kg/(ha·a). Dies bedeutet, dass 77 % der im Gebiet anfallenden feinen Feststoffe die Behandlungsanlage erreichen.

6 Empfehlungen

Im Vordergrund der Regenwasserbehandlung stehen eine bedarfsgerechte Planung und eine im Hinblick auf die angestrebten Reinigungsziele sachgerechte Dimensionierung der Anlagen.

Die Ergebnisse des Vorhabens REFENI 1 zeigten, dass 60 % der Anlagen mittlere Feststoffzulaufkonzentrationen von weniger als 40 mg/l ($SMC_{TS\ zu}$) im Abfluss aufweisen (Eyckmanns-Wolters et al., 2013). Dieser Befund gab Anlass dazu, sich intensiver mit den Ursachen der geringen Zulaufkonzentrationen zu befassen. Geringe Abflusskonzentrationen können auf vielfältige Ursachen zurückzuführen sein, darunter zum Beispiel auf eine effektive Straßenreinigung, geringe Erschließungsgrade, geringe Emissionen oder eben auf eine unzureichende Planungsgrundlage. Bei dem letzten Punkt sollte angesetzt werden, um eine Überdimensionierung der Behandlungsanlagen und die damit verbundenen hohen Investitionskosten zu vermeiden.

Für den Planungsprozess bilden neben den Vorgaben der Länder die Arbeits- und Merkblätter der DWA wichtige Grundlagen. Das DWA-A 102 (2016) wird darunter zukünftig eine besondere Rolle einnehmen. Als Besonderheit ist auf die Zusammenführung der emissionsseitigen und immissionsseitigen Anforderungen/Betrachtungen zu verweisen sowie auf die Einführung des Parameters AFS63 als neuen Leitparameter für die Regenwasserbehandlung. Als Berechnungsgrundlage wird auf die Flächenarten innerhalb der Einzugsgebiete eingegangen sowie auf eine differenzierte Flächenermittlung verwiesen, die bei einem höheren Genauigkeitsanspruch angewandt werden kann (siehe DWA-A 102 Kap.7).

Die Ergebnisse dieses Vorhabens verdeutlichen, dass eine differenzierte Betrachtung der Teilflächen in den Einzugsgebieten erforderlich ist, um eine angemessene Priorisierung und einen effizienten Einsatz von Investitionsmittel bei der Umsetzung von Maßnahmen der Regenwasserbehandlung im Trennsystem zu erreichen.

In diesem Vorhaben wurden unter anderem die Verkehrsfrequenz und Oberflächentexturtiefe als wichtige Einflussgrößen untersucht. Durch die Erhebung beider Größen ist es möglich, das spezifische Stoffaufkommen im Einzugsgebiet abzuschätzen. Sie liefern aber nur unzureichende Hinweise, welcher Anteil dieses Stoffaufkommens die Regenwasserbehandlungsanlage erreicht. Zwischen dem DTV und dem Aufkommen von Feststoffen $< 63\ \mu\text{m}$ konnte für die einzelnen Messstellen keine signifikante Korrelation gefunden werden. Das gleiche gilt für alle weiteren Kontrollgrößen wie Niederschlagshöhe und -intensität oder die Länge niederschlagsfreier Perioden vor der Erhebung der Flächenbelastung.

Allerdings spiegelte sich die höhere Verkehrsbelastung im Gesamtgebiet in einer höheren spezifischen Fracht für die Feinpartikel wider, sodass sie als eine Größe zur Abschätzung des Verschmutzungspotenzials sicher geeignet ist. Sie definiert sozusagen die Produktion,

erlaubt aber keine Rückschlüsse auf den Transport und den Verbleib der feinen Feststoffe. Diesbezüglich wirkt eine Reihe von weiteren Faktoren wie Windexpositionen, Vernetzung mit Grünflächen, Art und Zustand der abflusswirksamen Oberflächen.

Die Erfahrungen aus diesem Vorhaben zeigen, dass der Beschaffenheit der Oberflächen mehr Beachtung geschenkt werden muss. Da die dort wirksamen Einflussgrößen häufig von lokaler Bedeutung sind, ist die detaillierte Erhebung einer begrenzten Zahl von Einzelflächen nicht zu empfehlen. Zielführender ist es, eine große Anzahl von Teilflächen zu begutachten, um einen Gesamteindruck über die Transport- und Retentionsprozesse im Einzugsgebiet zu gewinnen. Dabei gilt, je höher die Rauigkeit (Pflasterflächen, rauhe Beläge) und die Strukturvielfalt (Grau- Grün-Vernetzung) der Gebiete ist, desto höher ist das Stoffrückhaltepotenzial.

Der in diesem Vorhaben gewonnene Kenntnisstand zur Verteilung der Feststoffe in Einzugsgebieten ist allerdings noch nicht ausreichend, um quantitative Zusammenhänge aufzeigen und ein Erklärungsmodell ableiten zu können. Aufgrund der gegebenen Relevanz der Fragestellung, welcher Anteil der stofflichen Belastung die Anlagen der Regenwasserbehandlung erreicht, wird erheblicher weiterer Forschungsbedarf gesehen.

Das Vorhaben hat gezeigt, dass die realitätsnahe Beschreibung der Transportphänomene in Einzugsgebieten und Kanalisation die Schlüsselgröße für die sachgerechte Planung von zentralen Regenwasserbehandlungsanlagen ist. Das Vorhaben hat auch gezeigt, dass die Fokussierung auf die feine Feststofffraktion auch in diesem Zusammenhang sinnvoll ist. Sie reduziert die Variabilität der erzeugten Messdaten erheblich und eröffnet so die Chance, dass zielführende Ergebnisse mit vertretbarem Aufwand erreichbar sind.

7 Anhang

7.1 Feststoffkonzentrationen im urbanen Raum

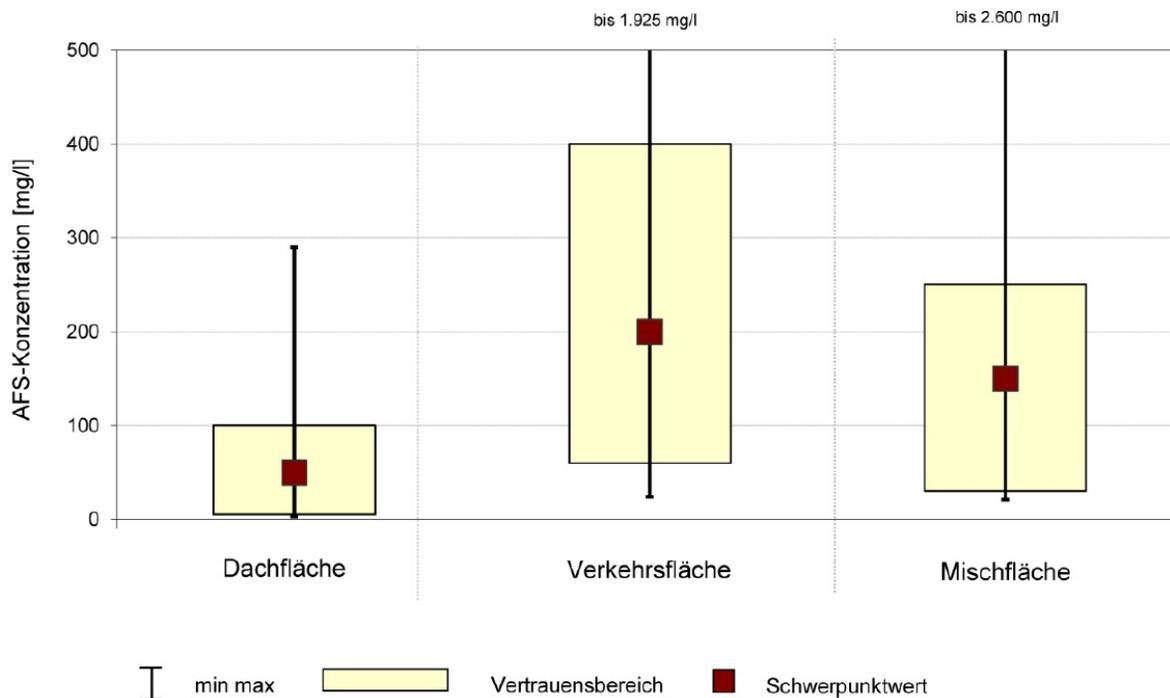


Bild 7.1: Aufkommen von abfiltrierbaren Stoffen (AFS gesamt) im Niederschlagsabfluss von Dach-, Verkehrs- und Mischflächen aus Welker, 2005 zitiert in DWA-A 102 (2016)

Eine weitere Literaturlauswertung von Göbel et al. (2007) spiegelt ähnlich hohe Unsicherheiten wider. Anhand der geringen Stichprobenanzahl können die mittleren Konzentrationsangaben nicht als repräsentativ betrachtet werden.

Tabelle 7.1: Literaturwerte für AFS-Konzentrationen (zusammengestellt aus Göbel et al., 2007)

	Regenwasser aus Grünflächen	Abflüsse von Dachflächen	Abflüsse von Verkehrsflächen
Min [mg/l]	0,2	13	66
Max [mg/l]	52	120	937
Mittelwert [mg/l]	12	43	150
Stichprobenanzahl [n]	> 15	< 5	< 5

7.2 Quellen ausgewählter Metalle und Phosphor

Tabelle 7.2: Quellen ausgewählter Metalle und Phosphor

Stoff	Quellen sind u.a.
Zink	Bei Kfz und anderen Oberflächen aus Stahl als Korrosionsschutz. Im Verkehr: Bremsen- und Reifenabrieb, Motoröl, Schmierfett, Karosseriebeschichtung, Verkehrsschilder, Ampeln, Leitplanken
Kupfer	Materialien für Dachabdeckungen, im Verkehr: Bremsenabrieb, Elektromotoren
Blei	Verbrennungsmotoren mit verbleitem Kraftstoff
Cadmium	Metallverarbeitendes Gewerbe, im Verkehr: Reifenabrieb, Dieselöl
Eisen	Eisen als einer der wenigen Stoffe die partikulär durch Korrosion in die Umwelt gelangen Gelöst durch Fremdwasser, Infiltration von Grundwasser
Phosphor	Vegetationsreste, Blütenstaub, Bodenerosion Landwirtschaftlicher Flächen, Exkrement, Kot

7.3 Verkehrsmessungen

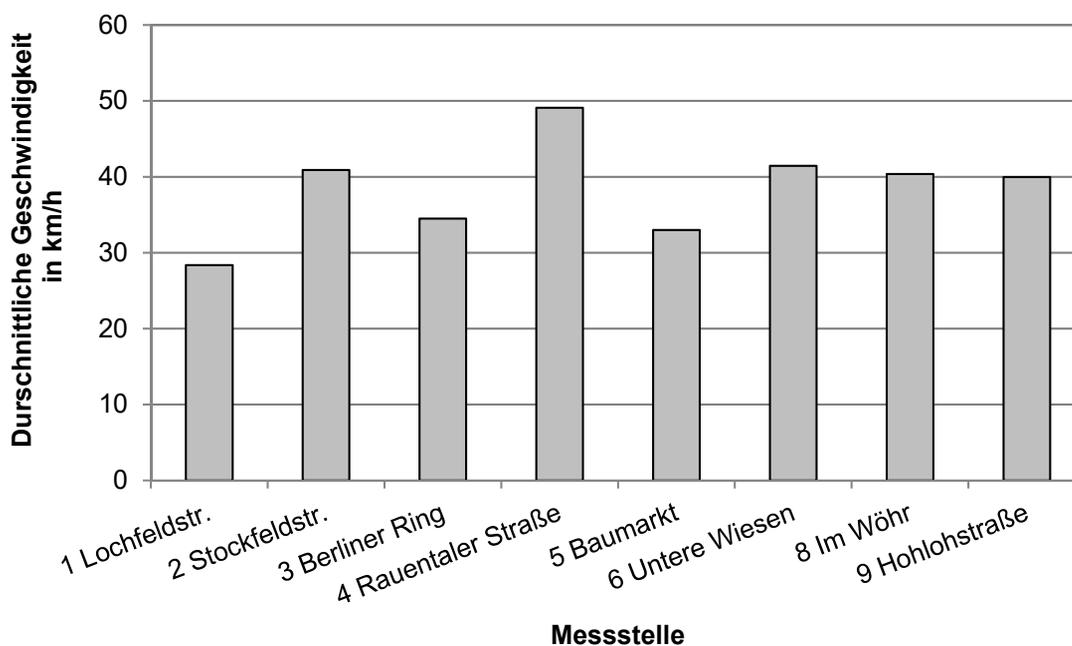


Bild 7.2: Durchschnittliche Geschwindigkeit der Kfz in km/h

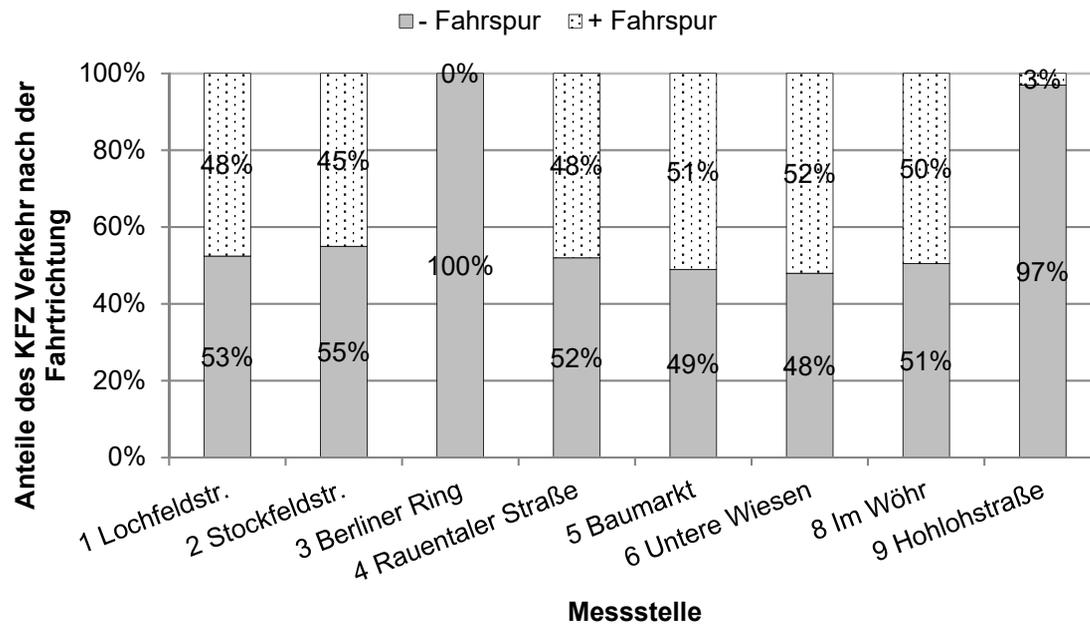


Bild 7.3: Anteile des Kfz-Verkehr nach der Fahrtrichtung

7.4 Differenzierung des standardisierten Messfensters in Rinnstein und Fahrbahn

Im Zuge einer Stichprobe wurde das Ablagerungsverhalten auf der Straße weiter untersucht. Am 31.01.2018 wurde die Fläche des Rinnsteins (ca. 0,084 m²) sowie die der angrenzenden Fahrbahn (0,196 m²) separat beprobt und einer Korngrößenanalyse unterzogen (siehe Bild 7.4).

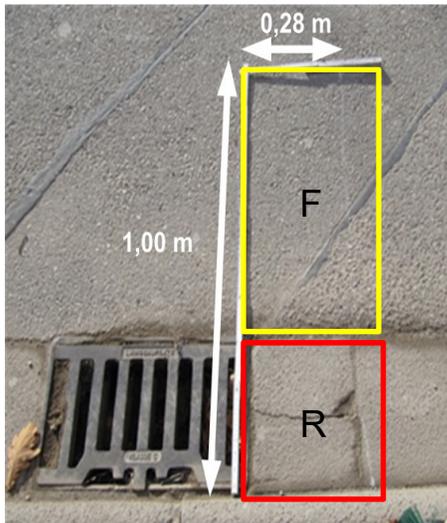


Bild 7.4: Probenahmefläche differenziert nach Rinnstein (R) und Fahrbahn (F).

Der an diesem Tag an den neun Messstellen ermittelte Trockensubstanzgehalt für die Proben aus dem Rinnstein und der Fahrbahn wurde in Bild 7.5 ausgewertet. Die hier dargestellten Daten sind die absoluten Werte auf der Fläche. Die Feststoffmengen im Rinnstein sind deutlich höher gegenüber den Mengen auf der Fahrbahn, was den Erfahrungen aus der Literatur, darunter Grottker (1987), entspricht.

Von der absoluten Masse dieser Probenahmefläche betrachtet kann 74 % der Masse dem Rinnstein zugeordnet werden und 26 % der Fahrbahn.

Summiert man die Massen aus dem Rinnstein und die Massen, die auf der gesamten Fahrbahn, also nicht nur der in Bild 7.4 gelb markierte Streifen deponiert wurden und berechnet deren Anteil an der Gesamtmasse, lagern 90 % der Feststoffmasse im Rinnstein und 10 % auf der Fahrbahn.

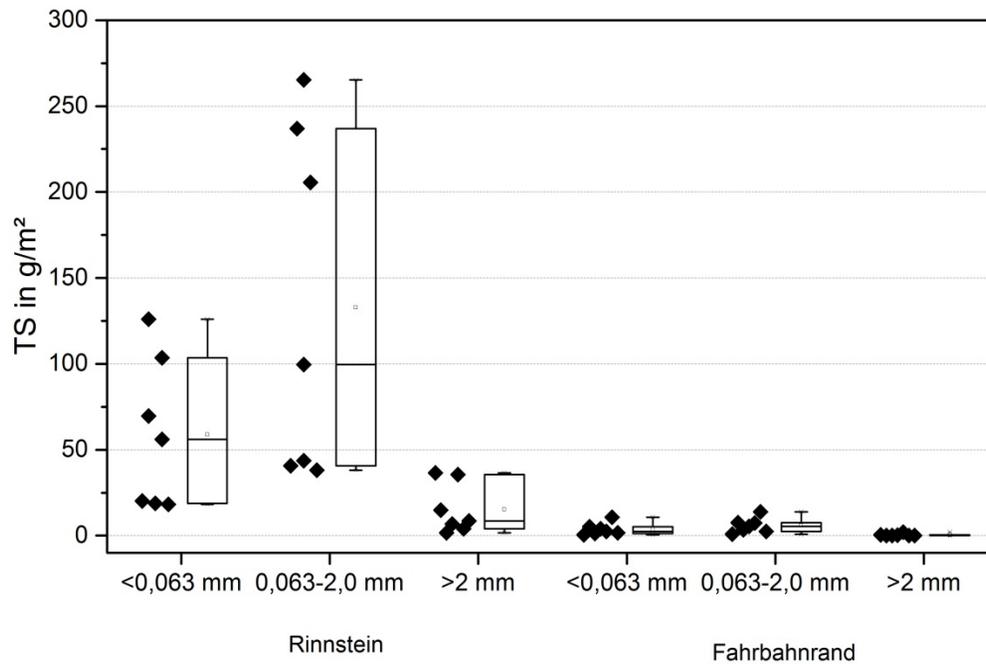


Bild 7.5: TS in g/m² differenziert nach Rinnstein und Fahrbahnrand

Aus den Daten zeigt sich außerdem, dass auf der Straße ein etwas erhöhter Gewichtsanteil des Feinmaterials lagert als in dem Bereich des Rinnsteins. Ansonsten unterscheidet sich die Verteilung der Kornfraktionen nur unwesentlich. Im Rinnstein lagert eine Feststoffmatrix, die etwas höhere Gewichtsanteile der beiden Grobfraktionen und geringere Anteile der Feinfraktion im Vergleich zur Fahrbahn aufweist.

Als Fazit aus den orientierenden Untersuchungen wurde daher ein Berechnungsansatz entwickelt, der für die Verteilung der Feststoffe auf der Straße angesetzt werden kann, siehe Abschnitt 4.1.6 .

Tabelle 7.3: Gewichtsanteile der Proben vom 15.01.2017 differenziert nach Rinnstein und Fahrbahn

	Rinnstein			Fahrbahn		
	< 0,063 mm	0,063 - 2,0 mm	> 2,0 mm	< 0,063 mm	0,063 - 2,0 mm	> 2,0 mm
	34%	61%	4%	40%	56%	4%
	29%	68%	3%	27%	70%	3%
	26%	66%	9%	20%	62%	18%
	24%	71%	5%	41%	59%	0%
	34%	65%	1%	43%	56%	0%
	21%	42%	38%	29%	45%	26%
	28%	59%	13%	40%	59%	1%
Median	28%	65%	5%	40%	59%	3%
Mittelwert	28%	62%	10%	34%	58%	7%
Stabw	5%	10%	13%	9%	7%	10%

7.5 Feststoffdargebot auf Gehwegen

Das Feststoffdargebot der Gehwege wurde in drei Stichproben orientierend untersucht. Es wurden hierfür drei Standorte ausgewählt, die an drei stark unterschiedlich befahrenen Straßen gelegen sind, siehe Tabelle 7.4.

Der Gewichtsanteil der Kornfraktion < 0,063 mm weist mit 2-5 % in den drei Proben eine geringe Streuung gegenüber den beiden größeren Kornfraktionen auf und nimmt nur einen sehr geringen Anteil an der gesamten Feststoffmasse ein.

Das Feststoffaufkommen der Gehwege beträgt nur einen Bruchteil des Feststoffdargebots der Straßen. Angesichts der hohen Massen, die auf den Straßen anfallen, ist der Anteil der Gehwege eher als vernachlässigbar zu betrachten.

Das Feststoffdargebot der Gehwege hat einen hohen Zusammenhang mit dem Verkehrsaufkommen. Es kann angenommen werden, dass die Feststoffe durch den Kfz-Verkehr auf die Gehwege verfrachtet werden.

Tabelle 7.4: Feststoffdargebot von Gehwegen

Messstelle	Fraktion (mm)	TS g/m ²	Gew. %	DTV
Raumentaler Straße	> 2,0	19,49	25	
	0,063 -2,0	57,46	73	
	< 0,063	2,10	3	
	Summe	79,04	100	9.449
Berliner Ring	> 2,0	1,28	7	
	0,063 -2,0	16,02	88	
	< 0,063	1,00	5	
	Summe	18,30	100	4.200
Hohlohstraße	> 2,0	5,65	61	
	0,063 -2,0	3,37	37	
	< 0,063	0,17	2	
	Summe	9,19	100	2.200

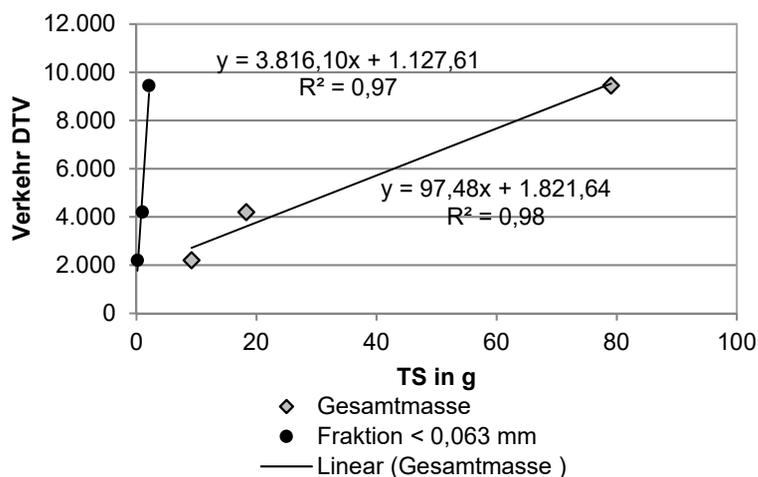
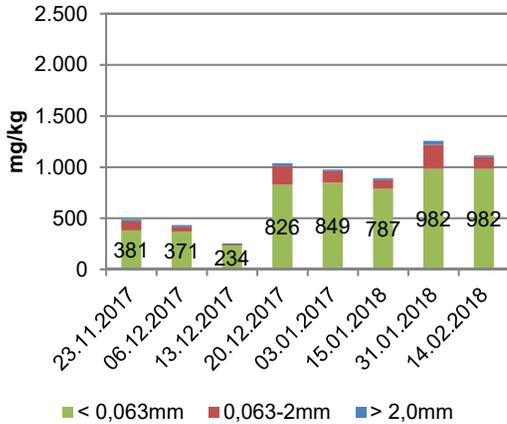


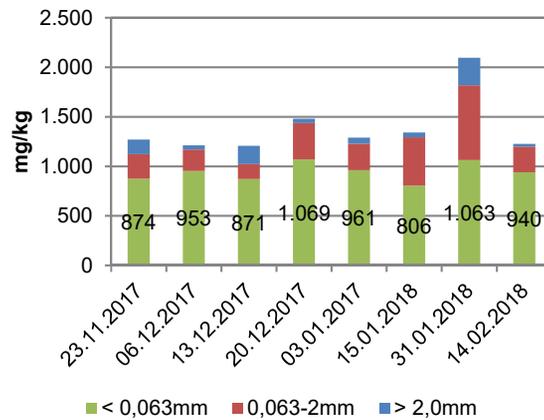
Bild 7.6: Zusammenhang des Feststoffaufkommens von Gehwegen mit den angrenzenden Straßen

7.6 Metallkonzentrationen im Straßensediment

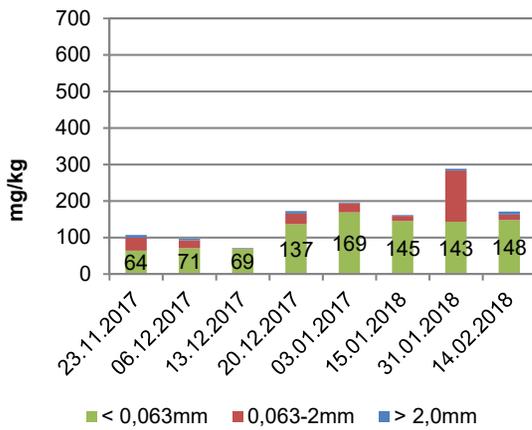
Zink - EZG Lochfeld



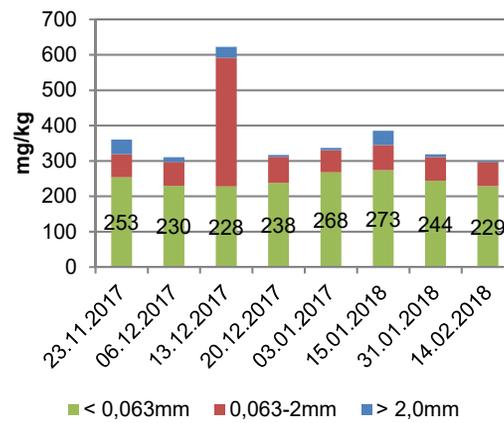
Zink - EZG Federbach



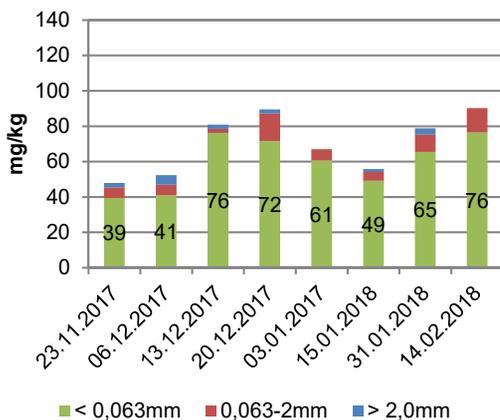
Kupfer - EZG Lochfeld



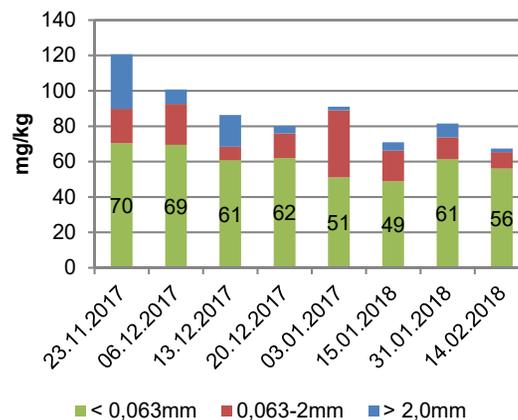
Kupfer - EZG Federbach



Blei - EZG Lochfeld



Blei - EZG Federbach



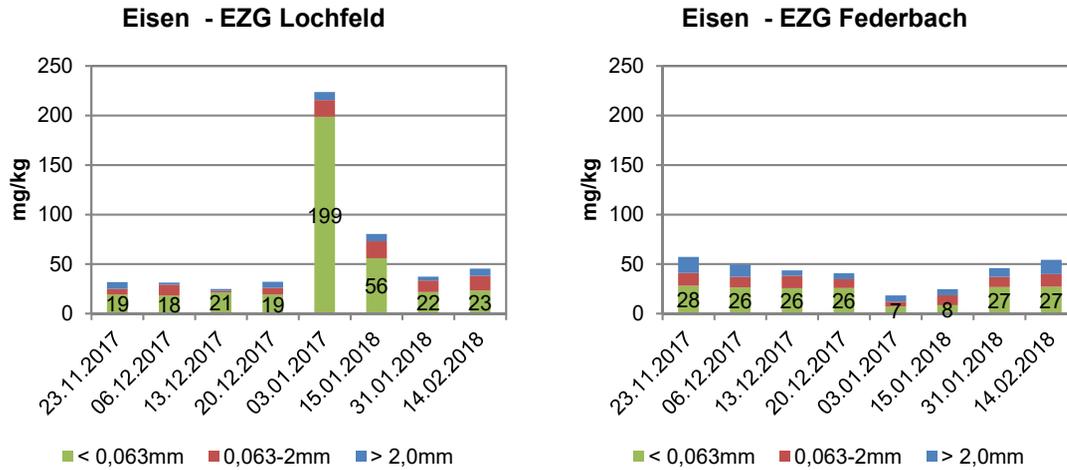


Bild 7.7: Zeitreihen für Metallkonzentrationen in dem Straßensediment

Tabelle 7.5: Konzentrationen von Metallen und Phosphor im Sediment der Feststoffsammler im Zulauf und Ablauf der Regenbecken

Standort	Korngröße	P ges.		Zn		Cd		Cu		Pb		Fe	
		mg/kg	n	mg/kg	n	mg/kg	n	mg/kg	n	mg/kg	n	g/kg	n
Zulaufkonzentrationen													
Lochfeld	0,063 mm	3.276	7	2.335	7	1,8	7	190	7	86	7	38	7
Federbach	0,063 mm	3.899	12	2.428	12	2,3	11	434	11	128	11	47	11
	<i>Quotient</i>	1,2		1,0		1,3		2,3		1,5		1,2	
Ablaufkonzentrationen													
Lochfeld	0,063 mm	3.465	5	2.459	4	2,3	4	251	4	101	4	38	4
Federbach	0,063 mm	3.032	5	2.266	8	2,1	7	426	8	128	8	50	8
	<i>Quotient</i>	0,9		0,9		0,9		1,7		1,3		1,3	

¹ Ausreißer in der Datenreihe mit 11.871 mg/kg

7.7 Feststoffcharakteristik Regenklärbecken

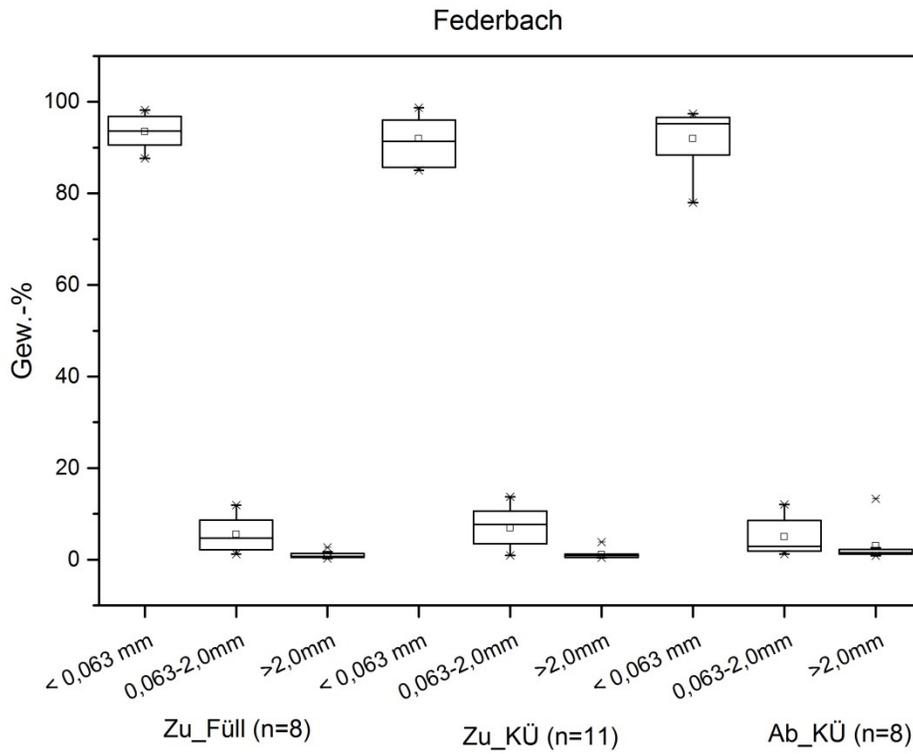


Bild 7.8: Gewichtsprozent der Kornfraktionen der Zu- und Ablaufproben des Regenklärbeckens Federbach

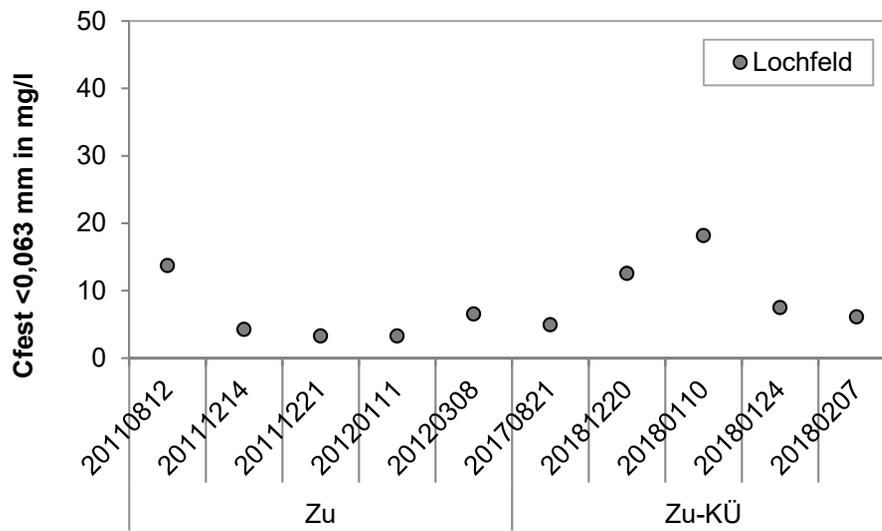


Bild 7.9: Zulaufkonzentrationen an dem RKB Lochfeld aus REFENI I und II

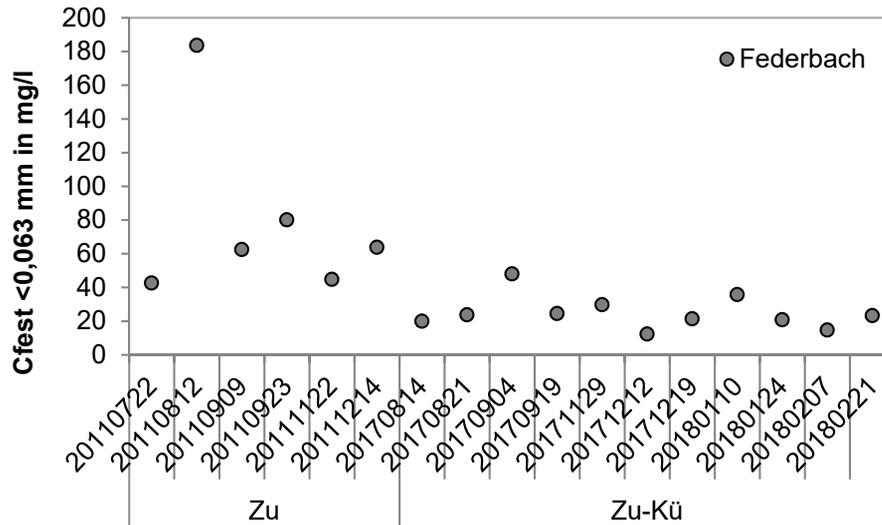


Bild 7.10: Zulaufkonzentrationen an dem RKB Federbach aus REFENI I und II

Tabelle 7.6: Anlagenspezifische Feststoffkonzentrationen und Glühverluste des REFENI 1 (Eyckmanns-Wolters et al., 2013)

	SMC _{TS Zu} mg TS/l	SMC _{TS KÜ} mg TS/l	GV _{Zu} %	GV _{KÜ} %	SMC _{TS Zu} mg TS/l	SMC _{TS KÜ} mg TS/l	GV _{Zu} %	GV _{KÜ} %
	kleiner 63 µm				größer 63 µm bis 2 mm			
RKBoD mit Geschiebeschacht								
B	438	95,1	10,1	10,7	2,8	0,9	35,7	37,1
L	6,7	2,4	35,5	34	0,3	1,5	49,0	81,6
RKBoD ohne Geschiebeschacht								
IW	91,6	74,4	28,1	28,0	20,9	3,6	50,6	68,2
RKBoD im Nebenschluss								
O	106	145	15,7	16,1	0,5	0,6	27,7	18,5
U	17,4	24,1	23,4	23,2	2,1	2,3	50,1	54,1
RKBmD								
D	68,8	37,8	24,5	25,8	5,1	3,8	46,5	40,4
E	38,7	33,9	24,3	22,7	7,9	1,5	36,4	40,4
I	28,2	26,4	39,1	39,5	4,2	3,0	48,8	45,2
P	20,3	16,7	26,1	28,7	6,5	1,5	24,1	43,3

B= Bettringen, O = Oberbruch, IW = Im Wöhr, D = Daimlerstraße, E = Erlenstraße, I = Ibbenbüren, P = Prozessionsweg, U =

Ulnna, L = Lochfeld

8 Literaturverzeichnis

- Bannerman, R. T.; Owens, D. W.; Dodds, R. B.; Hornewer, N. J. (1993): Sources of Pollutants in Wisconsin Stormwater. In: *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research* (28), S. 241–259.
- Borchers, H. W. (2017): pracma: Practical Numerical Math Functions. R package. Online verfügbar unter <https://CRAN.R-project.org/package=pracma>.
- DIN EN 13036-1 (2010): Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen – Prüfverfahren. Teil 1: Messung der Makrotexturtiefe der Fahrbahnoberfläche mit Hilfe eines volumetrischen Verfahrens. Oktober 2010. Berlin, Beuth (Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen: Prüfverfahren/Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V).
- DWA (Hg.) (2014): Prozessmesstechnik auf Kläranlagen - Teil 7: Messeinrichtungen zur Bestimmung der Trübung. Merkblatt DWA-M 256-7. neue Ausg. Hennef (Sieg). Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
- DWA-A 102 (2016): (Gelbdruck) Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächenngewässer. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. Hennef (DWA-Arbeitsblatt).
- DWA-M 153 (2013): Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser. [Stand]: August 2007, korr. Fassung Juli 2013. Hennef DWA, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA-Regelwerk, M 153).
- Egodawatta, P.; Thomas, E.; Goonetilleke, A. (2007): Mathematical interpretation of pollutant wash-off from urban road surfaces using simulated rainfall. In: *Water Research* 41 (13), S. 3025–3031. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135407002291>.
- Eyckmanns-Wolters, R.; Fuchs, S.; Maus, C.; Sommer, Marc, Voßwinkel, Nina; Mohn, R.; Uhl, M. et al. (2013): Reduktion des Feststoffeintrags durch Niederschlagswassereinleitungen. Phase 1 Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- Göbel, P.; Dierkes, C.; Coldewey, W. G. (2007): Storm water runoff concentration matrix for urban areas. In: *Journal of contaminant hydrology* 91 (1-2), S. 26–42.
- Göttle, A. (1978): Ursachen und Mechanismen der Regenwasserverschmutzung. Ein Beitrag zur Modellierung der Abflußbeschaffenheit in städtischen Gebieten. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 1978. München (Berichte aus Wassergütewirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, 23).

- Griesbaum, J. (2017): Charakterisierung von Einzugsgebieten mittels GIS und Ermittlung geeigneter Methoden zur Untersuchung der Feststoffakkumulation. Bachelorarbeit am Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG), Bereich Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütewirtschaft (unveröffentlicht).
- Grotehusmann, D.; Lambert, B.; Fuchs, S.; Graf, J. (Hg.) (2017): Konzentrationen und Frachten organischer Schadstoffe im Strassenabfluss. PTV Transport Consult GmbH. Bremen-Fachverlag NW (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen V, Verkehrstechnik).
- Grottker, M. (1987): RUNOFF QUALITY FROH ASTREEr WITH MEDTIJH TRAFFIC LDADING. In: *The Science of the Total Environment* (59), S. 457–466.
- Gunawardena, J. M.A; Liu, A.; Egodawatta, P.; Ayoko, G. A.; Goonetilleke, A. (2018): Influence of Traffic and Land Use on Urban Stormwater Quality. Implications for Urban Stormwater Treatment Design. SingaporeSpringer Singapore; Imprint: Springer (SpringerBriefs in Water Science and Technology).
- Hahn, H. H.; Xanthopoulos, C. (1993): Niederschlagsbedingte Schmutzbelastung der Gewässer. Teilprojekt 2 - Anthropogene Schadstoffe auf Straßenoberflächen und ihr Transport mit dem Niederschlagsabfluss. Hg. v. Institut für Siedlungswasserwirtschaft Universität Karlsruhe. Karlsruhe.
- Helmreich, B. (2012): Einfluss der Verkehrsstärke und anderen Randbedingungen auf die stoffliche Belastung von Versickerungsanlagen. 11. DWA Regenwassertage. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft. Berlin Schöenefeld, 2012.
- James, W. (1997): Advances in modeling the management of stormwater impacts. Guelph, Ont. Computational Hydraulics International.
- Kemper, M. (2018): Korngrößenverteilung über den Transportweg. Karlsruhe, 2018.
- Lacour, C.; Joannis, C.; Gromaire, M.-C.; Chebbo, G. (2009): Potential of turbidity monitoring for real time control of pollutant discharge in sewers during rainfall events. In: *Water Science and Technology* 59 (8), S. 1471–1478. Online verfügbar unter <http://wst.iwaponline.com/content/59/8/1471>.
- Langeveld, J. G.; Veldkamp, R. G.; Clemens, F. (2005): Suspended solids transport: an analysis based on turbidity measurements and event based fully calibrated hydrodynamic models. In: *Water Science and Technology* 52 (3), S. 93–101. Online verfügbar unter <http://wst.iwaponline.com/content/52/3/93>.
- LFU, Bayerisches Landesamt für Umwelt (2008): Bodenkundliche Untersuchungen im Rahmen des Entwicklungsvorhabens "Versickerung des Niederschlagswassers von befestigten Verkehrsflächen", UmweltSpezial. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg.

Liu, A.; Goonetilleke, A.; Egodawatta, P. (2015): Role of rainfall and catchment characteristics on urban stormwater quality. Singapore, Springer (Springer Briefs in Water Science and Technology (En ligne)).

Momber, A.; Schulz, R.-R. (2006): Handbuch der Oberflächenbearbeitung Beton. Bearbeitung — Eigenschaften — Prüfung. Basel, Birkhäuser Verlag (Bauhandbuch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/3-7643-7373-3>.

Ngari, J. (2017): Variability in solids concentrations from similar urban catchments. Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe. Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Karlsruhe.

Pfeifer, R. (1998a): Schmutzstoffrückhalt durch chemisch-physikalische Regenwasserbehandlung im Trennsystem. München [etc.] Oldenbourg (Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Universität Karlsruhe, 92).

Pfeifer, R. (1998b): Schmutzstoffrückhalt durch chemisch-physikalische Regenwasserbehandlung im Trennsystem. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 1997.

R Core Team (2016): R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria R Foundation for Statistical Computing. Online verfügbar unter <https://www.R-project.org/>.

Schleifenbaum, R.; Henrichs, M.; Uhl, M. (2016): Simulationsstudien zur Wirkung von Regenklärbecken. In: *gwf - Wasser/Abfall* 157 (1), S. 76–84.

Schwarz, S. (2017): Ermittlung des Feststoffpotentials in Einzugsgebieten von Regenklärbecken. Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe (KIT) Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Fachbereich Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütewirtschaft. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe (KIT) Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Fachbereich Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütewirtschaft.

Selbig, W. R.; Bannerman, R. T. (2007): Evaluation of street sweeping as a stormwater-quality-management tool in three residential basins in Madison, Wisconsin. Reston, Va.U.S. Geological Survey (Scientific investigations report, 2007-5156).

Sutherland, R.; Jelen, S. (1997): Contrary to conventional wisdom, street sweeping can be an effective BMP. Computational Hydraulics International. In: *Advances in modeling the management of stormwater impacts*: (5), S. 179–190.

Wicke, D.; Cochrane, T. A.; O'Sullivan, A. D. (2012): Atmospheric deposition and storm induced runoff of heavy metals from different impermeable urban surfaces. In: *Journal of environmental monitoring* : *JEM* 14 (1), S. 209–216.

Wijesiri, B.; Egodawatta, P.; McGree, J.; Goonetilleke, A. (2015): Influence of pollutant build-up on variability in wash-off from urban road surfaces. In: *Science of The Total Environment* 527-528, S. 344–350. Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969715300309>.

