

# **Methodischer Ansatz zur Quantifizierung von Feinpartikeln (PM63) in Niederschlagsabflüssen in Abhängigkeit von der Herkunftsfläche**

## **Methodical approach for quantifying of fine particles (PM63) in rainfall runoffs depending on the surface of origin**

vom Fachbereich Bauingenieurwesen der Technischen Universität Kaiserslautern  
zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

Vorgelegt von  
**Dipl.-Ing. Martina Dierschke**

**Dekan**

Prof. Dr.-Ing. W. Kurz

**Prüfungskommission**

Vorsitzender

Prof. Dr. R. Jüpner

1. Berichterstatter

Prof. Dr.-Ing. T.G. Schmitt

2. Berichterstatter

Prof. Dr.-Ing. H. Steinmetz, Universität  
Stuttgart

Datum der Prüfung

20. Mai 2014

**Kaiserslautern 2014  
(D 386)**



## **Kurzfassung**

Feine Feststoffe mit einer Korngröße zwischen  $> 45 \mu\text{m}$  und  $\leq 63 \mu\text{m}$  (PM63) können als Maß für eine Belastung von Niederschlagsabflüssen dienen, da sie abhängig von der Herkunftsfläche überproportional mit Schadstoffen, wie z.B. Schwermetalle, belastet sein können. Neben den Aktivitäten auf der Herkunftsfläche (Staubniederschlag, Verkehr) beeinflussen jahreszeitliche Randbedingungen und bauliche Gegebenheiten das Feststoffaufkommen sowie den Feststofftransport in die Niederschlagsabflüsse maßgeblich.

Das Ziel der Arbeit war, den Kenntnisstand bezüglich Herkunft, Verhalten und Verbleib, aber auch Zusammensetzung und Korngrößenverteilung von Feststoffen auf Verkehrs- und Dachflächen darzustellen. Anhand der Kenntnisse und der Auswertung von Ergebnissen aus Messkampagnen wurden Gleichungen für unterschiedliche Herkunftsflächen (Verkehrsflächen, Dachflächen, Mischflächen) entwickelt, mit denen das flächenspezifische jährliche Aufkommen abfiltrierbarer Stoffe (AFS) und feiner Feststoffe (PM63) in  $[\text{kg}/(\text{ha}\cdot\text{a})]$  bzw. jeweils eine mittlere Jahreskonzentration in  $[\text{mg}/\text{l}]$  abgeschätzt werden können.

Die Gleichungen wurden schließlich jeweils einer Sensitivitätsanalyse unterzogen und anhand von gut beschriebenen Messprogrammen zur Gesamtfeststoffkonzentration (AFS) verifiziert.

Da es derzeit noch wenige Studien bezüglich des Aufkommens und -transportes feiner Feststoffe in Niederschlagsabflüssen gibt, blieben einige Fragestellungen offen. Sind in Zukunft weitere Studien über PM63-Anteile, -Aufkommen und -Transport verfügbar, lassen sich die hier zunächst vorgeschlagenen PM63-Anteile und -Faktoren problemlos anpassen.

## **Abstract**

Fine solids with grain size of  $> 45 \mu\text{m}$  until  $\leq 63 \mu\text{m}$  (PM63) can serve as a measure for the degree of the contamination of rainfall runoffs, since - depending on the source area - they can be disproportionately charged with pollutants such as heavy metals. In addition to the activities on the source area (dust precipitation, traffic), seasonal boundary conditions and structural design conditions will affect the occurrence of solids and the transport of solids into the rainfall runoffs significantly.

The purpose of this project was to present the state of knowledge regarding the origin, whereabouts and behavior, as well as the composition and grain size distribution of solids onto circulation and roof areas. Based on the knowledge and the evaluation of measuring campaign results, equations have been developed for various source areas (circulation areas, roof areas, mixed areas), with which the area specific annual rise of total suspended solids (TSS) and fine solids (PM63) can be estimated in  $[\text{kg}/(\text{ha}\cdot\text{a})]$  or in single cases an annual average concentration in  $[\text{mg}/\text{l}]$ .

In a final step, the equations were validated against a sensitivity analysis and verified on the basis of well established monitoring programs for the concentration of total suspended solids (TSS).

Since there is currently a lack of studies regarding the rise and transport of fine solids in rainfall runoffs, several questions remained open. If further studies about PM-63- portions, -raises and –transports were to be made available in the future, the herewith proposed PM-63 portions and –factors could easily be adjusted.

## Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Bildverzeichnis</b> .....  | <b>V</b>  |
| <b>Tabellenverzeichnis</b> .....  | <b>IX</b> |
| <b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....  | <b>XI</b> |
| <br>  |           |
| <b>1 Einleitung/Veranlassung</b>  | <b>1</b>  |
| <br>  |           |
| <b>2 Grundlagen</b>   | <b>5</b>  |
| 2.1 Definition „Abfiltrierbare Stoffe“ .....  | 5         |
| 2.2 Herkunft abfiltrierbarer Stoffe (AFS) in Niederschlagsabflüssen .....                   | 6         |
| 2.2.1 Staubniederschlag .....   | 6         |
| 2.2.2 Verkehrsbedingte Emissionen .....   | 13        |
| 2.2.3 Dachabrieb und Korrosionsprodukte.....  | 20        |
| 2.2.4 Bodenerosion.....   | 21        |
| 2.2.5 Pollen, Blüten, Laub .....  | 22        |
| 2.2.6 Sonstige Einträge .....   | 23        |
| 2.3 Verhalten/Retention .....   | 24        |
| 2.3.1 Abflussbildung .....  | 24        |
| 2.3.2 Verkehrsflächenabfluss.....   | 26        |
| 2.3.3 Dachabfluss .....   | 35        |
| 2.3.4 Trenngebietsauslässe .....  | 36        |
| 2.4 Korngrößenverteilung abfiltrierbarer Stoffe.....  | 38        |
| 2.4.1 Definition PM <sub>63</sub> (AFS <sub>fein</sub> ).....                               | 40        |
| 2.4.2 Staubniederschlag .....   | 41        |
| 2.4.3 Verkehrsflächenabfluss.....   | 43        |
| 2.4.4 Dachabfluss .....   | 46        |
| 2.4.5 Sonstige .....  | 47        |
| 2.5 Zusammensetzung von Staubniederschlag und Feststoffen in<br>Niederschlagsabflüssen..... | 47        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 2.5.1    | Staubniederschlag .....  | 47        |
| 2.5.2    | Verkehrsflächenabfluss.....  | 50        |
| 2.5.3    | Dachabfluss .....  | 54        |
| 2.5.4    | Sonstige .....   | 56        |
| 2.6      | Wechselwirkung mit der Umwelt.....   | 57        |
| 2.7      | Behandlungsmöglichkeiten und erforderliche Wirkungsgrade .....                             | 59        |
| <b>3</b> | <b>Quantifizierung von AFS<sub>ges</sub> und PM63 in Niederschlagsabflüssen</b>            | <b>61</b> |
| 3.1      | Gesamtfeststoff- und PM63-Flächendeposition.....   | 63        |
| 3.1.1    | Staubdeposition .....  | 63        |
| 3.1.1.1  | Gelöste Anteile im Staubniederschlag.....  | 66        |
| 3.1.1.2  | Pollen/Blüten in der Vegetationsphase .....  | 70        |
| 3.1.1.3  | Feststoffaufkommen aus Staubniederschlag ohne Pollenbelastung .....                        | 78        |
| 3.1.2    | Verkehrsbedingtes Feststoffaufkommen .....   | 78        |
| 3.1.2.1  | Abriebsprodukte.....   | 79        |
| 3.1.2.2  | Winterbedingte Feststofferhöhung.....  | 87        |
| 3.1.3    | Abflüsse von unbefestigten Flächen .....   | 91        |
| 3.1.4    | Einträge aus landwirtschaftlicher Tätigkeit.....   | 92        |
| 3.1.5    | Einträge durch Bautätigkeiten.....   | 93        |
| 3.1.6    | Abminderungs- und Erhöhungsfaktoren für das Feststoffaufkommen auf<br>Verkehrsflächen..... | 94        |
| 3.1.6.1  | Verkehrsart.....   | 95        |
| 3.1.6.2  | Abminderungsfaktor Fahrspuranzahl.....   | 96        |
| 3.1.6.3  | Abminderungsfaktor Randbebauung .....  | 97        |
| 3.1.6.4  | Abminderungsfaktor Straßenreinigung.....   | 98        |
| 3.1.6.5  | Gegenseitige Beeinflussung der Faktoren.....   | 99        |
| 3.1.7    | Feststoffaufkommen auf Dachflächen.....  | 99        |
| 3.2      | Berechnung der Gesamtfeststoff- und PM63-Deposition.....                                   | 101       |
| 3.2.1    | Verkehrsflächen.....   | 101       |
| 3.2.2    | Dachflächen.....   | 105       |
| 3.2.3    | Trenngebiete mit unterschiedlichen Flächentypen .....                                      | 106       |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 3.3      | Berechnung der Feststoffkonzentration im Niederschlagsabfluss.....                             | 107        |
| 3.3.1    | Benetzungs-, Mulden- und Verdunstungsverlust .....   | 107        |
| 3.3.2    | Niederschlag .....   | 108        |
| 3.3.3    | Feststoffkonzentration in Verkehrsflächen- und Dachabflüssen .....                             | 109        |
| 3.3.4    | Rückhalt im Straßeneinlauf und Kanalsystem.....  | 110        |
| <b>4</b> | <b>AFS-Konzentration in Niederschlagsabflüssen - Darstellung vorhandener<br/>Messprogramme</b> | <b>111</b> |
| 4.1      | Bestimmung von Feststoffen .....   | 111        |
| 4.1.1    | Probennahme und –aufbereitung .....  | 111        |
| 4.1.2    | Analytik AFS.....  | 113        |
| 4.1.3    | Analytik PM63 .....  | 114        |
| 4.1.4    | Probenauswertung .....   | 115        |
| 4.2      | Messprogramme .....  | 117        |
| 4.2.1    | Verkehrsflächenabflüsse.....   | 117        |
| 4.2.1.1  | Straßenabflüsse .....  | 118        |
| 4.2.1.2  | Autobahnabflüsse.....  | 122        |
| 4.2.1.3  | Parkplatzabflüsse.....   | 128        |
| 4.2.2    | Dachabflüsse .....   | 130        |
| 4.2.3    | Trenngebietsabflüsse.....  | 137        |
| <b>5</b> | <b>Verifizierung der Berechnungsgleichungen</b>  | <b>141</b> |
| 5.1      | Verkehrsflächenabflüsse.....   | 141        |
| 5.1.1    | Straßenabflüsse .....  | 141        |
| 5.1.1.1  | Sensitivitätsanalyse .....   | 143        |
| 5.1.1.2  | Verifizierung .....  | 145        |
| 5.1.2    | Autobahnabflüsse.....  | 148        |
| 5.1.2.1  | Sensitivitätsanalyse .....   | 149        |
| 5.1.2.2  | Verifizierung .....  | 152        |
| 5.1.3    | Parkplatzabflüsse .....  | 155        |
| 5.1.3.1  | Sensitivitätsanalyse .....   | 157        |

|                    |   |            |
|--------------------|---|------------|
| 5.1.3.2            | Verifizierung .....   | 159        |
| 5.2                | Dachabflüsse .....  | 162        |
| 5.2.1              | Sensitivitätsanalyse .....  | 163        |
| 5.2.2              | Verifizierung .....   | 164        |
| 5.3                | Trenngebietsabflüsse .....  | 167        |
| 5.3.1              | Flächenanteile .....  | 167        |
| 5.3.2              | Abschätzung des Feststoffaufkommens in Modellgebieten und Vergleich mit gemessenen Werten in Trenngebieten..... | 169        |
| 5.3.3              | Sensitivitätsanalyse .....  | 172        |
| 5.3.4              | Verifizierung anhand zweier Trenngebiete.....   | 174        |
| 5.3.4.1            | Einzugsgebiet der Pilotanlage Halenreie .....   | 174        |
| 5.3.4.2            | Einzugsgebiet Regenklärbecken Mörfelden-Süd.....  | 179        |
| <b>6</b>           | <b>Anwendung der Berechnungsgleichung</b>   | <b>187</b> |
| 6.1                | PM63-Wert einer nichtbehandlungsbedürftigen Fläche.....   | 187        |
| 6.2                | Maximale Feststoffkonzentrationen durch jahreszeitliche Extrembedingungen.....                                  | 190        |
| <b>7</b>           | <b>Diskussion der Ergebnisse, Fazit und Ausblick</b>  | <b>193</b> |
| <b>8</b>           | <b>Zusammenfassung</b>  | <b>199</b> |
| <b>9</b>           | <b>Literatur</b>  | <b>203</b> |
| <br><b>Anhang:</b> |   |            |
|                    | <b>Ermittlung von befestigten Flächenanteilen in Siedlungsgebieten</b>  | <b>225</b> |
|                    | <b>Lebenslauf</b>   | <b>229</b> |



## Bildverzeichnis

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Bild 2-1:  | Bezeichnung von (Fest-)stoffen in Wassermedien .....  | 5  |
| Bild 2-2:  | Aerosole, verändert nach [BfVBS, 2012] .....  | 7  |
| Bild 2-3:  | Prozesse der Entstehung, Umwandlung und Entfernung von Aerosolen aus der Atmosphäre [BBS, 2011].....  | 9  |
| Bild 2-4:  | Größenbereiche von Partikeln in der Atmosphäre, aus [HLUG, o.J.] .....  | 10 |
| Bild 2-5:  | Bergerhoff-Sammelgefäß zur Staubbiederschlagsmessung [LfU, 2012a] .....   | 11 |
| Bild 2-6:  | Dieselfußagglomerat umgeben von einzelnen Rußpartikeln [Ebert, 2009].....   | 13 |
| Bild 2-7:  | Abriebprodukt Verkehr; zwei spindelförmige Kornaggregate [Trimbacher u. Neinavaie, 2002].....   | 15 |
| Bild 2-8:  | Zink im angrenzenden Boden von Verkehrsflächen in Abhängigkeit von der DTV [Helmreich, 2012].....   | 16 |
| Bild 2-9:  | AFS in Schneeproben entlang einer Autobahn in Norwegen in der Abhängigkeit von der DTV, Daten aus [Lygren et al., 1984]. AFS <sub>fein</sub> : Sinkgeschwindigkeit < 8,5 cm/min ..... | 17 |
| Bild 2-10: | Zinkkonzentration [mg/kg ] im den Fahrbahnrand angrenzenden Oberboden in Abhängigkeit von der DTV [Kocher, 2011].....   | 17 |
| Bild 2-11: | Zink im angrenzenden Boden von Verkehrsflächen in Abhängigkeit von der Fahrweiseklasse [Helmreich, 2012] .....  | 18 |
| Bild 2-12: | Fahrbahnzerstörung nach dem Winter, Foto: [Markert, 2012] .....   | 19 |
| Bild 2-13: | Dokumentation von „Salzflecken“ und die Auswaschung von Feinpartikeln aus dem Fahrbahnmaterial als Folge der Salzstreuung [Lambert, 2010].....  | 19 |
| Bild 2-14: | Material in Dachrinnen; Fotos: links: [FS-Dienstleistungen, 2013] rechts: [Dachrinnenreinigung Seyffarth, 2013] .....   | 20 |
| Bild 2-15: | Elektronenmikroskopische Aufnahmen von Kupferdachabflüssen in Auckland, Neuseeland. [Pennington und Webster-Brown, 2008] .....  | 21 |
| Bild 2-16: | Pollenkörner .....  | 22 |
| Bild 2-17: | Pappelblüten im Juni.....   | 23 |
| Bild 2-18: | Feststoffeinträge durch Bautätigkeiten und landwirtschaftliche Tätigkeiten .....  | 23 |
| Bild 2-19: | Darstellung von Einzelverlusten, verändert nach [ATV-DVWK-M 165, 2004] .....  | 25 |
| Bild 2-20: | Beiträge zur Erhöhung und Faktoren zur Verringerung von AFS im Verkehrsflächenabfluss, verändert nach [Welker und Dierschke, 2013] .....  | 27 |
| Bild 2-21: | Feststoffe in Niederschlagsabflüssen zweier Parkplätze in Abhängigkeit von der Dauer der vorangegangenen Trockenperiode; Daten aus [McQueen, 2008].....                               | 27 |
| Bild 2-22: | Kupfer im angrenzenden Boden von Verkehrsflächen in Abhängigkeit von der DTV [Helmreich, 2012].....   | 29 |
| Bild 2-23: | Staubbiederschlag an der A 4 mit 71.500 DTV in Abhängigkeit von der Entfernung sowie der Höhe, n = 10 bis 70, 2005 bis 2009, Daten aus [Bast, 2011].....                              | 30 |
| Bild 2-24: | Vermehrte Sedimentbildung am Hochbord der A113neu in Berlin nach der Wintersalzung, Frühjahr 2008. Aus: [Lambert, 2011] .....   | 31 |
| Bild 2-25: | Schematische Darstellung der Versuchsanlage bestehend aus den Systemen „Bankett“ und „Straße“, aus [Boller et al., 2005b] .....   | 31 |
| Bild 2-26: | Möglicher Verlauf der AFS-Konzentration (GUS) während eines Regenereignisses. ....  | 32 |
| Bild 2-27: | Feststoffbeladung einer Straßenoberfläche im zeitlichen Verlauf, verändert nach [Vaze und Chiew, 2002] .....  | 33 |

|            |  |     |
|------------|--|-----|
| Bild 2-28: | Dachrinnenreinigung. Quelle: [Dachrinnenreinigung Seyffarth, 2013] .....   | 36  |
| Bild 2-29: | Klassierung und Sortierung von Feststoffen während des Transportes [Fuchs et al., 2010a] .....   | 37  |
| Bild 2-30: | Korngrößen von Einträgen in Niederschlagsabflüsse (qualitativ) (eigene Darstellung)...   | 39  |
| Bild 2-31: | Korngrößenverteilung im Staubniederschlag der Stadt Linz, Messungen 1973 und 1974, aus [Gruber, 1981].....   | 41  |
| Bild 2-32: | Größenverteilung verschiedener Partikelquellen in Kalifornien, USA, aus [Watson und Chow, 2000] .....  | 42  |
| Bild 2-33: | Sieblinien von Straßenstäuben .....  | 44  |
| Bild 2-34: | Sieblinien von Straßenabflüssen .....  | 45  |
| Bild 2-35: | AFS <sub>ges</sub> und PM <sub>63</sub> im Abfluss eines Dachs in Darmstadt-Eberstadt während der Pollenflugphase, [Dierschke, Welker, 2013] verändert nach [Kreiling, 2012] ..... | 46  |
| Bild 2-36: | Blei im Staubniederschlag im Jahr 2011 in NRW, [LANUV 2012c] .....   | 49  |
| Bild 2-37: | PCDD/PCDF und PCB im Staubniederschlag im Jahr 2011 in NRW [LANUV 2012c] .....   | 49  |
| Bild 2-38: | Kupfer an unterschiedlichen Kornfraktionen von Straßenstaub und im Straßenabfluss [DWA, 2010] .....  | 53  |
| Bild 2-39: | PAK an unterschiedlichen Kornfraktionen von Straßenstaub und im Straßenabfluss [DWA, 2010] .....   | 53  |
|            |  |     |
| Bild 3-1:  | Ermittlung von niederschlagsabflussrelevanten Feststoffen aus dem Staubniederschlag  | 63  |
| Bild 3-2:  | Mittlere Staubniederschlagbelastung in Brandenburg (Jahresmittelwerte) in Brandenburg [LUA Brandenburg, 2009] .....  | 63  |
| Bild 3-3:  | Entwicklung der Ionenkonzentration im Niederschlag (normiert auf 1982) an den Messstationen des UBA-Luftmessnetzes 1982 – 2011 [UBA, 2013].....                                    | 68  |
| Bild 3-4:  | Monatliche Staubniederschläge in drei Gebieten.....  | 71  |
| Bild 3-5:  | Monatliche Staubniederschläge in NRW.....  | 72  |
| Bild 3-6:  | Monatliche Staubniederschläge in bayerischen Standorten .....  | 73  |
| Bild 3-7:  | Lage des untersuchten Daches [Kreiling, 2012].....   | 75  |
| Bild 3-8:  | Pollenbelaste (links) und unbelastete (rechts) Probe [Kreiling, 2012] .....  | 76  |
| Bild 3-9:  | Beispiele für Vegetationsfaktoren, aus [Amrosik, 2012] .....   | 77  |
| Bild 3-10: | Ermittlung von niederschlagsabflussrelevanten Feststoffen aus verkehrsbedingtem Abrieb.....  | 79  |
| Bild 3-11: | Nicht transportierter Fahrabrieb/-verlust nach einem Niederschlagsereignis.....  | 81  |
| Bild 3-12: | Mögliche Korngrößenverteilung von für Niederschlagsabflüsse relevantem Fahrabrieb, eigene Darstellung .....  | 82  |
| Bild 3-13: | Abflussgewichtete Feststoffkonzentration in Baustellenabflüssen in Wisconsin in Abhängigkeit von der Bauphase; n = 3 bis 8 [Owens et al., 2000].....                               | 93  |
| Bild 3-14: | Erhöhende und abmindernde Faktoren zur Ermittlung von niederschlagsabflussrelevanten Feststoffen aus verkehrsbedingtem Abrieb .....  | 94  |
| Bild 3-15: | Verringerung von Feststoffen auf Straßenoberflächen durch Verwehungen .....  | 97  |
| Bild 3-16: | AFS in Abflüssen von Dächern mit unterschiedlichen Materialien (Bayreuth) [Förster, 1990].....   | 100 |

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| Bild 4-1:  | Verteilung der mittleren AFS-Konzentrationen im Oberflächenabfluss von 127 Regenerereignissen in 7 Schweizer Siedlungsgebiete – Trennsystem (verändert) nach [Rossi et al., 2004] ..... | 112 |
| Bild 4-2:  | Gegenüberstellung von Abflussgewichtetem Mittelwert, Mittelwert und Median des AFS <sub>ges</sub> im Abfluss eines Daches in Graz, Werte aus [Kobencic, 2002] .....                     | 115 |
| Bild 4-3:  | AFS <sub>gesamt</sub> in Verkehrsflächenabflüssen, nach [Welker, 2005].....   | 117 |
| Bild 4-4:  | AFS <sub>ges</sub> in Dachabflüssen in Hamburg; Werte aus [Büchner und Opfermann, 1989].....  | 131 |
| Bild 4-5:  | AFS <sub>ges</sub> in Dachabflüssen verschiedener Städte, aus [Dierschke und Welker, 2013].....   | 135 |
| Bild 4-6:  | Typische Straße im Marais, Paris .....  | 136 |
| Bild 4-7:  | Messdaten zu AFS <sub>ges</sub> -Konzentrationen im Regenfluss, [Fuchs et al, 2010b]; erweitert auf der Grundlage der Daten von [Brombach und Fuchs, 2002] .....                        | 137 |
|            |   |     |
| Bild 5-1:  | Änderung des Feststoffaufkommens auf Straßen bei Erhöhung der Eingabeparameter um 10%.....  | 143 |
| Bild 5-2:  | Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die Berechnung des Feststoffaufkommens auf Straßen, in Klammern die Eingabewerte .....  | 144 |
| Bild 5-3:  | Situation in der Kirchbergstraße, Burgdorf, Quelle: google-earth.....   | 146 |
| Bild 5-4:  | Verifizierung zur Berechnung von Straßenabflüssen .....   | 148 |
| Bild 5-5:  | Änderung des Feststoffaufkommens auf Autobahnen nach Erhöhung der Eingabeparameter um 10%. .....  | 149 |
| Bild 5-6:  | Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die Berechnung des Feststoffaufkommens auf Autobahnen, in Klammern die Eingabewerte .....   | 151 |
| Bild 5-7:  | Verifizierung zur Berechnung von Autobahnabflüssen .....  | 153 |
| Bild 5-8:  | Änderung des Feststoffaufkommens auf (Supermarkt-)Parkplätzen nach Erhöhung der Eingabeparameter um 10% .....   | 157 |
| Bild 5-9:  | Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die Berechnung des Feststoffaufkommens auf (Supermarkt-)Parkplätzen, in Klammern die Eingabewerte .....   | 158 |
| Bild 5-10: | Verifizierung zur Berechnung von Parkplatzabflüssen .....   | 161 |
| Bild 5-11: | Änderung des Feststoffaufkommens auf Dachflächen nach Erhöhung der Eingabeparameter um 10% .....  | 163 |
| Bild 5-12: | Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die Berechnung des Feststoffaufkommens auf Dachflächen, in Klammern die Eingabewerte .....  | 164 |
| Bild 5-13: | Verifizierung zur Berechnung von Dachabflüssen .....  | 165 |
| Bild 5-14: | Änderung des Feststoffaufkommens in Mischgebieten nach Erhöhung der Eingabeparameter um 10% .....   | 172 |
| Bild 5-15: | Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die Berechnung des Feststoffaufkommens in Mischgebieten, in Klammern die Eingabewerte.....  | 173 |
| Bild 5-16: | Einzugsgebiet der Pilotanlage Halenreie [Fitschen, 2000] .....  | 175 |
| Bild 5-17: | Einzugsgebiet der Pilotanlage Halenreie [google-earth, 2013].....   | 177 |
| Bild 5-18: | Verifizierung zur Berechnung von Mischgebietsabflüssen .....  | 178 |
| Bild 5-19: | Luftbild des Einzugsgebiets des Regenklärbeckens Mörfelden-Süd [Schmitt, 2013].....   | 179 |
| Bild 5-20: | Einzugsgebiet des Regenklärbeckens Mörfelden-Süd, verändert nach [Schmitt, 2013] ..   | 180 |
| Bild 5-21: | Berechnete und gemessene Feststoffkonzentrationen in Einzugsgebiet des Regenklärbeckens Mörfelden-Süd, Werte nach [Schmitt, 2013] .....   | 184 |
| Bild 5-22: | Feststoffeintrag durch Bodenerosion im Einzugsgebiet des Regenklärbeckens Mörfelden-Süd, aus [Schmitt, 2013] .....  | 185 |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| Bild 6-1: | Berechnetes mittleres jährliches Feststoffaufkommen in Trenngebieten.....   | 188 |
| Bild 6-2: | Berechnetes mittleres jährliches Feststoffaufkommen in Trenngebieten, wenn Bodenerosion und Bautätigkeiten vorhanden sind ..... | 189 |
| Bild 6-3: | Mittleren Feststoffaufkommens einer Verkehrsfläche mit 3.000 DTV und unter Extrembedingungen .....                              | 191 |
| Bild A-1: | Referenzgebiete in der Innenstadt von Kaiserslautern mit < 2.000 DTV. [Quelle: google earth, 2013].....                         | 226 |
| Bild A-2: | Herkunft des Regenwassers nach Art der Flächen in Basel [Kanton Basel Stadt, 2007]..  | 227 |

## Tabellenverzeichnis

|  |     |
|--|-----|
| Tabelle 2-1: Immissionswerte für Staubniederschlag und Inhaltsstoffe nach TA Luft [BUNR, 2002] ..  | 12  |
| Tabelle 2-2: Täglichen Verdunstungsraten je Tag in Abhängigkeit vom Monat [Verworn, 1993] .....  | 25  |
| Tabelle 2-3: Abflussbeiwerte nach ATV-DVWK A 198 [ATV-DVWK, 2003] .....  | 26  |
| Tabelle 2-4: Effektivität der Straßenreinigung .....   | 28  |
| Tabelle 2-5: AFS <sub>ges</sub> -Austrag aus Einzugsgebieten unterschiedlicher Größe, erweitert nach [Fuchs et al., 2010b] .....   | 38  |
| Tabelle 2-6: Stoffquellen und Stoffe aus dem Kraftfahrzeugverkehr, erweitert nach [Helmreich et al., 2005] .....   | 51  |
| Tabelle 2-7: Größtenteils partikulär vorliegende Schadstoffe in Verkehrsflächenabflüssen, nach [DWA, 2010] .....   | 52  |
| Tabelle 2-8: Inhaltsstoffe von Dachmaterialien .....   | 55  |
| Tabelle 2-9: Teilweise partikulär vorliegende Schadstoffe in Dachflächenabflüssen (Materialien ohne wesentliche Metallanteile), nach [DWA, 2010] .....                                     | 56  |
|  |     |
| Tabelle 3-1: Staubniederschlagsmessungen ab 2000, Literaturzusammenstellung .....  | 64  |
| Tabelle 3-2: Ionen, Leitfähigkeit und DOC in Niederschlägen, Literaturzusammenstellung .....   | 67  |
| Tabelle 3-3: Statistische Auswertungen der Staubniederschläge [mg/m <sup>2</sup> ·d] in vier Messgebieten .....  | 74  |
| Tabelle 3-4: Zusammenstellung ermittelter Fahrbahnabrieb je DTV .....  | 81  |
| Tabelle 3-5: Zusammenstellung ermittelter Reifenabrieb je DTV .....  | 84  |
| Tabelle 3-6: Zusammenstellung ermittelter Bremsabrieb je DTV .....   | 86  |
| Tabelle 3-7: PM <sub>63</sub> -Abrieb je PKW und LKW bei normalem Verkehr, (DTV: in [Fahrzeuge/d]) .....   | 86  |
| Tabelle 3-8: AFS <sub>ges</sub> in [mg/l] als Mittelwert je Quartal in einer neunjährigen Messkampagne an der Derchinger Straße in Augsburg mit 7.000 DTV [Nadler und Meißner, 2008] ..... | 88  |
| Tabelle 3-9: Winterbedingte Erhöhung des AFS-Aufkommens .....  | 89  |
| Tabelle 3-10: PM <sub>63</sub> -Anteil an der Deposition auf Verkehrsflächen .....   | 104 |
|  |     |
| Tabelle 4-1: Filtermaterial und Porenweite zur Bestimmung von Feststoffen in unterschiedlichen Normen .....  | 113 |
| Tabelle 4-2: AFS <sub>ges</sub> in [mg/l] aus unterschiedlichen Messprogrammen an Straßen .....  | 118 |
| Tabelle 4-3: AFS <sub>ges</sub> in [mg/l] aus unterschiedlichen Messprogrammen an Autobahnen .....   | 123 |
| Tabelle 4-4: AFS <sub>ges</sub> in [mg/l] aus unterschiedlichen Messprogrammen an Parkplätzen .....  | 128 |
| Tabelle 4-5: AFS <sub>ges</sub> in [mg/l] aus unterschiedlichen Messprogrammen an Dachabflüssen .....  | 131 |
| Tabelle 4-6: AFS <sub>ges</sub> in [mg/l] aus unterschiedlichen Messprogrammen in Trenngebieten .....  | 138 |
|  |     |
| Tabelle 5-1: Durchschnittliche Verkehrsstärken im deutschen Straßennetz, aus [Bast, 2010] .....  | 141 |
| Tabelle 5-2: Auswahlparameter zur Berechnung des Feststoff- und PM <sub>63</sub> -Gehaltes in Straßenabflüssen, Referenzstraße .....   | 142 |
| Tabelle 5-3: Eingabeparameter zur Berechnung des AFS <sub>ges</sub> und des PM <sub>63</sub> in Straßenabflüssen .....   | 147 |
| Tabelle 5-4: Eingabeparameter der Referenzautobahn zur Berechnung von AFS und PM <sub>63</sub> in Autobahnabflüssen .....  | 150 |
| Tabelle 5-5: Eingabeparameter zur Berechnung des AFS <sub>ges</sub> und des PM <sub>63</sub> in Autobahnabflüssen .....  | 154 |
| Tabelle 5-6: Eingabeparameter zur Berechnung des AFS <sub>ges</sub> und des PM <sub>63</sub> in Parkplatzabflüssen .....   | 156 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabelle 5-7: Eingabeparameter zur Berechnung des AFS <sub>ges</sub> und des PM63 in Parkplatzabflüssen ....  | 160 |
| Tabelle 5-8: Auswahlparameter zur Berechnung des AFS <sub>ges</sub> und PM63 in Dachabflüssen.....   | 162 |
| Tabelle 5-9: Eingabeparameter zur Berechnung des AFS <sub>ges</sub> und des PM63 in Dachabflüssen .....  | 166 |
| Tabelle 5-10: Vorschlag der Aufteilung befestigter Flächen in Abhängigkeit vom Siedlungstyp .....  | 168 |
| Tabelle 5-11: Eingabeparameter zur Berechnung des AFS <sub>ges</sub> und des PM63 in Mischgebietsabfluss einer Stadt .....   | 170 |
| Tabelle 5-12: Feststoffaufkommen und -konzentration in Trenngebietsabflüssen unterschiedlicher Modellgebiete.....  | 171 |
| Tabelle 5-13: Befestigte Flächenanteile des Einzugsgebiets Halenreie.....  | 175 |
| Tabelle 5-14: Eingabeparameter zur Berechnung des AFS <sub>ges</sub> und des PM63 im Einzugsgebiet Halenreie .....   | 176 |
| Tabelle 5-15: Befestigte Flächenanteile des Einzugsgebiets Regenklärbecken Mörfelden-Süd, aus [Schmitt,2013].....  | 181 |
| Tabelle 5-16: Eingabeparameter zur Berechnung des AFS <sub>ges</sub> und des PM63 im Einzugsgebiet RKB Mörfelden-Süd .....   | 182 |
| Tabelle 5-17: Berechneter Feststoffabtrag und -konzentration im Einzugsgebiet Mörfelden-Süd, nach [Schmitt, 2013].....   | 183 |
| Tabelle 5-18: Niederschlagshöhe, Intensität, Trockenperiode, AFS <sub>ges</sub> und PM63- Konzentration sowie PM63/AFS <sub>ges</sub> -Verhältnis der untersuchten Niederschlagsereignisse im Einzugsgebiet RKB Mörfelden-Süd, nach [Schmitt, 2013].....               | 183 |
|  |     |
| Tabelle 6-1: Berechnung des mittleren Jahresfeststoffaufkommens in einem nicht behandlungsbedürftigen Einzugsgebiet sowie der mittleren Jahresfeststoffkonzentration .   | 187 |
| Tabelle 6-2: Berechnung des mittleren Feststoffaufkommens in einem nicht behandlungsbedürftigen Einzugsgebiet, in dem jedoch Belastungen durch Bodenerosion (25% von A <sub>u</sub> ) und Staubemissionen durch Bautätigkeiten auf 10% der Fläche vorhanden sind ..... | 189 |
| Tabelle 6-3: Berechnung des mittleren Feststoffaufkommens einer Verkehrsfläche mit 3.000 DTV und im Extremfall durch Frost beschädigte Fahrbahn und Belastung durch Pollen.....  | 190 |
|  |     |
| Tabelle 7-1: Änderungen des Feststoffaufkommens im Vergleich zur Referenzfläche durch Änderung verschiedener Parameter .....   | 194 |
|  |     |
| Tabelle A-1: Flächenanteile versiegelter Flächen im Frankfurter Raum [Kostis, 2012].....   | 225 |
| Tabelle A-2: Anteil der einzelnen an ein RKB angeschlossenen Flächen in Wuppertal-Cronenberg [Grüning et al. 2011] .....   | 226 |
| Tabelle A-3: Flächenbilanz verschiedener Wohngebietstypen (ohne unversiegelte Flächen) [Weeber und Rees, 1999] .....   | 227 |

## Abkürzungsverzeichnis

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| AFS                               | Abfiltrierbare Stoffe   |
| AFS <sub>fein</sub>               | Feine Abfiltrierbare Stoffe   |
| A <sub>E</sub>                    | Einzugsgebietsfläche  |
| A <sub>U</sub>                    | Undurchlässige Fläche   |
| ALKIS                             | Amtliches Liegenschaftskataster Informationssystem                            |
| Anteil <sub>PM63</sub>            | Anteil Feststoffe $\leq 63 \mu\text{m}$ im Staubniederschlag                  |
| Anteil <sub>PM63,Dachabrieb</sub> | Anteil Feststoffe $\leq 63 \mu\text{m}$ im Dachabrieb                         |
| Anteil <sub>PM63,Pollen</sub>     | Anteil Feststoffe $\leq 63 \mu\text{m}$ in Pollen                             |
| Anteil <sub>PM63,Verkehr</sub>    | Anteil Feststoffe $\leq 63 \mu\text{m}$ im Verkehrsabrieb                     |
| Anteil <sub>PM63,Winter</sub>     | Anteil Feststoffe $\leq 63 \mu\text{m}$ im winterbedingten Feststoffaufkommen |
| BaP                               | Benzo (a) pyren   |
| BBodSchV                          | Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung                                    |
| CSB                               | Chemisch-Biologischer Sauerstoffbedarf  |
| DOC                               | Gelöster (dissolved) organischer Kohlenstoff                                  |
| DTV                               | Durchschnittlich tägliche Verkehrsbelastung                                   |
| DWA                               | Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.           |
| f <sub>D</sub>                    | Anteil der Dächer mit Dachabrieb  |
| f <sub>Fläche</sub>               | Flächenfaktor, Anteil der Straßen, die gestreut werden                        |
| f <sub>FS</sub>                   | Anteil Feststoffe im Staubniederschlag:                                       |
| f <sub>H</sub>                    | Faktor für Dachhöhe   |
| f <sub>J</sub>                    | Jahreszeitfaktor  |
| f <sub>JF</sub>                   | Jahreszeitfaktor (Frühling)   |
| f <sub>JW</sub>                   | Jahreszeitfaktor (Winter)   |
| f <sub>RB</sub>                   | Faktor für die Art der Randbebauung   |
| f <sub>Ret</sub>                  | Faktor für Retention im Gully- und Kanalsystem                                |
| f <sub>Sp</sub>                   | Faktor für Anzahl der Fahrspuren  |
| f <sub>SR</sub>                   | Faktor für Straßenreinigung   |
| f <sub>Veg</sub>                  | Vegetationsfaktor   |
| f <sub>Verkehr</sub>              | Faktor für die Verkehrsart  |
| GEP                               | Generalentwässerungsplan  |
| GIS                               | Geoinformationssystem   |
| GUS                               | Gesamte ungelöste Stoffe  |
| h <sub>N</sub>                    | Jährliche Niederschlagshöhe [mm/a]  |
| MKW                               | Mineralölkohlenwasserstoffe   |

|                      |  |
|----------------------|--|
| n                    | Anzahl (Niederschlagsereignis, Felder etc.)  |
| NRW                  | Nordrhein-Westfalen  |
| PAK                  | Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe   |
| PCB                  | Polychlorierte Biphenyle   |
| PCDD/PCDF            | Polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und Dibenzofurane   |
| P <sub>ges</sub>     | Gesamtphosphor   |
| PM                   | Particulate Matter (partikuläre Stoffe)  |
| PM1                  | Feinstaub ≤ 1 µm   |
| PM2,5                | Feinstaub ≤ 2,5 µm   |
| PM10                 | Feinstaub ≤ 10 µm  |
| PM63                 | Feststoffe in Abflüssen > 0,45 µm und ≤ 63 µm  |
| PM63 <sub>LKW</sub>  | PM63-Abriebsprodukte durch Verkehr (LKW)   |
| PM63 <sub>PKW</sub>  | PM63-Abriebsprodukte durch Verkehr (PKW)   |
| PP                   | Parkplatz  |
| RBF                  | Retentionsbodenfilter  |
| RKB                  | Regenklärbecken  |
| S+G                  | Grobkorn > 63 µm (Sand und Kies)   |
| SN                   | Staubniederschlag  |
| SN <sub>Pollen</sub> | Staubniederschlag bedingt durch Pollen   |
| SS                   | Suspended sediment (Gesamtfeststoffe)  |
| TDS                  | Total Dissolved Solids (gesamte gelöste Stoffe)  |
| TR                   | Trockenrückstand (gesamte gelöste und partikuläre Stoffe)  |
| TS                   | Total Solids (gesamte gelöste und partikuläre Stoffe)  |
| TSS                  | Total Suspended Solids (gesamte suspendierte Stoffe)   |
| T+U                  | Feinkorn ≤ 63 µm (Ton und Schluff)   |
| TOC                  | Total Organic Carbon (gesamter organischer Kohlenstoff)  |
| TSP                  | Total Suspended Particles (Gesamtstaubniederschlag)  |
| WHO-TEQ              | Toxizitätsäquivalent, festgelegt durch die Weltgesundheitsorganisation mit dem die Gesamtgiftigkeit analysierter Stoffe einer Gruppe in einer Probe angegeben wird |
| ψ                    | Abflussbeiwert   |



# 1 Einleitung/Veranlassung

## Problemstellung

Niederschlagsabflüsse sind abhängig vom Standort, von der Nutzung im Einzugsgebiet und der verwendeten Materialien der Flächen, mit denen sie in Berührung kommen, unterschiedlich mit Schmutz- oder Schadstoffen belastet und können ein Gewässer erheblich belasten. Daher kann eine Behandlung dieser Abflüsse vor Einleiten in das Grundwasser oder ein Oberflächengewässer erforderlich sein. Die Vorgehensweise zur Behandlung ist bereits in einigen Technischen Blättern [BWK, 2004], [DWA, 2007], [FGSV, 2002 und 2005] oder Landesvorschriften [MUNLV, 2004], [IM/UM BW, 2008], [BSUG 2008a und b] geregelt.

Ein wichtiger Parameter zur Beschreibung von Niederschlagsabflüssen sind Feststoffe. Vor allem die feinere Fraktion kann hoch mit Schwermetallen, polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) oder weiteren organischen Schadstoffen beladen sein.

Die Parameter „AFS – abfiltrierbare Stoffe“ oder auch „AFS<sub>fein</sub> – feine abfiltrierbare Stoffe“ werden daher oft als Maß für die Verschmutzung von Niederschlagsabflüssen herangezogen. Auch im neuen, derzeit noch nicht veröffentlichten Arbeitsblatt der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall - DWA A 102 „Anforderungen an Niederschlagsbedingte Siedlungsabflüsse“ - wird erstmalig der Parameter AFS als maßgebliche Bewertungsgröße definiert [Schmitt, 2012].

Der Abtrag von Feststoffen in Niederschlagsabflüsse schwankt nicht nur von Einzugsgebiet zu Einzugsgebiet, sondern auch abhängig von den aktuellen Randbedingungen eines Einzugsgebietes beträchtlich. Für die Angabe des Jahresmittelwertes müssten möglichst viele Niederschlagsereignisse eines Jahres erfasst werden. Oft werden jedoch nur 20% aller Niederschlagsereignisse erfasst, in sehr ausführlichen Messprogrammen 60% oder maximal 80% [Grotehusmann et al., 2012]. Auch werden Probenahme, Probenaufbereitung, Analytik und Datenauswertung oftmals unterschiedlich durchgeführt. Die Interpretation der Ergebnisse von Messkampagnen liefert daher nur eingeschränkt verlässliche Informationen. Darüber hinaus gibt es über die Deposition von AFS<sub>fein</sub> auf Herkunftsflächen oder den AFS<sub>fein</sub>-Abtrag in Niederschlagsabflüsse bislang kaum Untersuchungen.

## Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist es daher, den Kenntnisstand bezüglich Herkunft, Verhalten und Verbleib, aber auch Zusammensetzung und Korngrößenverteilung von Feststoffen auf Siedlungsflächen darzustellen. Das Feststoffaufkommen, aber auch der Abtrag von Feststoffen in Niederschlagsabflüsse, hängen stark von der Art der Herkunftsfläche ab. Daher werden Dachflächen, Verkehrsflächen unterschiedlicher Verkehrsbelastung sowie Trenngebiete getrennt voneinander betrachtet.

Ein weiteres Ziel ist, anhand der Auswertung von Ergebnissen aus Studien und Messkampagnen Gleichungen für unterschiedliche Herkunftsflächen (Verkehrsflächen, Dachflächen, Trenngebiete) zu entwickeln, mit denen das flächenspezifische jährliche Aufkommen abfiltrierbarer Stoffe (AFS) und feiner Feststoffe (PM<sub>63</sub>) in [kg/(ha·a)] bzw. jeweils eine mittlere Jahreskonzentration in Niederschlagsabflüssen in [mg/l] abgeschätzt werden können.

### Vorgehensweise

Zunächst wird in Kapitel 2 der Kenntnisstand bezüglich Herkunft, Verhalten und Verbleib, aber auch Zusammensetzung und Korngrößenverteilung von Feststoffen auf Verkehrs- und Dachflächen dargestellt. Dazu wird eine Vielzahl von Literaturdaten gesichtet und ausgewertet. Ergänzt werden die Daten durch eigene Messungen in Dachabflüssen.

Da bisher wenige Kenntnisse über das PM<sub>63</sub>-Aufkommen und –Verhalten bestehen, werden auch zahlreiche Studien bezüglich des Staubbiederschlags, der im Korngrößenbereich bis maximal 200 µm vorliegt und einen Einfluss auf die Feststoffdeposition auf alle Flächentypen hat, berücksichtigt.

In Kapitel 3 werden die einzelnen Anteile, aus denen sich das Feststoffaufkommen auf einer Siedlungsfläche zusammensetzt, quantifiziert. Diese sind im Wesentlichen „Staubbiederschlag“, „verkehrsbedingter Abrieb“, „Dachabrieb“, „vegetationsbedingte Belastung“, „winterbedingtes Feststoffaufkommen“, „Bodenerosion“ und „Einträge durch Bau- und landwirtschaftliche Tätigkeiten“.

Zusätzlich zu den feststofferhöhenden Aspekten wie Verkehrsverhalten, DTV oder verstärkter Winterdienst werden feststoffmindernde Aspekte wie Straßenreinigung, Verwehungen oder Retention betrachtet, die mit Faktoren versehen werden.

Sämtliche Parameter und Faktoren werden schließlich in zwei Formeln (für Verkehrsflächen und für Dachflächen) zusammengefasst, mit denen die Abschätzung des AFS<sub>ges</sub>- und des PM<sub>63</sub>-Aufkommens möglich ist. Zur Ermittlung des Feststoffaufkommens in Trenngebieten werden typische Flächenanteile maßgeblicher Siedlungstypen vorgeschlagen. Für die Berechnung einer Feststoffkonzentration in Niederschlagsabflüssen werden Abflussbeiwerte je nach Flächenart ausgewertet.

Kapitel 4 befasst sich mit der Darstellung und Auswertung von Messprogrammen. Da die Güte oder Aussagekraft einer Studie von der Probendichte, der Art der Probenahme, der Analytik und von der Datenauswertung abhängt, werden zunächst mögliche Unterschiede oder auch Fehlerquellen zur Ermittlung von Feststoffen beschrieben und diskutiert.

Den Berechnungsgleichungen werden in Kapitel 5 je nach Herkunftsfläche Sensitivitätsanalysen unterzogen, um sensitive und weniger kritische Parameter zu identifizieren. Die Verifikation erfolgt mit Hilfe von gut beschriebenen Messkampagnen. Mit Hilfe der dargestellten Daten und weiterer allgemein zugänglichen Informationen z.B. bzgl. Flächenanteilen oder jährlichen Niederschlagshöhen werden Feststoffaufkommen und -konzentrationen berechnet und diese mit den gemessenen Werten verglichen.

In Kapitel 6 werden mit Hilfe der entwickelten Gleichungen einige spezielle Fragestellungen beleuchtet, wie hoch z.B. die Belastung eines Einzugsgebietes ist, welches als gerade nicht behandlungsbedürftig eingestuft wird und dessen Stoffaustrag somit noch tolerierbar ist. Daraus könnte dann eine Festlegung einer emissionsseitigen Anforderung für Niederschlagsabflüsse abgeleitet werden. Auch wird eine Abschätzung von Spitzenkonzentrationen unter besonderen (z.B. jahreszeitlichen) Belastungsbedingungen in einem Einzugsgebiet untersucht.

In Kapitel 7 schließlich werden die Ergebnisse diskutiert und offen gebliebene Fragestellungen beleuchtet, die Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein sollten.

*Zur besseren Übersicht sind zusammengefasste Sachverhalte am Ende eines größeren Teilkapitels farbig, in einem gelben Kasten, markiert.*

*Werte und Faktoren, die für die Gleichungen von Belang sind, sind in rosa Kästen zusammengefasst.*

*Die Formeln zur Abschätzung der Feststoffdeposition und einer Feststoffkonzentration im Niederschlagsabfluss sind jeweils in einem grauen Kasten hinterlegt.*



## 2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen, die zur Abschätzung des Feststoffaufkommens in Niederschlagsabflüssen erforderlich sind, zusammengestellt.

Einer Definition des Parameters „Feststoff“ folgt die Beschreibung der Herkunft der Feststoffe unterschieden nach Herkunftsfläche.

Feststoffe, die sich auf einer Fläche ablagern, müssen nicht unweigerlich in den Niederschlagsabfluss gelangen. Daher wird ein weiteres Kapitel dem Verhalten und Retentionsmöglichkeiten von Feststoffen beginnend beim Aufkommen, über den Abtrag und Eintrag in den Niederschlagsabfluss sowie dem Austrag aus einem Trenngebiet gewidmet.

Insbesondere die feine Fraktion der Feststoffe wird aufgrund der höheren Schadstoffbelastung und damit einhergehenden höheren Gewässerbelastung diskutiert. Daher wird der Kenntnisstand über die Korngrößenverteilung der Feststoffe im Niederschlagsabfluss getrennt nach deren Herkunft dargelegt.

Die negative Wirkung von Feststoffen in Gewässern hängt insbesondere von deren Zusammensetzung und (sorbierten) Inhaltsstoffen ab. Diese und die Wechselwirkung mit der Umwelt sind Inhalt weiterer Unterkapitel.

Schließlich werden Behandlungsmöglichkeiten und erforderliche Wirkungsgrade kurz dargestellt.

### 2.1 Definition „Abfiltrierbare Stoffe“

Als abfiltrierbare Stoffe (AFS) werden Sink-, Schweb- und Schwimmstoffe im Wasser oder Abwasser bezeichnet im Unterschied zu den gesamten Inhaltsstoffen, in denen neben den partikulären Stoffen auch gelöste enthalten sind. Diese können in der Summe als Trockenrückstand (TR) erfasst werden, vgl. Bild 2-1.

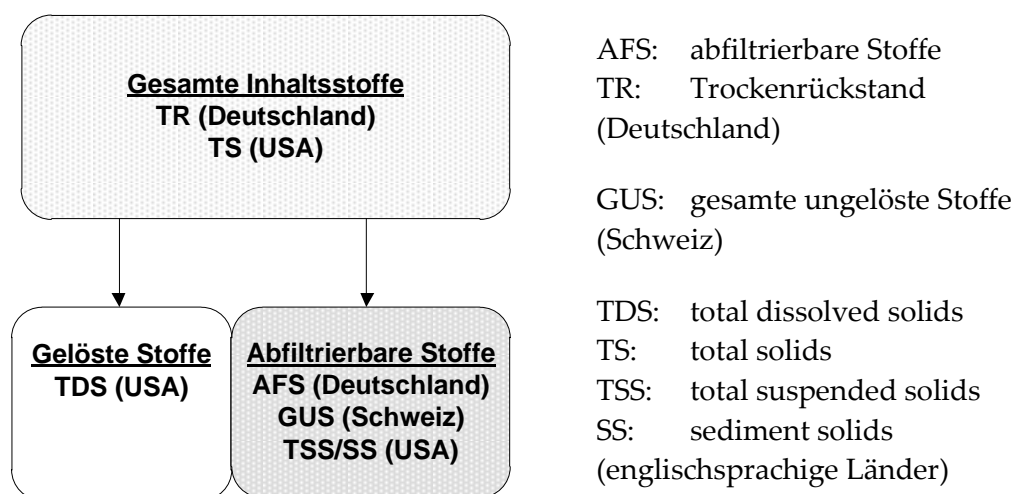


Bild 2-1: Bezeichnung von (Fest-)stoffen in Wassermedien

Im englischsprachigen Raum werden AFS als „total suspended solids“ (TSS) oder „sediment solids“ (SS) bezeichnet. Die gesamten Inhaltsstoffe werden „total solids“ (TS) und die gelösten Inhaltsstoffen „total dissolved solids“ (TDS) genannt.

In der Schweiz wird der Begriff „GUS“ (gesamte ungelöste Stoffe) anstelle des AFS verwendet.

## 2.2 Herkunft abfiltrierbarer Stoffe (AFS) in Niederschlagsabflüssen

Der AFS-Gehalt in Niederschlagsabflüssen ist nicht nur signifikant beeinflusst von den Randbedingungen eines Einzugsgebiets, sondern unterscheidet sich auch stark in Abhängigkeit von der Art der Herkunftsfläche und den dort typischen Belastungsquellen. Die Herkunft der AFS wird daher für die einzelnen Flächen bzw. Belastungsquellen getrennt dargestellt.

Die Belastungen aus dem Staubniederschlag sind für alle Flächenarten ähnlich, wobei die Aktivitäten in einem Einzugsgebiet, z.B. der Straßenverkehr oder Industriebetriebe, wiederum zu örtlich begrenzten Erhöhungen des Staubniederschlags führen können. Das nächste Kapitel widmet sich daher zunächst ausführlich dem Staubniederschlag.

Der Feinanteil der Feststoffe und einzelne Inhaltsstoffe aus den verschiedenen Belastungsquellen sind dabei besonders interessant und werden in diesem Kapitel bereits mit behandelt, sofern sie bekannt sind. Weitere Ausführungen dazu sind in den Kapiteln 2.4 und 2.5 enthalten.

### 2.2.1 Staubniederschlag

Staubniederschlag beeinflusst die Qualität von Niederschlagsabflüssen maßgeblich. Er besteht überwiegend aus vor Ort entstandenen Staubemissionen, die aufgrund der Größe der Staubpartikel schnell zu Boden sinken. Ein Teil des Staubniederschlags besteht allerdings auch aus Feinstaubpartikeln, die weit entfernt entstanden, durch Wind transportiert und aufgrund von Wachstumsprozessen in der Luft agglomeriert sind, bevor sie als Staubniederschlag zu Boden sinken. Die Zusammensetzung und die Entstehung von Fein- oder Schwebstaub werden daher zunächst beschrieben.

Der **Schweb- oder Feinstaub** als Bestandteil von Aerosolen besteht aus luftgetragenen, fein verteilten festen Partikeln mit einem Durchmesser kleiner als ca. 60 µm, meistens kleiner als 30 µm, die nicht sofort zu Boden sinken. Daneben existieren fein verteilte flüssige Partikel (Nebel) [BfVBS, 2012], wie in Bild 2-2 dargestellt ist.

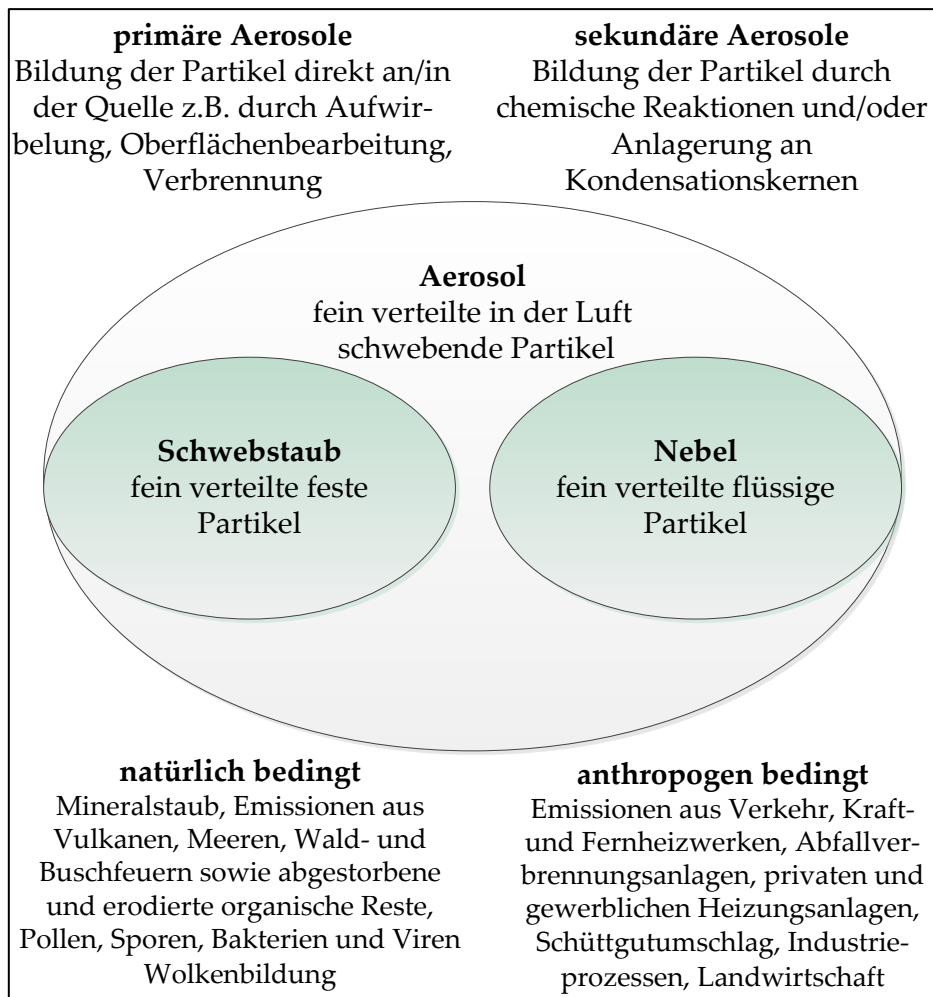


Bild 2-2: Aerosole, verändert nach [BfVBS, 2012]

Als **primäre Aerosole** werden Partikel bezeichnet, die direkt an der Quelle entstehen, z.B. durch Aufwirbelung von Böden oder Pflanzenbestandteilen, bei der Oberflächenbearbeitung oder der Verbrennung.

Mineralstaubpartikel sind dabei hinsichtlich der Masse die wichtigste Komponente des Aerosols. Sie machen über 50% der globalen Produktion troposphärischen Aerosols, hauptsächlich aus Wüstenregionen, aus [BfVBS, 2012], in Deutschland etwa ein Drittel [Möller, 2009]. Aufgrund ihrer mineralischen Zusammensetzung und ihrer Größe sind diese Partikel nicht unmittelbar gesundheitsgefährdend [BfVBS, 2012]. Sie zählen wie auch Emissionen aus Vulkanen, Meeren, Wald- und Buschfeuern sowie abgestorbene und erodierte organische Reste, Pollen, Sporen, Bakterien und Viren zu den **natürlich bedingten Emissionen**.

Wichtige **anthropogene Quellen** sind der Verkehr (Verbrennungsrückstände aus Motoren, Bremsen- und Reifenabrieb sowie aufgewirbelter Staub von Straßenoberflächen), Kraft- und Fernheizwerke, Abfallverbrennungsanlagen, private und gewerbliche Heizungsanlagen, der Schüttgutumschlag sowie bestimmte Industrieprozesse wie die Metall-, besonders die Stahlerzeugung sowie die Steine- und Erdenindustrie. Aus der Landwirtschaft tragen Staub erzeugende Tätigkeiten bei der Feldbearbeitung zu der primären Belastung bei [UBA, 2009].

**Sekundäre Aerosole** können im Gegensatz zu den primären Aerosolen durch chemische Reaktionen aus gasförmigen Vorläuferstoffen wie Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ) oder volatilen organischen Verbindungen (VOC), die hauptsächlich anthropogenen Ursprungs sind, gebildet werden. Es entstehen flüssige Partikel wie Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ ) oder auch organische Aerosole. Ein Teil wird auch aus natürlichen Kohlenwasserstoffen wie Monoterpenen ( $\text{C}_{10}\text{H}_{16}$ ) und Isopren ( $\text{C}_5\text{H}_8$ ) gebildet, die von Bäumen und anderen Pflanzen ausgedünstet werden [Müller, o.J.]. An definierten Einzelstoffen sekundärer Aerosole dominiert Ammoniumsulfat ( $\text{NH}_4$ ) $_2\text{SO}_4$  [Möller, 2009].

Ganz grob gilt nach [Möller, 2009] eine 1/3-Aufteilung des gesamten Feinstaubes in

- unlösliche anorganische Bestandteile (Bodenstaub),
- wasserlösliche anorganisch-ionische Bestandteile und
- organischen und elementaren Kohlenstoff.

**Aerosole in der Atmosphäre unterliegen** ständigen **Änderungen** durch Kondensation von Dämpfen an bereits vorhandenen Partikeln, Verdampfen flüssiger Bestandteile der Partikel, Koagulation kleiner Teilchen zu/an großen, Fragmentierung oder Anlagerung von Partikeln an umgebenden Oberflächen [BfVBS, 2012].

Mehrere Spurengasmoleküle können sich z.B. zu Teilchen verbinden oder die Moleküle kondensieren an bereits vorhandenen Partikeln (Nukleation). Bei der Nukleation entstehen zunächst sehr kleine Partikel im Nano-Bereich, die aber schnell durch Zusammentreffen mit weiteren Aerosolpartikeln anwachsen können (Koagulation).

Abhängig von vielen Randbedingungen, unter anderem vom Gehalt an primären Aerosolen in der Luft wie Ruß und Niederschlag, existiert folgender Wachstumsprozess: Kleinste Partikel entstehen durch Gas-Partikel-Konversion und wachsen durch Anlagerung und Sublimation/Kondensation von Gasen und Wasserdampf zuerst relativ langsam und nach Erreichen von 0,05 bis 0,1  $\mu\text{m}$  Durchmesser zunehmend schneller an, bis sie durch trockene oder nasse Deposition als Staubbiederschlag aus der Atmosphäre entfernt werden, siehe Bild 2-3.



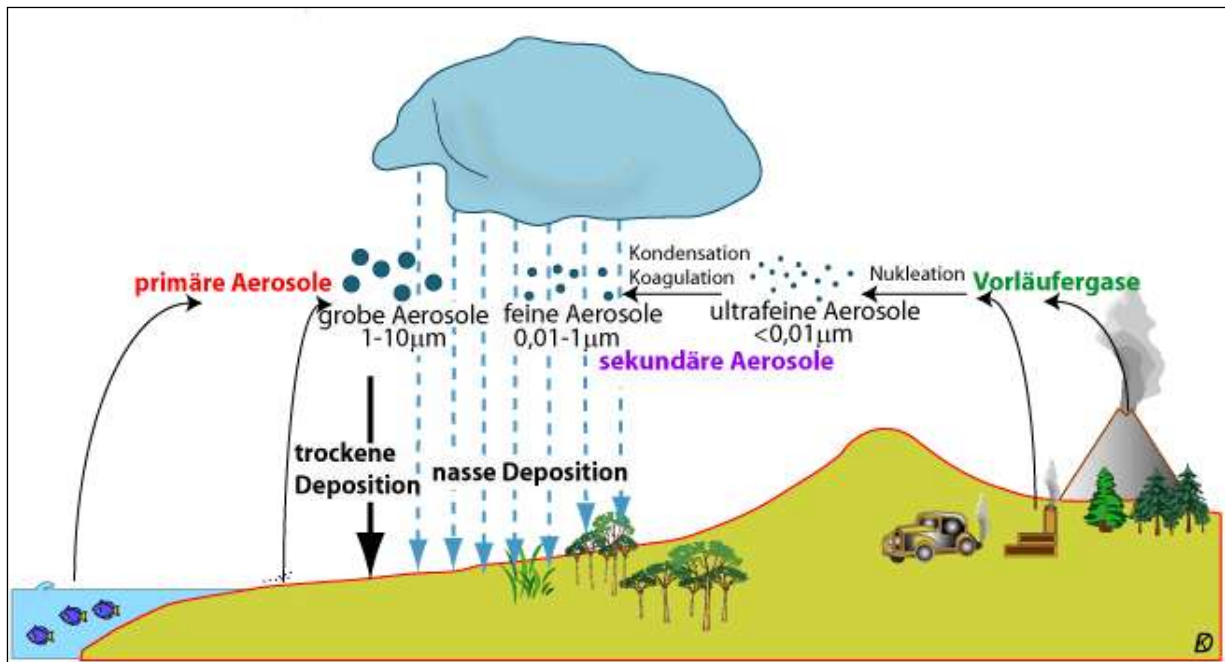


Bild 2-3: Prozesse der Entstehung, Umwandlung und Entfernung von Aerosolen aus der Atmosphäre [BBS, 2011]

In Bild 2-4 sind die Größenbereiche und Bezeichnungen für Aerosole in der Atmosphäre bis  $10\mu\text{m}$  dargestellt. Problematisch für die menschliche Gesundheit sind vor allem feinere Partikel unterhalb einer Korngröße von  $<10\mu\text{m}$ , besonders  $<2,5\mu\text{m}$  und  $<1\mu\text{m}$ , da diese kleinen Partikel die kleineren Bronchien und Lungenbläschen im menschlichen Organismus erreichen und in der Folge Herz- und Kreislaufprobleme verursachen können [UBA, 2009].

Für die Beurteilung einer Feststoffdeposition auf Flächen oder der AFS-Belastung von Niederschlagsabflüssen ist die Angabe des Fein- oder Schwebstaubs nicht geeignet, da (Fein-)stäube nur zum geringen Teil (0 bis 50 %) mit dem Niederschlag aus der Luft gewaschen werden [Ahrens et al., 2007], [Gehrig et al., 2003], [Schulze, 2002].

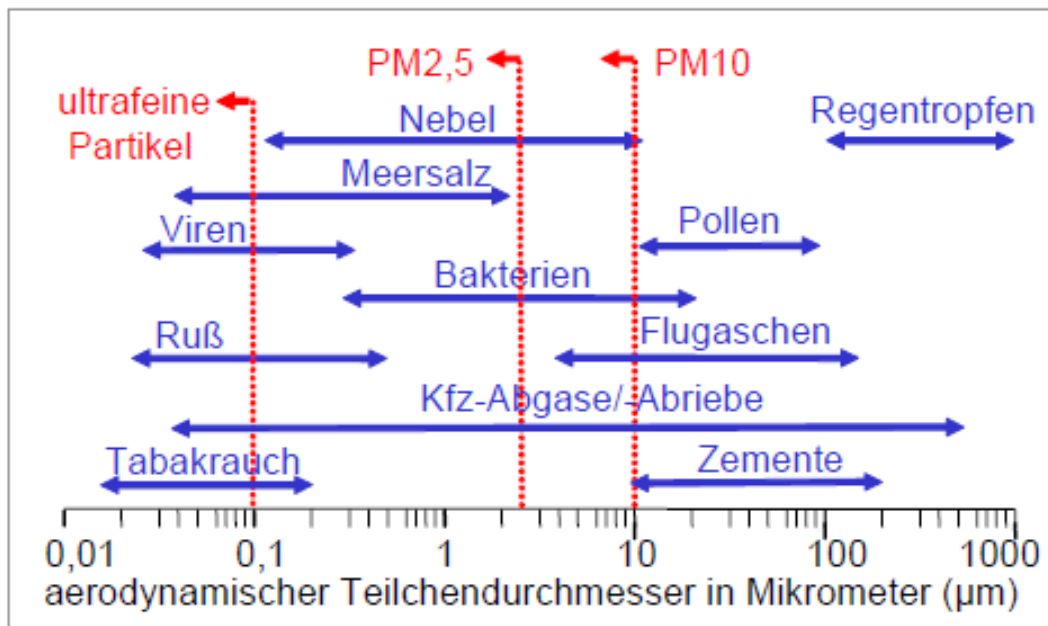


Bild 2-4: Größenbereiche von Partikeln in der Atmosphäre, aus [HLUG, o.J.]; PM = particulate matter

Die trockene und nasse Deposition ist als Beurteilungsgrundlage für den Gesamtgehalt der Feststoffe in Niederschlagsabflüssen zielführender. Sie wird als **Staubniederschlag** in  $[\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})]$  oder  $[\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})]$  angegeben und in Deutschland ebenfalls flächendeckend gemessen.

Staubniederschläge können im sogenannten Bergerhoff-Sammelgefäß oder in Bulk-Sammlern gesammelt und nach VDI-Richtlinie 4320-1 [VDI, 2010] oder VDI-Richtlinie 4320-2 [VDI, 2012] bestimmt werden. Die Aufstellhöhe beider Gefäße beträgt 1 bis 2 m. Dadurch soll der Eintrag von resuspendiertem Material, das nicht zur atmosphärischen Deposition gehört, verhindert werden [VDI, 2012]. Vogelabweisvorrichtungen schützen vor Verunreinigungen, siehe Bild 2-5.

Das bulk-Sammelgefäß erfasst im Prinzip die gleichen Stoffe wie das Bergerhoff-Sammelgefäß. Es erlaubt allerdings, die Proben zu kühlen bzw. zu beheizen, um die Probentemperatur in der Sammelflasche annähernd unabhängig von der Außentemperatur auf 5 bis 8 °C zu halten [LfU, 2012b]. Auch sind die Witterungsanfälligkeit (Verdunstung, Austrocknung, Auswehung) sowie mögliche Verschmutzungen wesentlich geringer als im Bergerhoff-Sammelgefäß.

Bei beiden Methoden werden die Stäube und Niederschläge während eines Monats (30 Tage  $\pm$  2) gesammelt, anschließend eingedampft und gewogen. Fremdkörper werden vor der Massenbestimmung entfernt. Somit werden sowohl partikuläre Stoffe (mit einer Größe von 1 bis 200  $\mu\text{m}$ ) als auch die gelösten Inhaltsstoffe des Regens erfasst. Aus der Masse der Proben wird die Staubniederschlagsmenge in Gramm oder Milligramm pro  $\text{m}^2$  und Tag,  $(\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d}))$  bzw.  $(\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d}))$  berechnet. Die Bestimmungsgrenze liegt bei etwa  $4 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$  [VDI, 2012].



Bild 2-5: Bergerhoff-Sammelgefäß zur Staubniederschlagsmessung [LfU, 2012a]

Die monatlichen Proben können zu Jahressammelproben zusammengefasst werden, aus denen dann auch Inhaltsstoffe wie z. B. Arsen, Blei, Kadmium und Nickel nach einem Säureaufschluss bestimmt werden können.

Staubniederschläge gelten nicht direkt als gesundheitsgefährdend. Der dauerhafte Eintrag von Luftschadstoffen kann jedoch zu schädlichen Bodenveränderungen oder zu Gewässerverunreinigungen führen. Außerdem gefährden Staubniederschlag und seine Inhaltsstoffe indirekt die Gesundheit, wenn beaufschlagte Gemüse, Früchte oder Futtermittel verzehrt werden [LANUV, 2009a].

In der TA Luft sind deshalb Immissionswerte für Staubniederschlag (Schutz vor erheblichen Belästigungen oder erheblichen Nachteilen) und für Schwermetalle im Staubniederschlag (Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch die Deposition) festgelegt [BUNR, 2002], vgl. Tabelle 2-1.

Rechtlich nicht fixierte Orientierungswerte für organische Schadstoffe im Staubniederschlag empfiehlt darüber hinaus der Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI) ( $4 \text{ pg WHO-TEQ}^1/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ) für die Summe an polychlorierten Biphenylen (PCB), polychlorierten Dibenzop-dioxinen und Dibenzofuranen (PCDD/PCDF)). Diese Werte wurden abgeleitet aus Bodenschutzmaßnahmen für Anbauflächen mit landwirtschaftlich-gärtnerischer Nutzung [LAI, 2004].

---

<sup>1</sup> WHO-TEQ: Toxizitätsäquivalent, festgelegt durch die Weltgesundheitsorganisation, mit dem die Gesamtgiftigkeit analysierter Stoffe einer Gruppe in einer Probe angegeben wird.

Tabelle 2-1: Immissionswerte für Staubbiederschlag und Inhaltsstoffe nach TA Luft [BUNR, 2002]

| Komponente               | Immissionswert             |
|--------------------------|----------------------------|
| <b>Staubbiederschlag</b> | 350 mg/(m <sup>2</sup> ·d) |
| <b>Blei</b>              | 100 µg/(m <sup>2</sup> ·d) |
| <b>Kadmium</b>           | 2 µg/(m <sup>2</sup> ·d)   |
| <b>Arsen</b>             | 4 µg/(m <sup>2</sup> ·d)   |
| <b>Nickel</b>            | 15 µg/(m <sup>2</sup> ·d)  |
| <b>Thallium</b>          | 2 µg/(m <sup>2</sup> ·d)   |
| <b>Quecksilber</b>       | 1 µg/(m <sup>2</sup> ·d)   |

Erfreulich ist, dass neben den absoluten Staubbiederschlagsmengen auch der Anteil an Schadstoffen im Staubbiederschlag stark gesunken ist. Der Index für Blei und Kadmium im Staubbiederschlag ging z.B. an drei Messstationen in ländlicher Lage in NRW 2009 verglichen mit dem Bezugsjahr 1986 auf etwa ein Viertel des Ausgangswertes zurück [LANUV, 2009b].

*Als **Fein- oder Schwebstaub** werden kleine Partikel in der Luft bis etwa 60 µm bezeichnet, die nicht sofort zu Boden sinken. Üblicherweise werden Partikel bis 10 µm (PM10), bis 2,5 µm (PM2,5) oder bis 1 µm (PM1) gemessen. Nur ein geringer Teil dieser Feinpartikel wird durch Niederschläge aus der Luft ausgewaschen. Die Feinpartikel können jedoch durch verschiedene Prozesse zusammenwachsen und dann als Staubbiederschlag absinken.*

*Im **Staubbiederschlag** (nasse und trockene Deposition) werden vor allem Staubbpartikel mit einer **Größe von 10 bis 100 µm** Korndurchmesser, maximal 200 µm, in einer Höhe von 1 bis 2 m erfasst. Durch die Messung des Trockenrückstands werden **auch gelöste Stoffe** mit erfasst.*

*Partikel < 1 µm sedimentieren nicht, sie verbleiben als Suspension in der Luft [Gruber, 1981]. Größere Partikel mit einem Korndurchmesser von > 50 µm sinken verhältnismäßig schnell zu Boden, so dass sie in der Luft nur wenige hundert Meter weit transportiert werden [LANUV, 2009a]. Das heißt, dass **größere Partikel** überwiegend **am Ort des Entstehens** zu finden sind, während **feine Partikel** durch Wind oder auch verkehrsbedingte Turbulenzen **als Feinstaub weit verteilt** werden.*

*Der **Schadstoffgehalt des Staubbiederschlags** gibt meist die **Aktivitäten (Industrie, Verkehr...)** im Einzugsgebiet wieder.*



## 2.2.2 Verkehrsbedingte Emissionen

Über den Verkehr werden unterschiedliche Belastungen in die Straßenabflüsse eingetragen. Dies sind Verbrennungsprodukte (Ruß), aber auch Fahrbahn-, Reifen- und Bremsabrieb, Korrosionsprodukte von Fahrzeugen sowie der Eintrag von Stoffen zur Unterhaltung der Straße und Erhaltung der Verkehrssicherheit.

An einer Außerortsstraße in Deutschland wurden z.B. ausgehend von Inhaltsstoffanalysen 50 % motorisch bedingter Emissionen, 30 % Fahrbahnabrieb, 20 % Reifenabrieb und weniger als 1 % Bremsabrieb abgeschätzt [Düring et al., 2004], zitiert in [BAST, 2008].

Ruß entsteht durch unvollständige Verbrennungsprozesse und besteht zu 80 bis 99,5 % aus Kohlenstoff. Ruß gilt als krebserregend [IARC und NORA, 2009]. Aufgrund der geringen Größe der Teilchen liefert er insbesondere einen Beitrag zum Feinstaub. Im Feinstaub an einem Ort mit hohem Verkehrsaufkommen in Dresden wurden z.B. weniger als 2% Ruß im Korngrößenbereich von 10 µm gefunden, aber 40% im Korngrößenbereich von < 0,1 µm [Gerwig, 2005]. Die kleinsten, meist kugelförmigen Primärteilchen weisen eine Größe von 0,01 bis 0,3 µm auf und wachsen zu kettenförmigen, teilweise klumpenartigen Aggregaten zusammen. Durch Anlagerung bilden sich Agglomerate bis maximal etwa 15 µm. In Bild 2-6 ist ein Dieseldieserußagglomerat umgeben von etlichen viel kleineren Rußpartikeln dargestellt.

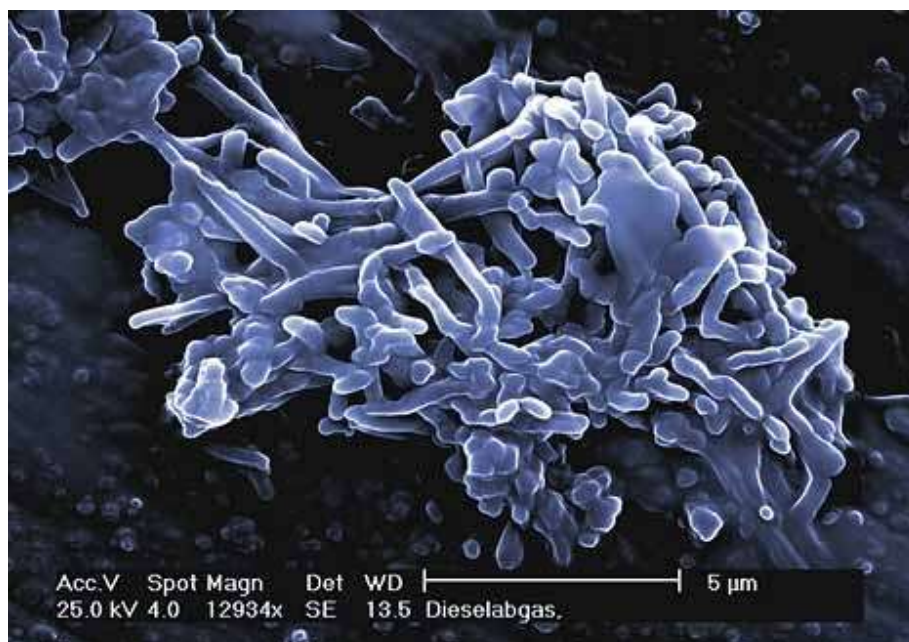


Bild 2-6: Dieseldieserußagglomerat umgeben von einzelnen Rußpartikeln [Ebert, 2009]

Der **Fahrbahnabrieb** ist sehr variabel und hängt von vielen Faktoren im Einzugsgebiet ab (Zustand der Straße, Fahrzeugbelastung etc.). Entsprechend des eingesetzten Materials (im wesentlichen Beton oder Asphalt) sind dessen Inhaltsstoffe enthalten. Neben unbedenklichen Stoffen wie Silizium, Calcium oder Magnesium sind vor allem die Schwermetalle Chrom, Nickel, Blei oder Zink zu nennen, vgl. auch Kap.

2.5.2. Ein Zusammenhang zwischen der Art des Fahrbahnbelags (Beton oder Asphalt) mit dem Feststoffaufkommen in Verkehrsflächenabflüssen konnte nicht hergestellt werden [Barrett et al., 1995]. Beim Fahrbahnabrieb ist mit einem gewichtsmäßig hohen Anteil an größeren Anteilen  $\gg 63 \mu\text{m}$  Korngröße zu rechnen.

**Reifenabrieb** hängt ebenso wie der Fahrbahnabrieb von der Fahrbahnstruktur ab [ASTRA, 2009], aber auch vom Fahrverhalten und der Verkehrssituation. Im Reifenabrieb ( $< 10$  bis mehrere  $100 \mu\text{m}$  [BAST, 2008], [ASTRA, 2009]) sind neben einer Reihe schwer abbaubarer organischer Stoffe insbesondere Zink und Cadmium enthalten. [Charlesworth und Lees, 1999] fanden  $17,9 \text{ mg/kg}$  Cadmium,  $16,2 \text{ mg/kg}$  Kupfer und  $12.470 \text{ mg/kg}$  Zink in einer Reifenprobe. Kautschuk macht im Schnitt 40 Prozent der Lauffläche aus. Um die Eigenschaften des Gummis zu verbessern, werden Additive hinzu gemischt, etwa Schwefel als Vernetzer und Zinkoxid als Vulkanisations-Aktivatoren sowie verschiedene Öle als Weichmacher. PAK als Weichmacher werden vermutlich nur noch in fernöstlichen Billig-Produktionsstätten eingesetzt [Görisch, 2012]. Eine erst in letzter Zeit diskutierte Stoffgruppe sind die Benzothiazole, die als Zusatzstoff bei der Gummierstellung (z.B. Vulkanisationsbeschleuniger bei Reifen) eingesetzt werden [Welker, 2013]. Um den Rollwiderstand zu minimieren wird Kieselsäure hinzugefügt. Ruß bis zu einem Anteil von maximal zwei Prozent wird als Farbstoff zugesetzt [Görisch, 2012].

Der **Bremsabrieb** wird überwiegend dem Feinstaub PM 2,5 bis 10 zugeschrieben [BAST, 2008], [Gerwig, 2005], [Nielsen et al., 2003]. Ein Teil der abgeriebenen Partikel gelangt jedoch nicht in den luftgetragenen Zustand, sondern verbleibt im Inneren der Bremse bzw. scheidet sich an Fahrzeug-Bauteilen ab. Auf diese Weise gebildete Agglomerate können schließlich auf der Straße deponiert werden [BAST, 2008]. So identifizierten [Trimbacher u. Neinavaie, 2002] und das [UBA, 2006] Bremsabrieb in Staubniederschlagsproben als blättrige, unregelmäßige Kornaggregate aus Graphit, metallischem Eisen, Messing, Kupfer und Silikaten im Korngrößenbereich  $50$  bis  $150 \mu\text{m}$ . Bremsabrieb enthält darüber hinaus die Schwermetalle Nickel, Chrom und Kupfer [Gerwig, 2005], aber auch Antimontrisulfid, das beim Bremsen in das als krebserregend eingestufte Antimontrioxid umgewandelt werden kann [Weckwert, 2002].

In Bild 2-7 sind zur Veranschaulichung zwei spindelförmige Kornaggregate dargestellt, die als **Abriebsprodukt aus dem Verkehr** in der stark belasteten Straße „Don Bosco“ in Graz identifiziert wurden.

Da die Feststoffbelastung in Verkehrsflächenabflüssen ihre Ursache u.a. von aus dem Verkehr stammenden Abriebs- und Verbrennungsprodukten hat, liegt eine **Korrelation von Feststoffbelastung in Niederschlagsabflüssen und der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV)** einer Verkehrsfläche nahe. In einigen Studien jedoch konnte dieser Zusammenhang nicht hergestellt werden [Herrera, 2007]. Auch [Striebel und Gruber, 1997] fanden keinen signifikanten Zusammenhang zwischen Schwermetallbelastung im Straßenstaub und der DTV.

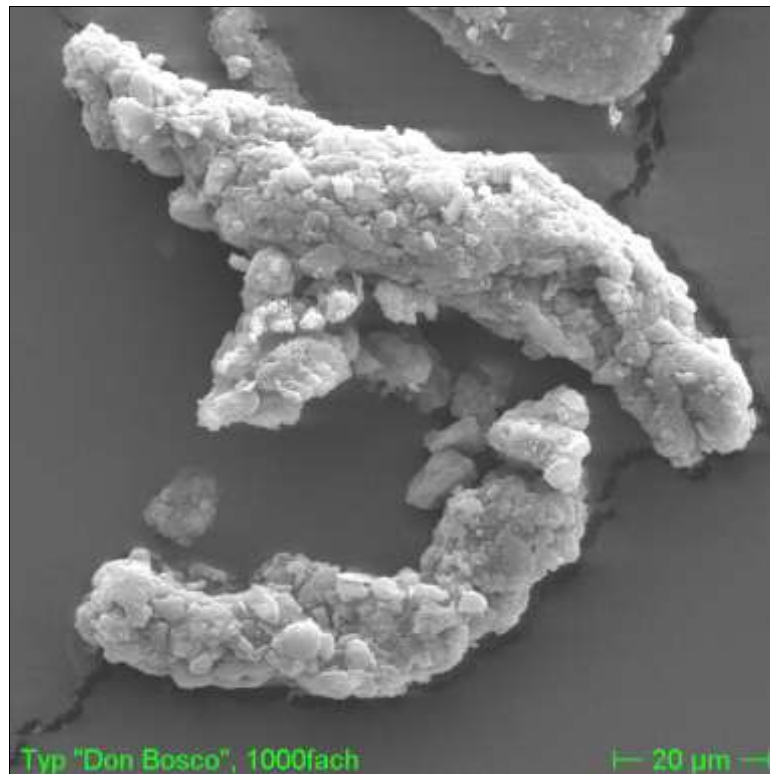


Bild 2-7: Abriebprodukt Verkehr; zwei spindelförmige Kornaggregate [Trimbacher u. Neinavaie, 2002]

Andere Studien wiederum fanden Zusammenhänge zwischen dem Abtrag von Feststoffen und der DTV. Dies konnte [Helmreich, 2012] anhand von Zink in den Ban- ketten für Straßen bis 80.000 DTV zeigen, siehe Bild 2-8.

[Drapper et al., 2000] fanden eine leichte Korrelation zwischen Feststoffen in Stra- ßenabflüssen und DTV für australische Straßen. Auch [Mar et al., 1982] konnten eine leichte Korrelation zwischen AFS in Niederschlagsabflüssen und DTV bei Vergleich- barkeit der Randbedingungen wie Breite der Standspuren oder der Fahrgeschwin- digkeit auf US-Highways feststellen. Unter Berücksichtigung gleicher Randbedin- gungen nach Auswertung einer umfänglichen, vier Jahre dauernden, Studie an 83 Highways in den USA fanden [Kayhanian et al., 2003] einen signifikanten Einfluss der DTV auf die Verschmutzung der Highwayabflüsse.

Der Grund, dass Zusammenhänge oftmals nicht hergestellt werden können, liegt darin, dass andere Einflussfaktoren den Abtrag von Feststoffen überprägen, vgl. Kap. 2.3.2. So identifizierten [Kayhanian et al., 2003] neben der DTV die Größe des Einzugsgebiets, die Flächennutzung, die Dauer der vorangegangene Trockenperiode, saisonal bedingter häufiger Niederschlag, die Niederschlagsmenge eines Ereignisses und die maximale Regenintensität als signifikante Einflussfaktoren auf die Nieder- schlagsabflusskonzentration. Dies zeigen auch die z.T. festgestellten Unterschiede der Gesamtjahresmittelwerte an einem Standort, wie z.B. aus der Untersuchung von [Nadler und Meißner, 2008] während einer neunjährigen Messkampagne. Hier schwankten die AFS<sub>ges</sub>-Jahresmittelwerte von etwa 60 bis 460 mg/l, ohne dass sich die

Verkehrsaktivitäten signifikant geändert hätten. Hier sind vermutlich jahreszeitlich und örtlich bedingte Feststoffspitzen verantwortlich für die enormen Spannweiten.

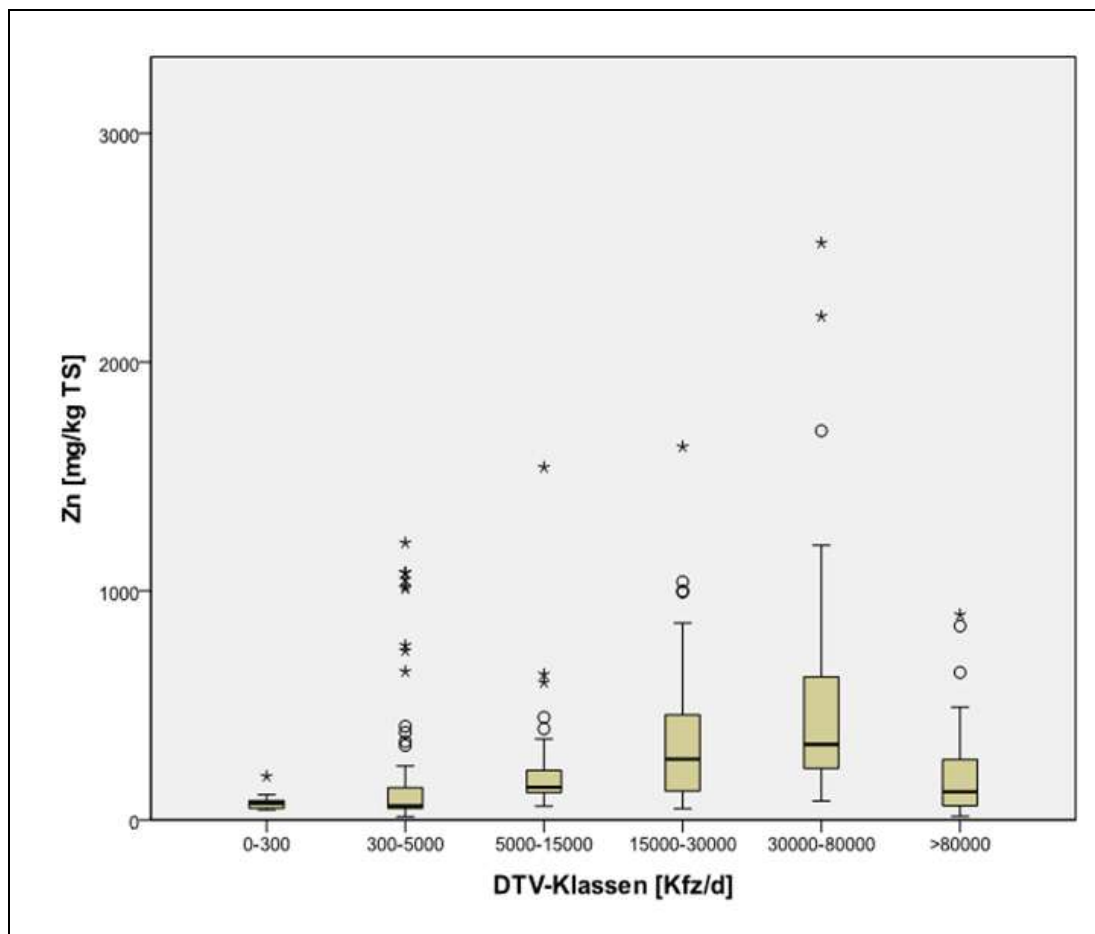


Bild 2-8: Zink im angrenzenden Boden von Verkehrsflächen in Abhängigkeit von der DTV [Helmreich, 2012]

Feststoffmessungen in Schneeproben entlang einer Autobahn in Norwegen bei Oslo an vier unterschiedlichen Messstellen mit unterschiedlicher Verkehrsdichte, die einen Zeitraum von vier Monaten abbildeten [Lygren et al., 1984], ergaben einen deutlichen Zusammenhang zwischen Feststoffakkumulation und DTV-Belastung, siehe Bild 2-9. Einflüsse aus Verwehungen sind hier durch den Schneefall abgemindert. Die Akkumulation der gemessenen partikelgebundenen Schadstoffe ergab ein ähnliches Bild. Die im Vergleich zu anderen Studien sehr hohen Werte sind mit der Aufsummierung der Feststoffe während der vier Monate zu begründen.

[Kocher, 2011] ermittelte die Zinkkonzentration in bis zu 10 cm Tiefe in 0 m bis 2 m Entfernung vom Fahrbahnrand und konnte auch hier einen leichten Zusammenhang zwischen Zinkkonzentration im Boden und DTV feststellen, vgl. Bild 2-10.



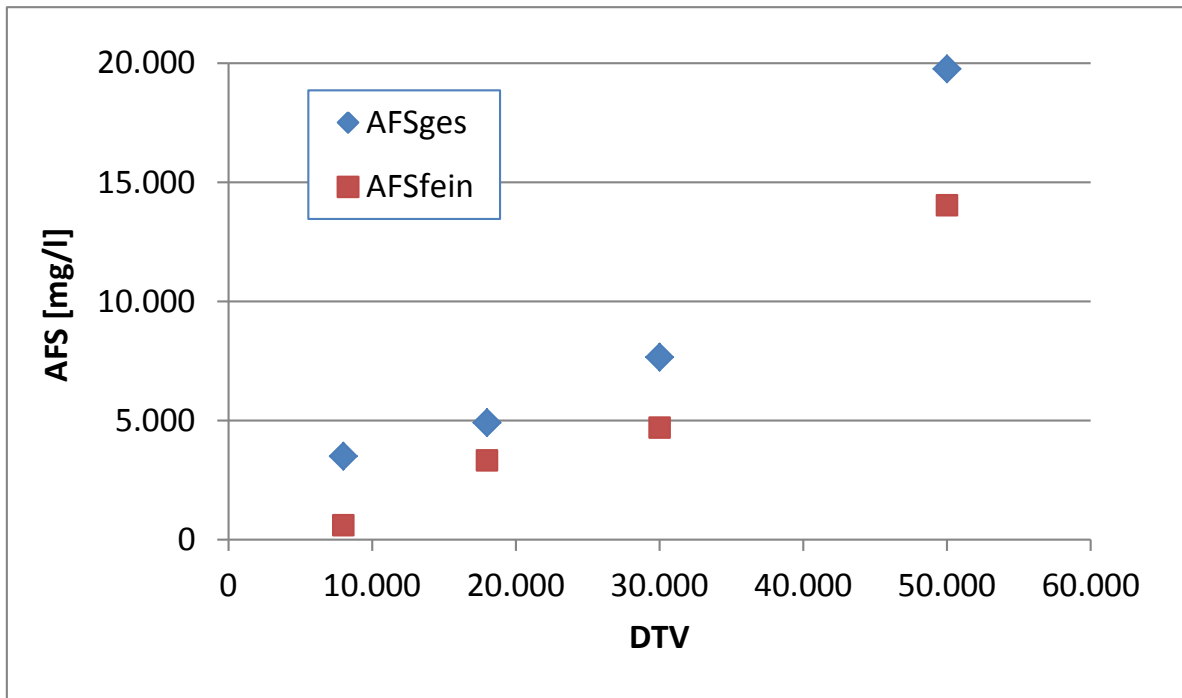


Bild 2-9: AFS in Schneeproben entlang einer Autobahn in Norwegen in der Abhängigkeit von der DTV, Daten aus [Lygren et al., 1984]. AFS<sub>fein</sub>: Sinkgeschwindigkeit < 8,5 cm/min

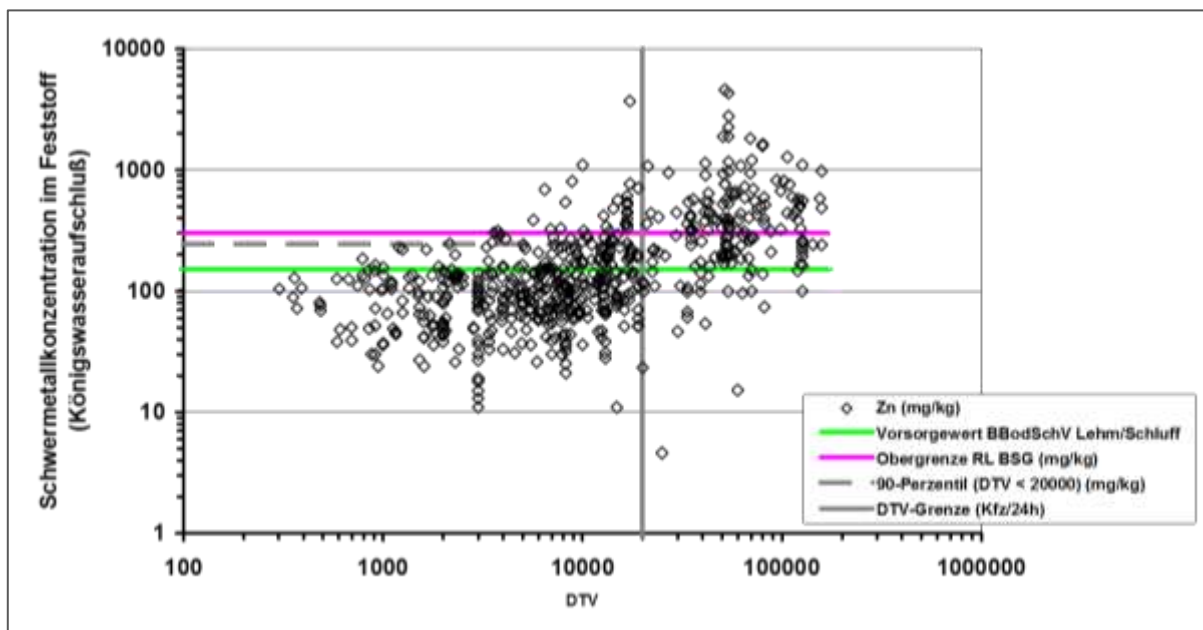


Bild 2-10: Zinkkonzentration [mg/kg] in den Fahrbahnrand angrenzenden Oberboden in Abhängigkeit von der DTV [Kocher, 2011]

Der Anfall von Abriebsprodukten ist neben der DTV auch von der **Verkehrssituation** und dem **Fahrverhalten** abhängig. In Bild 2-11 ist der Zinkgehalt (welches in Straßenabflüssen i.d.R vorwiegend partikulär vorliegt [Herrera, 2007], [Kocher und Wessolek, 2003] u.a.) im angrenzenden Boden von Straßen in Abhängigkeit von ge-

wählten Fahrweise bzw. der Nutzung dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass ein Stop-und-Go-Fahren sowie die Situation vor einer Ampel im Mittel zu höheren Gehalten führt [Helmreich, 2012].

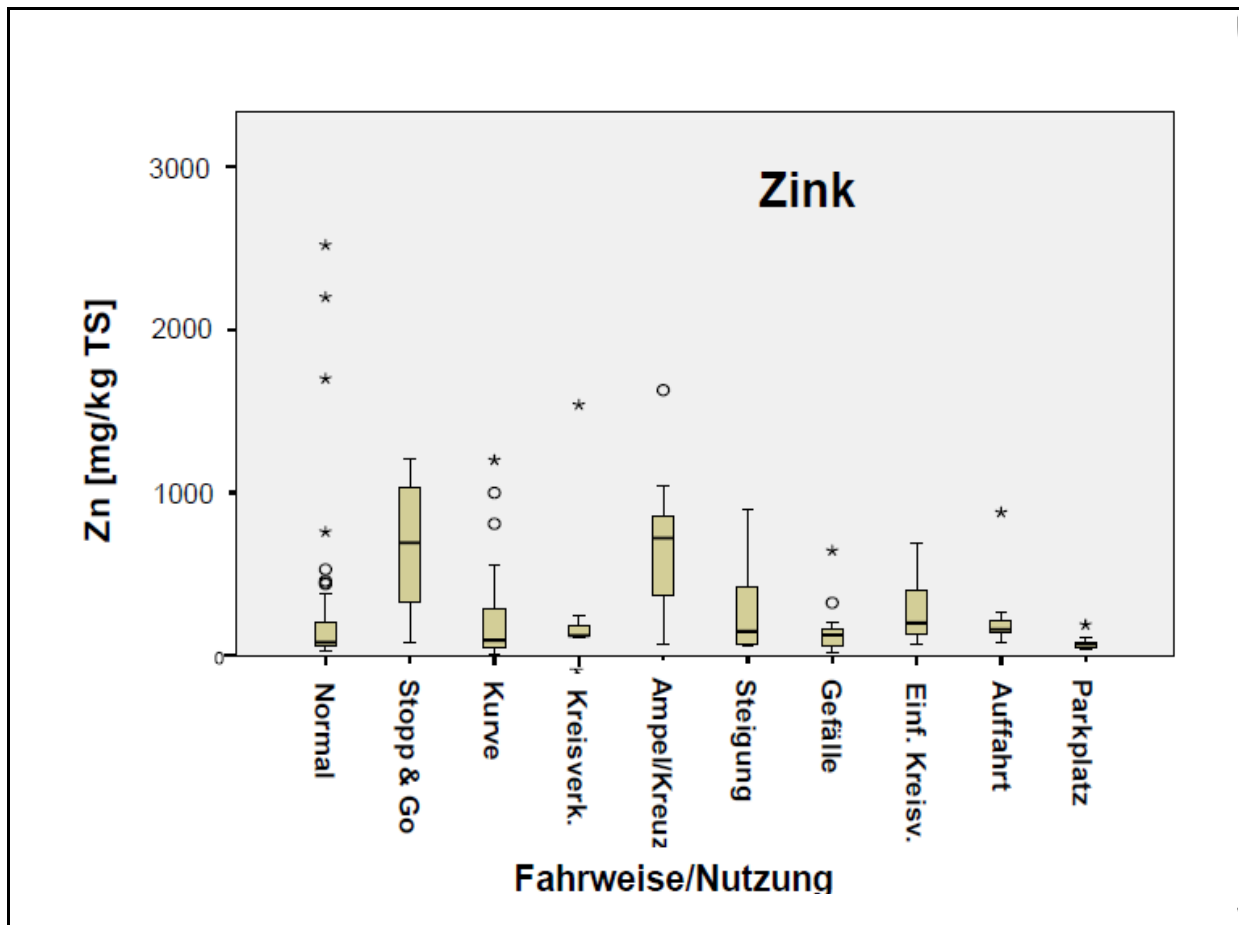


Bild 2-11: Zink im angrenzenden Boden von Verkehrsflächen in Abhängigkeit von der Fahrweiseklasse [Helmreich, 2012]

**Korrosionsprodukte** von Fahrzeugen und von baulichen Anlagen sind ebenfalls im Niederschlagsabfluss von Verkehrsflächen enthalten [Helmreich et al., 2005], [Kaufmann, 2006] und führen insbesondere zu einer Erhöhung des Eisengehalts [Herrera, 2007].

Im Winter kommt u.U. die **Belastung aus einer frostbedingten Fahrbahnzerstörung**, siehe Bild 2-12, sowie der **Salz- oder Splitstreuung** hinzu.

Die Splitstreuung führt besonders zu einer Erhöhung der groben Feststoffe, die oftmals nach Beendigung der Frostperiode wieder entfernt werden. Bei der Salzstreuung stellt nicht das lösliche Salz die Belastung an Feststoffen im Niederschlagsabfluss dar, sondern die dadurch bedingte verstärkte Zerstörung der Fahrbahndecke, siehe auch Bild 2-13.



Bild 2-12: Fahrbahnzerstörung nach dem Winter, Foto: [Markert, 2012]



Bild 2-13: Dokumentation von „Salzflecken“ und die Auswaschung von Feinpartikeln aus dem Fahrbahnmaterial als Folge der Salzstreuung [Lambert, 2010]

Streusalz (zumeist Natriumchlorid) führt zudem zu einer Dispergierung von agglomerierten Feststoffen in die Primärteilchen  $< 2 \mu\text{m}$  [Huwe, 2011], so dass die Korngrößenverteilung im Niederschlagsabfluss in Richtung „fein“ verschoben wird. [Hilliges, 2007] stellte während der Streusalzphase eine deutlich schlechtere Absetzbarkeit der Feststoffe in Verkehrsflächenabflüssen fest. Auch [Grotehusmann et al., 2013] fanden im Überstand von natriumhaltigen Autobahnabflüssen (Na ca. 500 mg/l) das 2,5fache an Feststoffen im Vergleich zu natriumarmen Autobahnabflüssen (10 mg/l). Normalerweise überwiegend partikulär vorliegendes Zink kann infolge der Streusalzanwendung durch die Bildung leicht löslicher Zinkchloridkomplexe dominant gelöst transportiert werden [Kari und Herrmann, 1989]. Weiterhin können sich durch den korrosionsfördernden Einfluss von Tausalz deutlich erhöhte

Schwermetallkonzentrationen im Straßenabfluss finden [Huwe, 2011]. Dies wird jedoch nicht in allen Studien bestätigt. [Geiger-Kaiser und Jäger, 2005] fanden eine über das Jahr gleichförmig verteilte Konzentration an Aluminium und Eisen in Autobahnabflüssen.

*Im Verkehrsflächenabfluss finden sich zusätzlich zu den Belastungen des Staubbiederschlags die verkehrsbedingten Emissionen wie Bremsen-, Reifen-, Fahrbahnabrieb, Korrosions- und Verbrennungsprodukte mit unterschiedlichen Schadstoffgehalten und Korngrößen.*

*Für die Entstehung und den Aufbau von Feststoffen auf Verkehrsflächen können außer der Staubbelastung nur aus dem Verkehr stammende Belastungen ursächlich sein. Daher muss es einen Zusammenhang von Belastungen zur DTV geben. Der Abtrag und das Abspülen in den Abfluss dagegen hängen von einer Vielzahl von Randbedingungen ab.*

*Im Winter führt die Zerstörung der Fahrbahn durch Frostwechsel und verstärkt nach einer Salzstreuung sowie Dispergierung agglomerierter Feststoffe durch den Salzeinsatz zu einer weiteren Belastung.*

### 2.2.3 Dachabrieb und Korrosionsprodukte

In den Dachabfluss gelangen zusätzlich zum Staubbiederschlag Feststoffe aus den Dachmaterialien. Dabei ist der Dachabrieb umso größer, je rauer das Material ist. Die Korngrößenverteilung von Dachrieb ist unbekannt. In Bild 2-14 sind Feststoffe in Dachrinnen bei Dachreinigungen dargestellt, die augenscheinlich relativ grob sind.



Bild 2-14: Material in Dachrinnen; Fotos: links: [FS-Dienstleistungen, 2013] rechts: [Dachrinnenreinigung Seyffarth, 2013]

Korrosionsprodukte aus Metaldächern sind bei pH-Werten von etwa 5 überwiegend gelöst vorhanden und tragen dann kaum zu einer Erhöhung der AFS bei.

In Bild 2-15 sind die Korrosionsprodukte in einem Kupferdachabfluss aus Neuseeland dargestellt, die größer als 120 µm (C) bzw. ca. 300 µm (D) waren [Pennington und Webster-Brown, 2008]. Der pH-Wert der Proben lag teilweise über 7, dies zeigt schon, dass Korrosionsprodukte nicht immer gelöst vorliegen und die Korngrößen in Dachabflüssen nicht zwangsläufig unterhalb 63 µm liegen müssen.

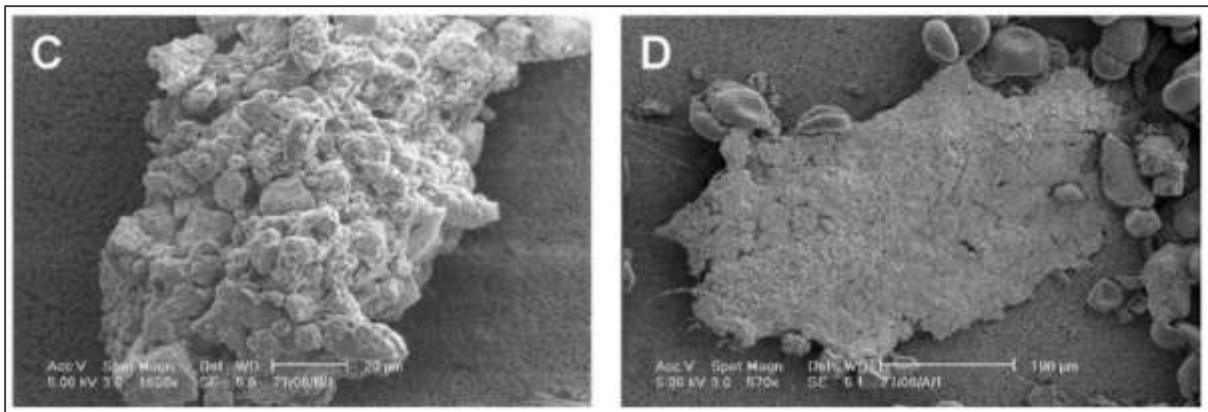


Bild 2-15: Elektronenmikroskopische Aufnahmen von Kupferdachabflüssen in Auckland, Neuseeland. C: Kupferreiches organisches Partikel. D: Kupferkarbonathaltiges Korrosionsprodukt. Aus: [Pennington und Webster-Brown, 2008]

Die Dachhaut selbst oder die sich anschließende Dachrinne können evtl. als Stoffsenke insbesondere für größere Anteile fungieren, vgl. auch Bild 2-14.

#### 2.2.4 Bodenerosion

**Feststoffe** können von **unbefestigten Flächen** in unterschiedlichem Maß auf befestigte Flächen oder direkt in den Straßeneinlauf und somit in Niederschlagsabflüsse eingetragen werden. In Deutschland werden derzeit durchschnittlich 8 bis 10 t/ha und Jahr an Boden über Wind- oder Wassererosion abgetragen. Dies entspricht etwa einem flächendeckenden Abtrag von 1 mm jährlich [LfU, 2007].

Böden werden u.a. aufgrund ihrer Korngröße unterteilt in Ton (< 2 µm), Schluff (2 bis 63 µm) und Sand (> 63 µm). Lehm stellt ein Gemisch aus den drei Bodenarten zu etwa gleichen Anteilen dar. Die Erosionsneigung eines Bodens hängt insbesondere von der Fähigkeit Wasser zu binden ab. Tonige und lehmige Böden sowie Böden, die organisches Material enthalten, neigen weniger zur Erosion. Ein hoher Anteil mittlerer Korngrößen (Sand), zu fein bearbeiteter Oberboden, verdichtete Böden, zu stark gelockerte Böden oder ausgetrocknete Böden begünstigen eine Erosion. Aber auch das Gefälle, die Witterung, der Bewuchs und die Art der Bodenbearbeitung beeinflussen die Erosion maßgeblich [LfU, 2007].



Je nach Randbedingungen und Nutzung enthalten Böden organisches Material oder auch durch Düngung bzw. das Aufbringen von Pflanzenschutzmitteln Nährstoffe oder Schadstoffe. Durch den Staubbiederschlag (nasse und trockene Deposition) werden weitere Stoffe in die Böden eingetragen [LfU, 2007].

Die Korngrößenverteilung der durch Erosion abgetragenen Böden wird je nach Randbedingungen sehr unterschiedlich sein und das ganze Spektrum an Korngrößen enthalten. Aus den oben dargestellten Zusammenhängen lässt sich vermuten, dass durch Niederschlagsabflüsse eingetragene Böden eher gröbere Bestandteile aufweisen, was jedoch durch Messungen belegt werden müsste.

### 2.2.5 Pollen, Blüten, Laub

In der frühen Vegetationsphase können Pollen Niederschlagsabflüsse ganz erheblich mit Feststoffen organischer Natur belasten. Dies kann in der Folge aufgrund des punktuellen Eintrags zu Kolmationsproblemen gerade in dezentralen Behandlungsanlagen führen. Die meisten Pollenkörner sind zwischen 10 und 100  $\mu\text{m}$  groß [Schütt et al., 2002], siehe auch Bild 2-16. Sie sedimentieren im Umkreis von einigen 100 Metern von der Emissionsquelle als Staubbiederschlag. Es sind aber auch windabhängige Transporte über lange Strecken möglich [Huss-Marp, 2000].

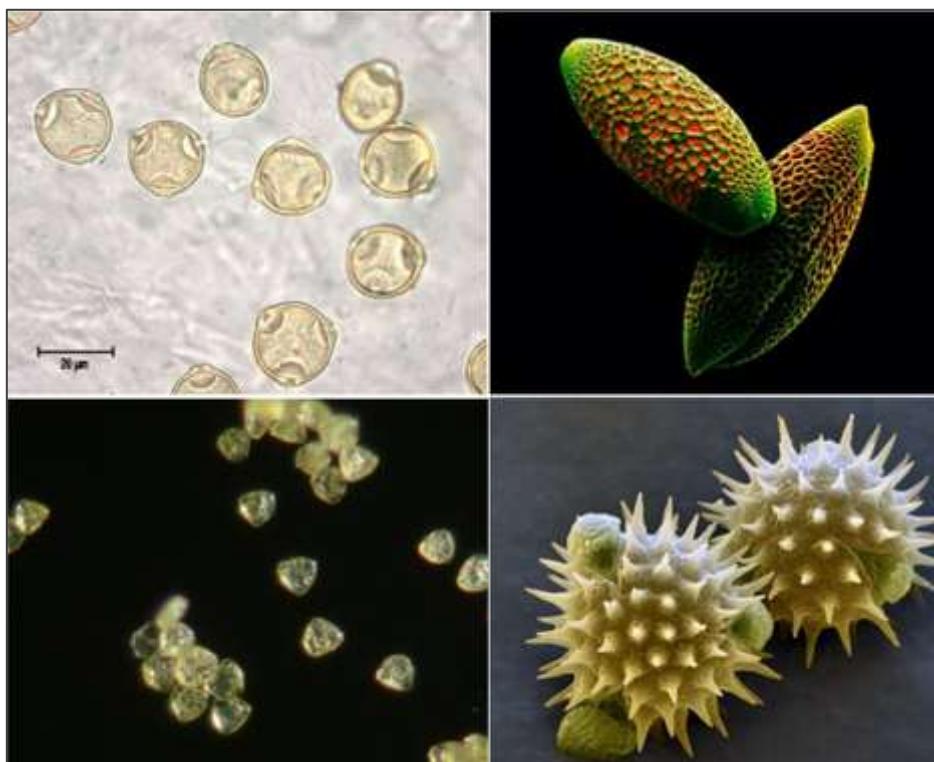


Bild 2-16: Pollenkörner. Von links oben im Uhrzeigersinn: Birkenpollen [Universitätsklinikum Saarland, o.J.], 19 bis 27  $\mu\text{m}$  [Huss-Marp, 2000]  
Lilienpollen, ca. 30 x 100  $\mu\text{m}$  [Hagen, R., 2011]  
Sonnenblumenpollen, ca. 30  $\mu\text{m}$  [SWR, o.J.]  
Haselpollen [Paraselene, 2012], ca. 20 bis 28  $\mu\text{m}$  [Huss-Marp, 2000]

Blüten und Laub und deren Abbauprodukte können Niederschlagsabflüsse im Sommer bzw. Herbst belasten, sofern sie nicht durch Straßenreinigung oder Vorreinigung (Siebe) im Straßeneinlauf entfernt wurden, vgl. Bild 2-17.



Bild 2-17: Pappelblüten im Juni

### 2.2.6 Sonstige Einträge

Lokal können insbesondere durch Bau- und landwirtschaftliche Tätigkeiten oder durch Instandhaltungsmaßnahmen (Grasschnitt, Reparatur der Leitplanken etc.) Feststoffe in Niederschlagsabflüsse gelangen, obwohl der Verursacher jeweils in der Pflicht ist, die Verunreinigungen zu beseitigen, wie in einigen kommunalen Straßenreinigungssatzungen festgelegt, z.B. der Stadt Frankfurt [Stadt Frankfurt, 2013].

Die Korngrößen der eingetragenen Feststoffe reichen dabei von wenigen  $\mu\text{m}$  (Zement, Ton und Schluff z.B.  $< 10$  bis  $200 \mu\text{m}$ ) bis in den Millimeterbereich (Gras, Sand, Boden, Streu...).



Bild 2-18: Feststoffeinträge durch Bautätigkeiten (links [Hauraton, o.J.]), landwirtschaftliche Tätigkeiten (rechts [IM, 2011])

## 2.3 Verhalten/Retention

Feststoffe, die mit dem Niederschlagsabfluss transportiert werden, können auf dem Transportweg vom Entstehungsort bis zum Erreichen einer Behandlungsanlage oder eines Gewässers abhängig von ihrer Korngröße und dem -gewicht und den vorliegenden Randbedingungen in unterschiedlichem Maße zurückgehalten oder ganz entfernt werden.

Eine große Rolle beim Transport der Feststoffe und letztendlich der Konzentration spielen die Dauer der Trockenperiode vor dem Niederschlagsereignis [Tiefenthaler et al., 2001], [Herrera, 2007], [Hürlimann, 2011] sowie die Intensität sowohl des vorangegangenen als auch des aktuellen Regenereignisses [Herrera, 2007].

Das Ausmaß des AFS-Rückhalts bzw. einer Entfernung unterscheidet sich bezüglich des Anfallortes (Verkehrsfläche oder Dach), daher werden Verhalten und Entfernung der Feststoffe dieser Abflüsse getrennt voneinander in zwei Kapiteln beschrieben.

Niederschlag fließt selten vollständig ab, vielmehr sind Benetzungs-, Mulden- und Verdunstungsverluste in unterschiedlicher Höhe vorhanden. Daher wird ein Kapitel zunächst der Abflussbildung gewidmet.

In der Trennkanalisation werden einzelne Niederschlagsströme von unterschiedlichen Flächen zusammengeführt, das Verhalten und der Transport von Feststoffen in der Trennkanalisation werden schließlich in einem weiteren Kapitel dargestellt. Auf die Darstellung dieser Prozesse in der Mischkanalisation wird nicht eingegangen, da dies nicht Schwerpunkt dieser Arbeit ist.

### 2.3.1 Abflussbildung

Nicht sämtliches Niederschlagswasser, das den Boden erreicht, trägt zur Abflussbildung bei. In Bild 2-19 sind die Einzelverluste, die von Niederschlagsintensität und Regendauer abhängen, dargestellt.

Abhängig von den Stoffeigenschaften der Oberfläche wird diese zunächst benetzt. Der Benetzungsverlust auf Verkehrsflächen beträgt zwischen 0,2 und 0,5 mm pro Regenereignis [Xanthopoulos und Hahn, 1993].

Hinzu kommen Muldenverluste, die stark von der Struktur und der Topografie des Einzugsgebietes abhängig sind. Diese können von 0,2 bis 1,5 mm je Regenereignis variieren [Xanthopoulos und Hahn, 1993]. Die Spannweite der Benetzungs- und Muldenverluste kann somit abhängig von der Regenintensität und -dauer sehr groß sein. Bei sehr schwachen Regen mit geringer Dauer kommt es im Extremfall zu keinem Abfluss.

Benetzungs- und Muldenverluste von Dachflächen sind in der Regel aufgrund der größeren Neigung der Fläche geringer.



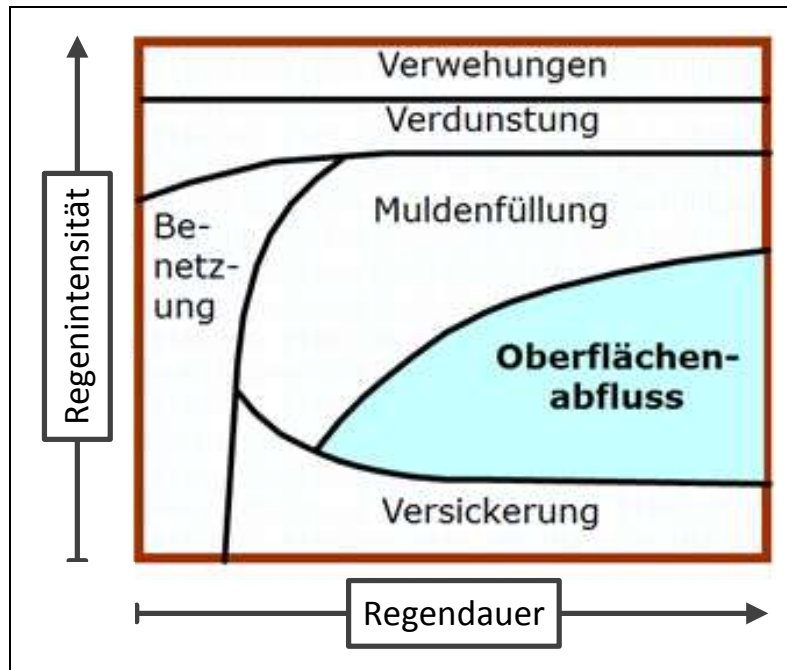


Bild 2-19: Darstellung von Einzelverlusten, verändert nach [ATV-DVWK-M 165, 2004]

Verdunstungs- und Abtrocknungsverluste hängen von der Dauer des Regens und den meteorologischen Gegebenheiten ab. [Verworn, 1993] gibt folgende mittleren täglichen Verdunstungsraten je Tag in Abhängigkeit vom Monat an:

Tabelle 2-2: Täglichen Verdunstungsraten je Tag in Abhängigkeit vom Monat [Verworn, 1993]

| Monat   | Verdunstung [mm/d] | Monat  | Verdunstung [mm/d] | Monat     | Verdunstung [mm/d] |
|---------|--------------------|--------|--------------------|-----------|--------------------|
| Januar  | 0,5                | Mai    | 2,9                | September | 1,9                |
| Februar | 0,8                | Juni   | 3,3                | Oktober   | 1,1                |
| März    | 1,2                | Juli   | 3,4                | November  | 0,8                |
| April   | 2,0                | August | 2,8                | Dezember  | 0,5                |
|         |                    |        | Mittelwert         | 1,8       |                    |

Dieser Anteil ist auch wiederum abhängig von der Anzahl und Größe der Mulden im Einzugsgebiet.

Verwehungen hängen von Wind und Aktivitäten (Verkehr) sowie baulichen Gegebenheiten im Einzugsgebiet und die Versickerung schließlich vom Versiegelungsgrad bzw. von der Art des Flächenbelags ab.

Mit Hilfe der Summe der Verluste kann schließlich der sogenannte Abflussbeiwert berechnet werden, der als Quotient aus Abfluss- und Niederschlagsvolumen in

[%/100%] ausgedrückt wird. Nach ATV-DVWK A 198 [ATV-DVWK, 2003] werden folgende Abflussbeiwerte genannt:

Tabelle 2-3: Abflussbeiwerte nach ATV-DVWK A 198 [ATV-DVWK, 2003]

| Flächenart                                       | $\psi$ |
|--|--------|
| Dachflächen                                      | 1      |
| Straßen, asphaltiert                             | 1      |
| Park-, Stell-, Hofflächen; fugenlose Pflasterung | 0,85   |
| Stell-, Hofflächen; Fugenpflaster                | 0,75   |

Diese Werte können als Anhalt dienen. Es ist allerdings zu bedenken, dass sie der Bemessung von nachfolgenden Anlagen dienen, somit werden Abflussbeiwerte hier möglichst hoch angesetzt.

*Für die Berechnung des Feststoffaufkommens, welches in den in den Niederschlagsabfluss gelangen kann, sind die **durchlässigen Anteile von Flächen als Versickerungsanteil** zu berücksichtigen.*

*Für eine Berechnung der Feststoffkonzentration im Niederschlagsabfluss der undurchlässigen Flächen sind außerdem die **Anteile „Benetzung, Muldenfüllung und Verdunstung“** maßgeblich. Sie werden für weitere Berechnungen im Kap. 3.3.1 quantifiziert.*

### 2.3.2 Verkehrsflächenabfluss

Das Feststoffaufkommen in Verkehrsflächenabflüssen wird von vielen Randbedingungen in unterschiedlichem Maße beeinflusst.

In Bild 2-20 (oben) sind die möglichen Beiträge zur AFS-Belastung im Verkehrsflächenabfluss dargestellt. Sie sind in Kapitel 2.2.2 ausführlich beschrieben worden.

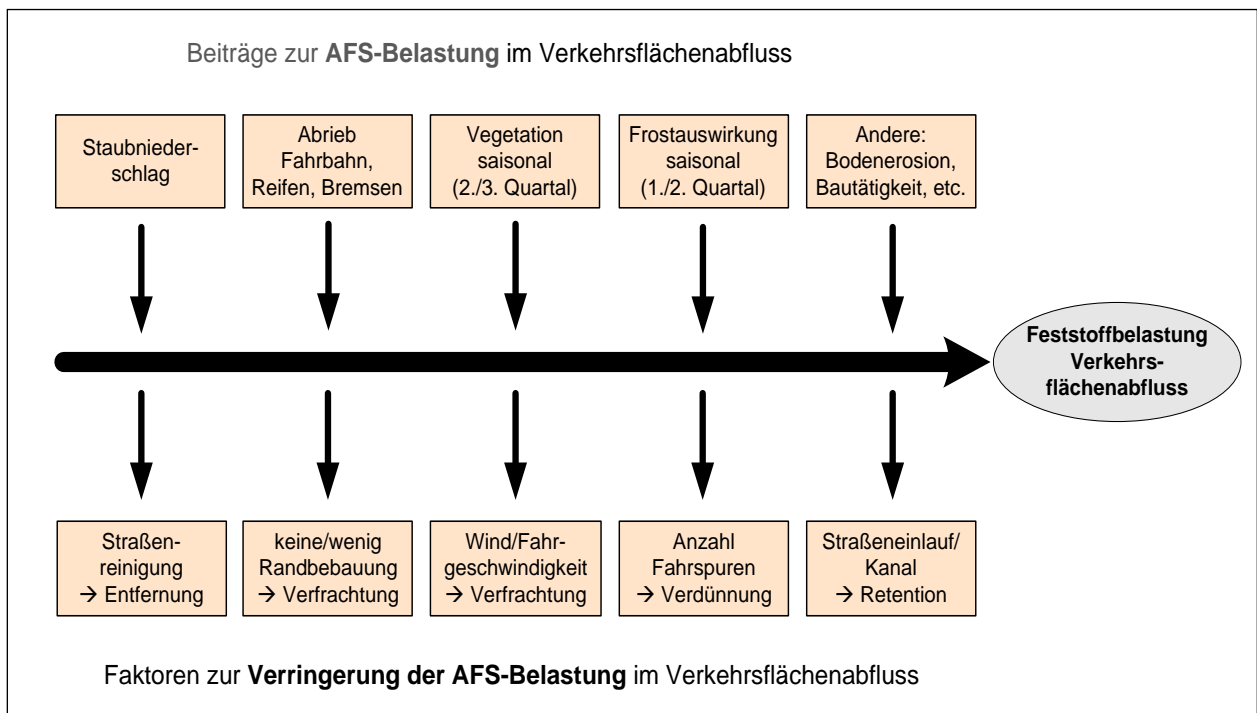


Bild 2-20: Beiträge zur Erhöhung und Faktoren zur Verringerung von AFS im Verkehrsflächenabfluss, verändert nach [Welker und Dierschke, 2013]

Zu erwarten ist eine Akkumulation der Feststoffe, die z.B. mit der **Korrelation der Niederschlagsfeststoffkonzentration und Anzahl der Tage der vorangegangenen Trockenperiode** dargestellt werden könnte. Dies ist jedoch nur bedingt der Fall. In Bild 2-21 sind die Ergebnisse einer Messreihe von [McQueen, 2008] an zwei Parkplätzen dargestellt.

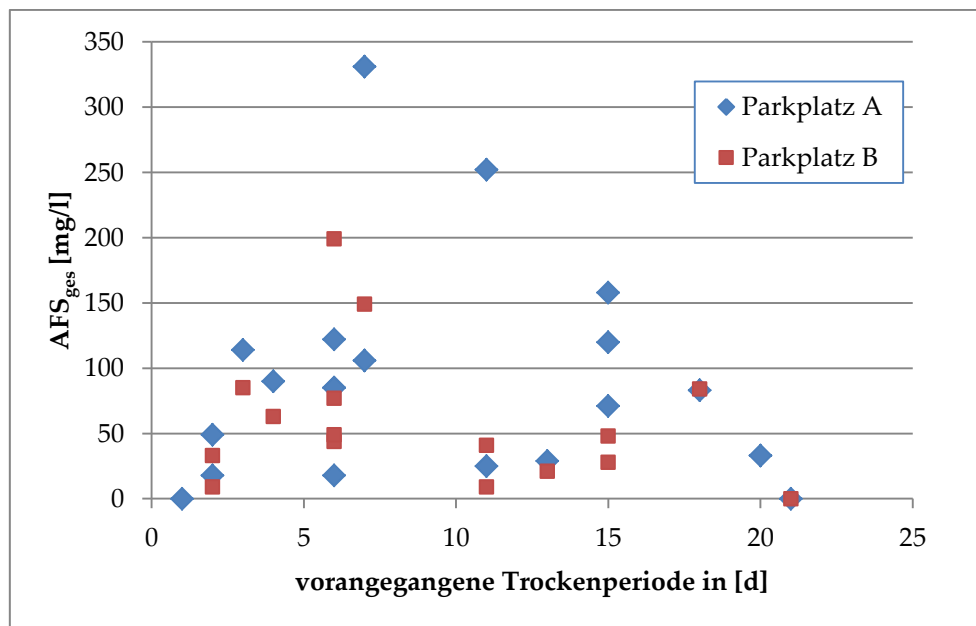


Bild 2-21: Feststoffe in Niederschlagsabflüssen zweier Parkplätze in Abhängigkeit von der Dauer der vorangegangenen Trockenperiode; Daten aus [McQueen, 2008]

Die Feststoffkonzentration der Parkplatzabflüsse steigt danach bis zu einer Trockenperiode von etwa 10 Tagen an, um dann wieder abzufallen. Eine Verdünnung der Abflüsse nach den langen Trockenperioden durch hohe Niederschläge kann nach Durchsicht der Daten über dokumentierte Niederschlagsmengen ausgeschlossen werden.

Auch [Boller et al., 2005a] fanden in einer zweijährigen Messreihe in Straßenabfluss keine Korrelation zwischen Trockentagen und Feststoffkonzentrationen.

**Neben den Faktoren, die die AFS-Belastung des Verkehrsflächenabflusses erhöhen, muss es also auch Faktoren geben, die die Belastungen verringern.** Dies ist in Bild 2-20 unten dargestellt.

Mittels **Straßenreinigung** kann der überwiegend gröbere Anteil an Feststoffen entfernt werden. Je nach Art der Straßenreinigung werden feine Fraktionen < 63 µm hingegen nur zu etwa 20 bis 75 % entfernt, vgl. Tabelle 2-5.

Die Effektivität der Straßenreinigung wird auch von der Anzahl der Reinigungsgänge, der Drehzahl der Bürsten bei der mechanischen Reinigung oder der Leistungstärke der Vakuumsauger beeinflusst [Butler und Clark, 1995]. Die Art der Straßenoberfläche (Beton, Asphalt oder Pflaster) ist ebenso entscheidend für die Effektivität [Renschen, 2010]. Eine Straßenspülung zur Entfernung von Straßenstaub ist zwar effektiver als eine Reinigung mittels Bürsten- oder Vakuurreinigern [Tiefenthaler et al., 2001], allerdings werden die Straßensedimente in die Straßeneinläufe bzw. den Kanal verlagert, so dass damit keine tatsächliche Reinigung stattfindet [Butler und Clark, 1995].

Tabelle 2-4: Effektivität der Straßenreinigung

| Art der Straßenreinigung | Effektivität [%] | Quelle   |
|--------------------------|------------------|--|
| Manuelle Reinigung       | 48               | Butler und Clark, 1995                                   |
| Korngröße < 63 µm        | 25               |  |
| Mechanische Reinigung    | 50               | Sartor und Boyd, 1972, zitiert in Butler und Clark, 1995 |
| Korngröße 43 – 104 µm    | 20               |  |
| Korngröße < 43 µm        | 15               |  |
| Vakuurreinigung          | 84               | Butler und Clark, 1995                                   |
| Korngröße < 63 µm        | 76               |  |
| Moderne Kehrmaschinen    | 71 - 94          | Renschen, 2010   |

Feine Anteile können durch **Wind** oder **Verkehrsturbulenzen** aufgewirbelt werden, finden sich im Feinstaub der Luft wieder und werden in die Umgebungsluft transportiert. In der Schweiz wurde der Anteil an aufgewirbeltem Straßenstaub im Feinstaub an hochbelasteten Straßen zu 40 bis 50% abgeschätzt [Astra, 2009]. [Fuchs et al., 2010a] kommen zu einer ähnlichen Abschätzung mit im Mittel 50% an „äolischen Verlusten“ feiner Feststoffe in Trenngebieten.

Bei den verkehrsbedingten Turbulenzen spielt insbesondere die Fahrgeschwindigkeit eine Rolle. Dies erklärt, warum der Zusammenhang zwischen DTV und AFS in Verkehrsflächenabflüssen gerade bei Autobahnen nicht mehr herzustellen ist. In Bild 2-22 ist in Ergänzung zu Bild 2-8 am Beispiel des Kupfergehalts (Kupfer liegt in Straßenabflüssen i.d.R. vorwiegend partikulär vor) im angrenzenden Boden von Straßen unterschiedlicher DTV dargestellt, dass ab 80.000 DTV eine Steigerung der Belastung nicht mehr zu erkennen ist [Helmreich, 2012].

[Wang et al., 1982], zitiert in [Herrera, 2007], konnten zeigen, dass eine große Fraktion an Feststoffen im Abstand von 15 m zur Fahrbahn deponiert wird.

[Lygren et al., 1984] analysierten den PAK-Gehalt im Staubniederschlag im Abstand von 20 und 50 m an einer Autobahn in Norwegen mit 8.000 DTV in vier Zeiträumen. In 20 m Abstand wurden zwischen zwei- und sechsmal mehr PAK deponiert als in 50 m Abstand.

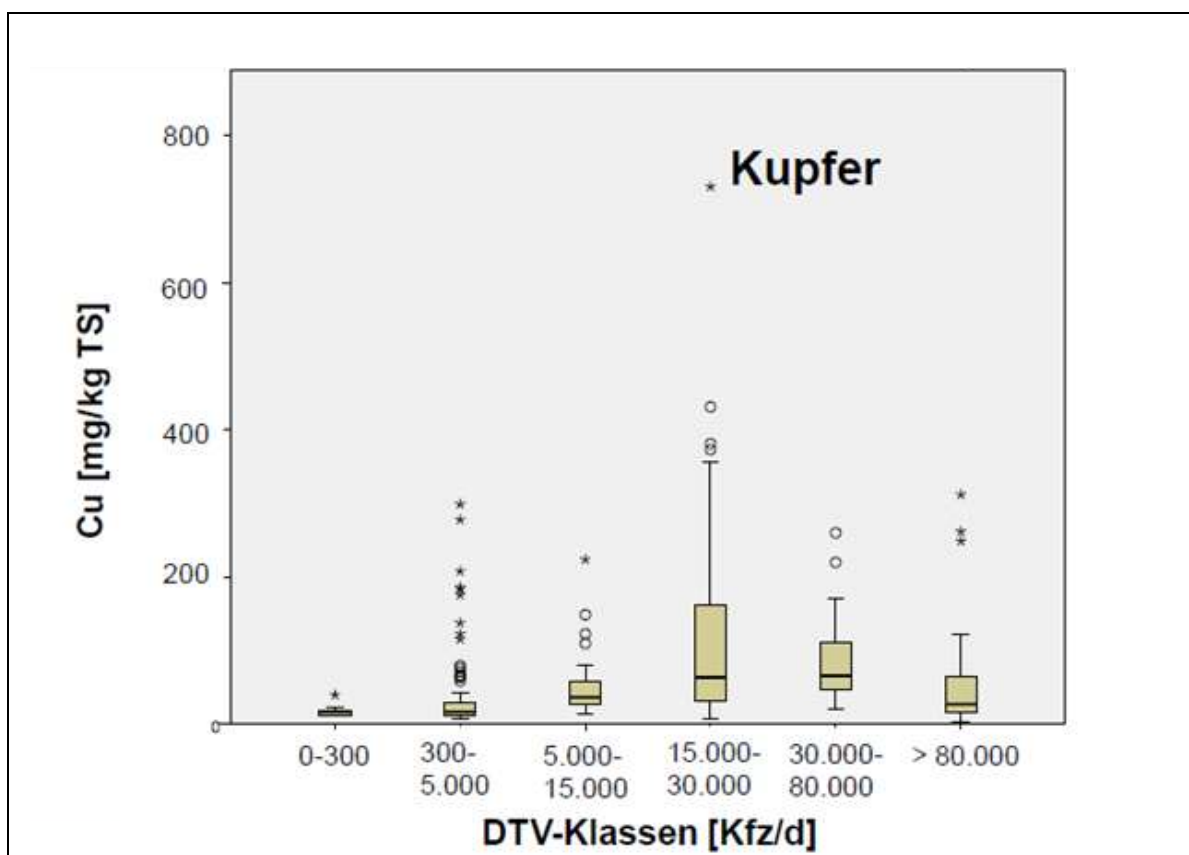


Bild 2-22: Kupfer im angrenzenden Boden von Verkehrsflächen in Abhängigkeit von der DTV [Helmreich, 2012]

Bestätigt wird dies anhand von ausführlichen Staubniederschlagsmessungen an drei Autobahnen [Bast, 2011] in Deutschland. Die Staubbelastung ein Meter von der Fahrbahn entfernt und gleichzeitig in Bodennähe lag mit bis zu 3.000 mg/(m<sup>2</sup>·d) um ein Vielfaches höher als in 1 m Höhe bzw. bereits im Abstand von 2,5 und mehr Metern. Dies zeigt, dass ein großer Anteil der Feststoffe bis 200 µm außerhalb des Fahrbahnrandes transportiert wird und erklärt auch den an diesen Autobahnen gemessenen geringen Gehalt an AFS im Verkehrsflächenabfluss von etwa 200 mg/l im Mittel. Exemplarisch ist die Staubbelastung in Bodennähe (braune Kurven) und in 1,5 m Höhe in verschiedenen Entfernungen von der Fahrbahn für die A 4 mit 71.500 DTV in Bild 2-23 dargestellt.

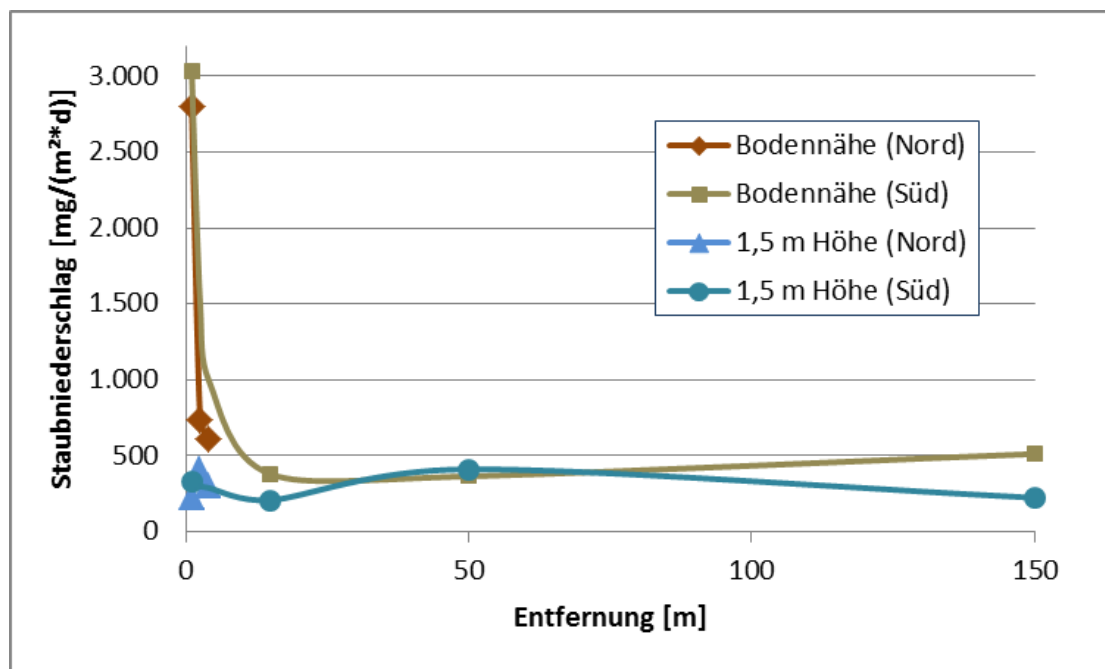


Bild 2-23: Staubniederschlag an der A 4 mit 71.500 DTV in Abhängigkeit von der Entfernung sowie der Höhe, n = 10 bis 70, 2005 bis 2009, Daten aus [Bast, 2011]

Schwere Fahrzeuge tragen mehr zu einer Aufwirbelung von Straßenstaub bei als PKW, wie für die Straßenschlucht Zürich-Weststraße ermittelt werden konnte [Astra, 2009].

Der Effekt der Aufwirbelung und des Transports wird durch Bordsteine oder **Randbebauungen** abgemindert. Schmutzstoffe lagern sich dort ab und werden bei nachfolgenden Regenfällen abgeschwemmt [Kaufmann, 2008b].

In Bild 2-24 ist zur Illustration die Sedimentbildung an einem Hochbord einer Autobahn in Berlin dargestellt [Lambert, 2011].





Bild 2-24: Vermehrte Sedimentbildung am Hochbord der A113neu in Berlin nach der Wintersalzung, Frühjahr 2008. Aus: [Lambert, 2011]

Die Schadstofffracht im Straßenabwasser kann zusätzlich durch **Verspritzungen** in den angrenzenden Bereich verschoben werden. Bei einer nicht vorhandenen seitlichen Bebauung können bis zu 70% des Niederschlags bei Autobahnen ins Umland verspritzt werden [Kaufmann, 2008a]. In der von [Boller et al., 2005b] untersuchten Straße, die in Bild 2-25 dargestellt ist, wurden nur etwa 20% der Schadstofffracht ins Straßenabwasser abgeleitet, 80% landeten im Bankett und somit im angrenzenden Boden. Je breiter die versiegelte Fläche im Anschluss an die Straße ist, desto höher ist der Anteil an gefasstem Straßenabwasser.

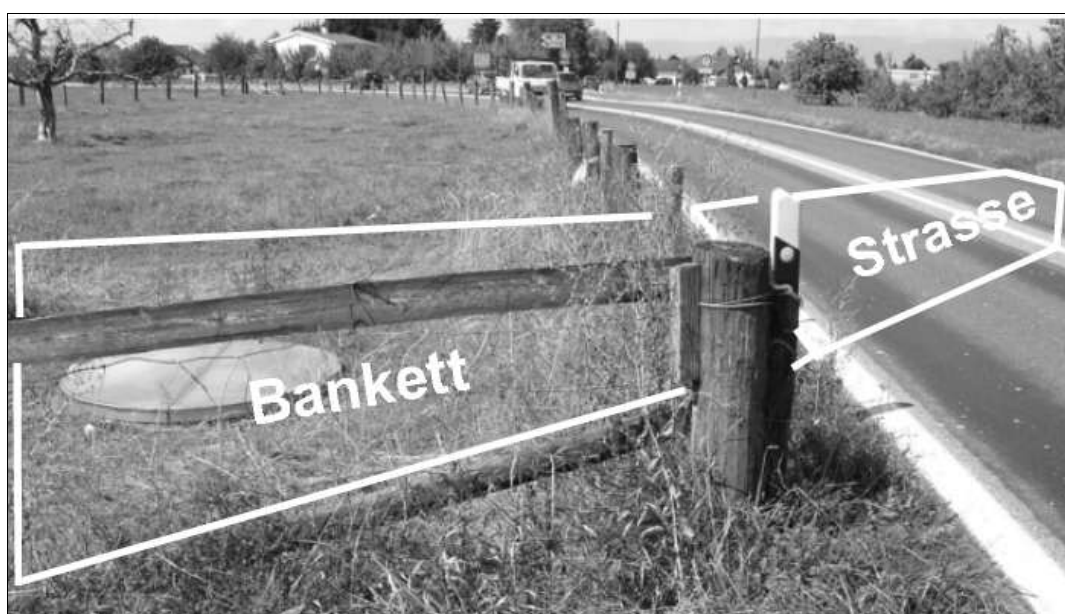


Bild 2-25: Schematische Darstellung der Versuchsanlage bestehend aus den Systemen „Bankett“ und „Straße“, aus [Boller et al., 2005b]

Bei der Feststoffkonzentration im Straßenabfluss spielen daher die **Anzahl der Fahrspuren** und die **Breite der Standspuren** eine Rolle. Bei schmalen Randstreifen werden mehr feine Feststoffe darüber hinweg verweht. Ist die Gesamtbreite einer Straße durch Standspuren etc. dagegen groß, landen zwar mehr Feststoffe in den Abfluss, es findet aber auch eine Verdünnung durch die größere Fläche, auf die es regnet, statt.

Die Diskrepanz zwischen den zu erwartenden Feststoffkonzentrationen und den tatsächlich gemessenen ist also teilweise zu erklären mit den oben genannten Faktoren der Verminderung. Wichtig darüber hinaus ist, sich bei der Konzeption und der Interpretation von Messprogrammen über die mögliche **Dynamik von Feststoffen im Straßenabfluss**, die u.a. abhängig von der Niederschlagsintensität ist, im Klaren zu sein.

Straßenabflüsse zeigen häufig anfangsbetonte Spülstöße bezüglich des Feststofftransportes [Boller, et al., 2005a], [Herrera, 2007], [Kern et al., 1992], [Luo et al., 2012], [Rossi, et al., 2004b], [Tiefenthaler et al., 2001]. Als anfangsbetonter Spülstoß oder „first-flush“ kann nach [Bertrand-Krajewski et al., 1998] ein Ereignis definiert werden, in dem 80% der Fracht während 30% des Abflusses transportiert wird. Oft steigt der AFS-Gehalt anfangs stark an, um dann während der Dauer des Regenereignisses auf ein hohes Level abzuflachen [Herrera, 2007]. Es wurde auch beobachtet, dass die Schwebstoffmaxima den Abflussspitzen vorausseilen, da der Straßenstaub sich zu mehr als 90% im Rinnstein ansammelt [Grottker, 1987] und nach sehr kurzer Fließzeit den Straßeneinlauf erreicht, während sich der Abfluss erst auf der Verkehrsfläche konzentrieren muss [Kern et al., 1992], [Rossi, et al., 2004b]; dies ist in Bild 2-26, links, dargestellt. Rechts im gleichen Bild ist auch ein endbetonter Spülstoß dargestellt, einer kleinen Feststoffspitze folgt eine größere Feststoffspitze bei höheren Regenintensitäten [Aryal et al., 2005].

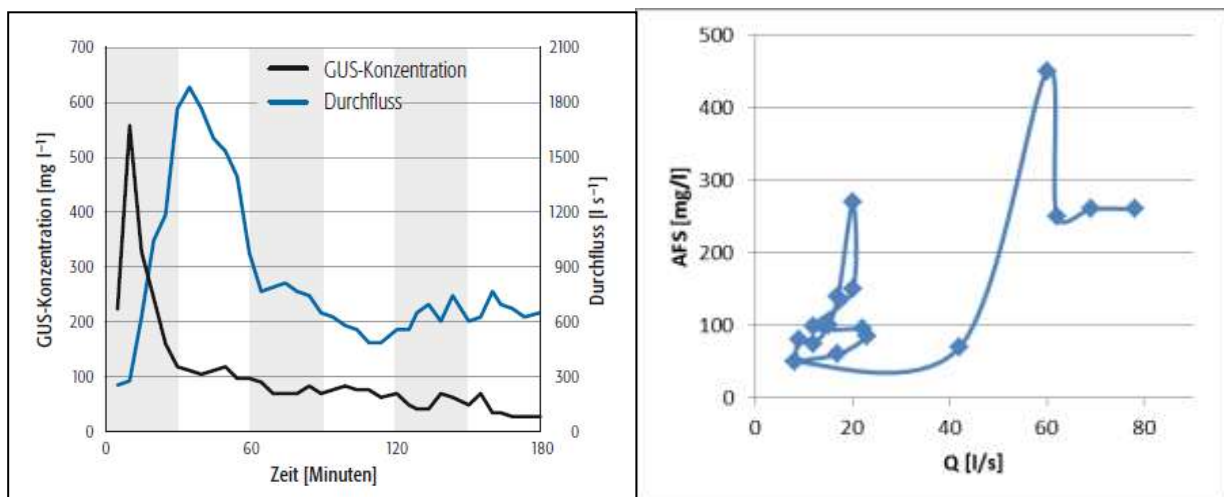


Bild 2-26: Möglicher Verlauf der AFS-Konzentration (GUS) während eines Regenereignisses. Beispiele gemessener Ganglinien. Links: AFS (GUS) im zeitlichen Verlauf, aus: [Rossi et al., 2004b] rechts: AFS in Abhängigkeit von Q im zeitlichen Verlauf, nach [Aryal et al., 2005]



[Boller et al., 2005a] zeigten anhand der Verläufe von sechs Regenereignissen an einer Straße in der Schweiz, dass eine Mindestregenintensität vorhanden sein muss, damit sich ein Spülstoß einstellen kann. [Hilliges et al., 2007] fanden vermutlich daher keine ausgeprägten Feststoffspitzen in den über ein Jahr gemessenen Abflüssen von 24 Regenereignissen an einer verkehrsreichen Straße in München. Die Verteilung der Massen über die Regenereignisse war hier überwiegend nahezu gleichförmig.

Grundsätzlich wird der AFS-Gehalt bei geringer Regenintensität und zu Beginn eines Regenereignisses durch auf der Straße wirkende Suspendierungs- und Schleppkräfte begrenzt [Aryal, et al., 2005], [Kern et al., 1992]. Bei länger anhaltenden Regen ist der AFS-Gehalt dann materiallimitiert [Aryal, et al., 2005], [Kern et al., 1992], [Xanthopoulos und Hahn, 1993].

Strukturstarke Oberflächen bieten insgesamt ein größeres Potenzial zur Oberflächen-speicherung als glatte Oberflächen [Fuchs, 2013].

Die Dynamik des Feststofftransportes auf einer Straßenoberfläche (3.000 DTV) abhängig von Straßenreinigungen und von Niederschlagsintensitäten wurde von [Vaze und Chiew, 2002] in Melbourne, Australien, ausführlich untersucht. Bei der Beprobung wurde unterschieden in „freie“ und „fixierte“ Feststoffe, die nur nach mechanischer Bearbeitung (Bürsten) entfernt werden konnten. Die Ergebnisse sind in Bild 2-27 dargestellt.

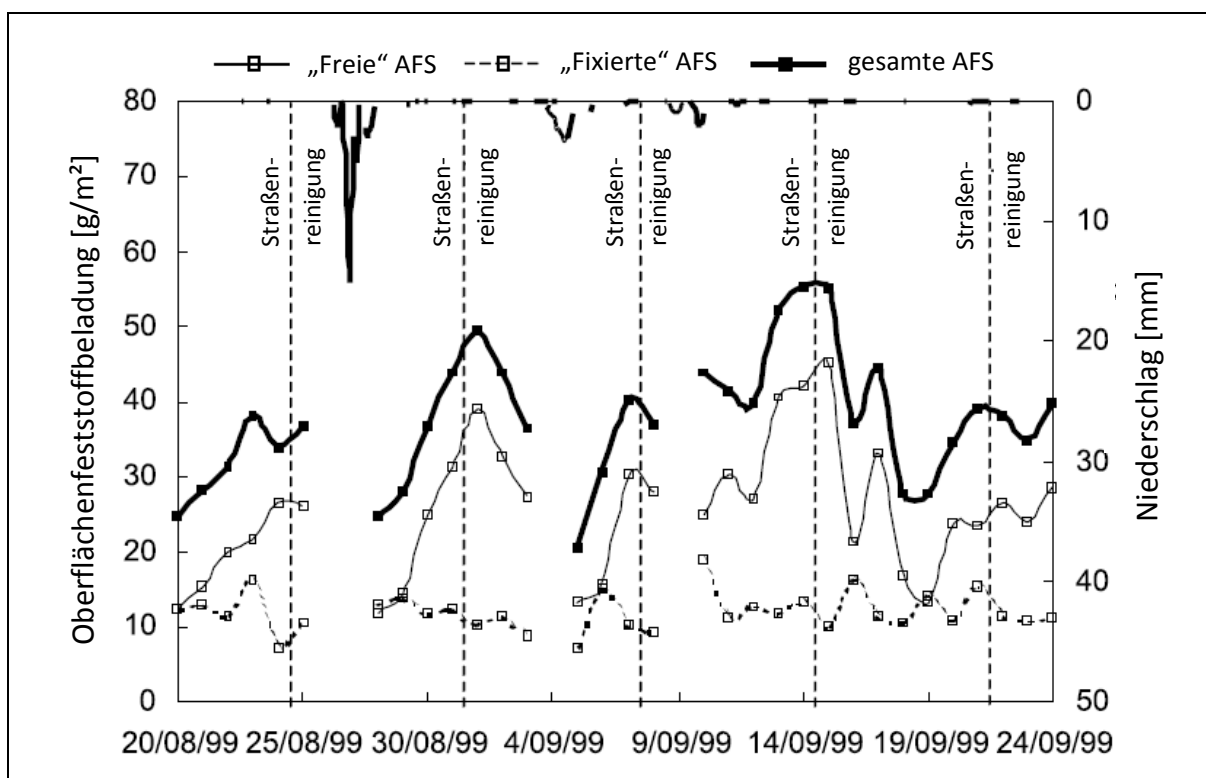


Bild 2-27: Feststoffbeladung einer Straßenoberfläche im zeitlichen Verlauf, verändert nach [Vaze und Chiew, 2002]

Zu erkennen ist, dass sich die Gesamt-AFS-Beladung während der Trockenperioden aufbaut und ein Teil der „freien“ Feststoffe während eines Regenereignisses (abhän-

gig von der Regenintensität und -charakteristik) abgespült werden. Weitere Untersuchungen ergaben, dass die Kornverteilung der freien Feststoffe nach einem Regenereignis gröber als zuvor ist, was zeigt, dass insbesondere die feinen Anteile in den Niederschlagsabfluss gelangen [Vaze und Chiew, 2002].

Der fixierte Anteil dagegen steigt nach einem Regen an und die Kornverteilung ändert sich in Richtung „fein“. Dies liegt daran, dass der Regen Feinpartikel in den freien Anteil der Feststoffe löst und diese teilweise wegspült. Ein Rest davon aber haftet nach Ende des Regens an der Oberfläche an und erhöht somit insbesondere den Feianteil des fixierten AFS-Anteils [Vaze und Chiew, 2002]. Die Straßenreinigung hatte teilweise den Effekt, dass der feine freie Feststoffanteil erhöht wurde, wie nach der zweiten, der vierten und fünften Straßenreinigung zu erkennen ist. Die Bürsten der Kehrmaschine lösen die feinen fixierten Feststoffe, ohne sie entfernen zu können. Dies kann nachteilige Auswirkungen auf das Auswaschen von Verschmutzungen in den Niederschlagsabfluss haben, da durch das Kehren feine Feststoffe erst verfügbar gemacht werden [Vaze und Chiew, 2002]. Unklar nach diesen Untersuchungen bleibt, ob der fixierte Anteil einen bestimmten Grenzgehalt erreicht und anschließend auch ohne Straßenreinigung als freier Anteil verfügbar würde, was zu vermuten ist.

Auch [Tiefenthaler et al., 2001] stellten bei Messungen mit simulierten Regenereignissen an einem Parkplatz fest, dass eine Straßenreinigung keinen positiven Effekt auf die Fest- und Schadstoffkonzentrationen im Abfluss hatten. Auf jeden Fall steigt die Schadstoffkonzentration im Straßenstaub nach einer Straßenreinigung an, da Schadstoffe überwiegend an der zurückbleibenden, feinen Fraktion sorbiert sind [Grottker, 1987].

**Straßeneinläufe** sind so konstruiert, dass dort nach Möglichkeit ein Feststoffrückhalt stattfindet. Im Grobfang werden insbesondere Laub und grobe Feststoffe zurückgehalten. [Xanthopoulos und Hahn, 1993] ermittelten ca. 3 g/(m<sup>2</sup>·d) Feststoffrückhalt (entsprechend 10.950 kg/(ha·a)) an Blättern und diversen Abfällen im Schlammeimer von Straßeneinläufen. Dieser variierte abhängig von der Jahreszeit von 0,7 g/(m·d) im Frühjahr, 1,3 g/(m·d) im Sommer, 5,9 g/(m·d) im Herbst und 4,1 g/(m·d) im Winter. [Fuchs, 2013] konnte z.B. in insgesamt 13 Nassgullys in Berlin einen mittleren Rückhalt an überwiegend gröberem Feststoffen in der Höhe von 4.500 kg/(ha·a) feststellen. Je nach Höhe und Art des Einlaufbauwerks werden auch mittlere Feststoffe zwischen 80 µm und etwa 1.600 µm in unterschiedlichem Maß, abhängig von der Zulaufwassermenge, zurückgehalten [Hurlebusch 1986], zitiert in [Stein, 2008]. [Xanthopoulos und Hahn, 1993] fanden etwa 6 g/(m<sup>2</sup> · d) an Sinkstoffen im Straßenablauf mit einer Kornverteilung von 10 bis 5.000 µm.

Die Gesamteffektivität des Rückhalts wird von der Art des Straßeneinlaufs, aber auch von den Wartungsintervallen bestimmt. Bei Erreichen eines bestimmten Schlammspiegels finden bei intensiveren Niederschlagsereignissen Resuspensionen statt, so dass eine Wirksamkeit dann nicht mehr gegeben ist [Stein, 2008]. Der Feststoffrückhalt wird i.A. bei Straßenabläufen mit Bodenauslauf zu 8% bis 15 % abge-

schätzt, bei Straßenabläufen mit Schlammraum zu 20% bis 35% [Rumpf, 1987], zitiert in [Stein, 2008].

*Neben den Faktoren, die zur AFS-Bildung beitragen, gibt es auch Faktoren, die zur **Feststoffreduktion** führen. Dies sind vor allem für gröbere Fraktionen die **Straßenreinigung** und für feinere Fraktionen **Wind und Verkehrsturbulenzen**. Die Straßenreinigung kann allerdings auch den Effekt haben, feine Anteile erst verfügbar für den Straßenabfluss zu machen.*

***Nicht vorhandene seitliche Bebauungen** verstärken den Effekt von Verwehungen. Die **Gesamtbreite der Straße, Anzahl der Fahrspuren und Seitenstreifen** beeinflussen die spezifische AFS-Bildung sowie die –Konzentration im Niederschlagsabfluss ebenfalls.*

*Die **Dynamik von Feststoffen im Straßenabfluss** hängt vom **Gefälle** sowie vom **vorangegangen und aktuellen Niederschlagsgeschehen** ab. **Feine Partikel** werden eher als grobe mitgetragen. Grundsätzlich wird der AFS-Gehalt zunächst bei geringer Regenintensität und zu Beginn eines Regenereignisses durch auf der Straße wirkende **Suspendierungs- und Schleppkräfte begrenzt**. Bei länger anhaltenden Regen ist der AFS-Gehalt dann **materiallimitiert**.*

*Abhängig vom Standort und vom Niederschlagsgeschehen werden **nicht immer anfangs- oder endbetonte Feststoffspitzen** beobachtet.*

*In den **Straßenabfluss** werden abhängig vom Niederschlagsgeschehen **überwiegend die Feinanteile** eingetragen. Hier findet eine Retention der groben Fraktionen in Siebkörben sowie abhängig von der Niederschlagsintensität und der Straßeneinlaufkonstruktion eine Retention der sedimentierbaren Stoffe statt.*

### 2.3.3 Dachabfluss

Feststoffe im Dachabfluss können in der Dachhaut oder auch in der Dachrinne zurückgehalten werden. Abhängig vom Standort des Daches werden Dachrinnen gar nicht oder bis zu jährlich gereinigt. Das Material ist vermutlich eher grob, siehe auch Bild 2-14, Messungen dazu sind nicht bekannt.

Je nach weiterem Verlauf ist ein Rückhalt auch in Fallrohren möglich, siehe Bild 2-28.

Ein gezielter Rückhalt, z.B. bei einer nachfolgenden Nutzung des Regenwassers, kann durch eingebaute Fallrohrfilter erfolgen.

Bei Einleitung in den Kanal ist eine Retention der gröbereren Stoffe möglich. Feine Feststoffe werden analog zum Straßenablauf weiter in die Kanalisation geleitet.



Bild 2-28: Dachrinnenreinigung. Quelle: [Dachrinnenreinigung Seyffarth, 2013]

#### 2.3.4 Trenngebietsauslässe

In der Kanalisation werden Niederschlagsabflüsse unterschiedlicher Herkunft zusammengeführt und weitergeleitet. Hier findet eine Retention der überwiegend groben Feststofffraktion statt. In einer Untersuchung in einem Trenngebiet in Karlsruhe wurden beispielsweise nahezu alle Feststoffe im Kanalsediment mit einer Korngröße von  $> 60 \mu\text{m}$  identifiziert (30% größer als  $600 \mu\text{m}$ ). Die Fraktion  $< 60 \mu\text{m}$  ist kaum absetzbar und wird in suspendierter Form weitertransportiert. Im untersuchten Kanalsediment befanden sich nur etwa 2% Feststoffe mit einer Korngröße  $< 63 \mu\text{m}$  [Xanthopoulos und Hahn, 1993]. Noch feinere Anteile (etwa  $< 6 \mu\text{m}$ ), die, wenn sie nicht durch Wind und Turbulenzen verfrachtet wurden, in den Straßenablauf gelangt sind, verhalten sich nicht wesentlich anders als gelöste Stoffe und werden bis zum Zulauf zu einer dezentralen oder zentralen Anlage bzw. bis in den Gebietsauslass transportiert.

In Bild 2-29 ist ein möglicher und typischer Verlauf der Klassierung von Feststoffen während des Transportes nach [Fuchs et al., 2010a] dargestellt. Zusätzlich zu Verwehungen (äolische Verluste) der feinen Anteile und der Oberflächenspeicherung überwiegend grober Anteile findet eine Speicherung im Gully-Kanalsystem statt. Während die Grobstoffe (S+G) im Trennkanal von etwa  $4.000 \text{ kg}/(\text{ha}\cdot\text{a})$  auf  $100 \text{ kg}/(\text{ha}\cdot\text{a})$  abnehmen, reduzieren sich die Feianteile der Feststoffe (T+U) nur noch minimal von 500 auf  $400 \text{ kg}/(\text{ha}\cdot\text{a})$ .

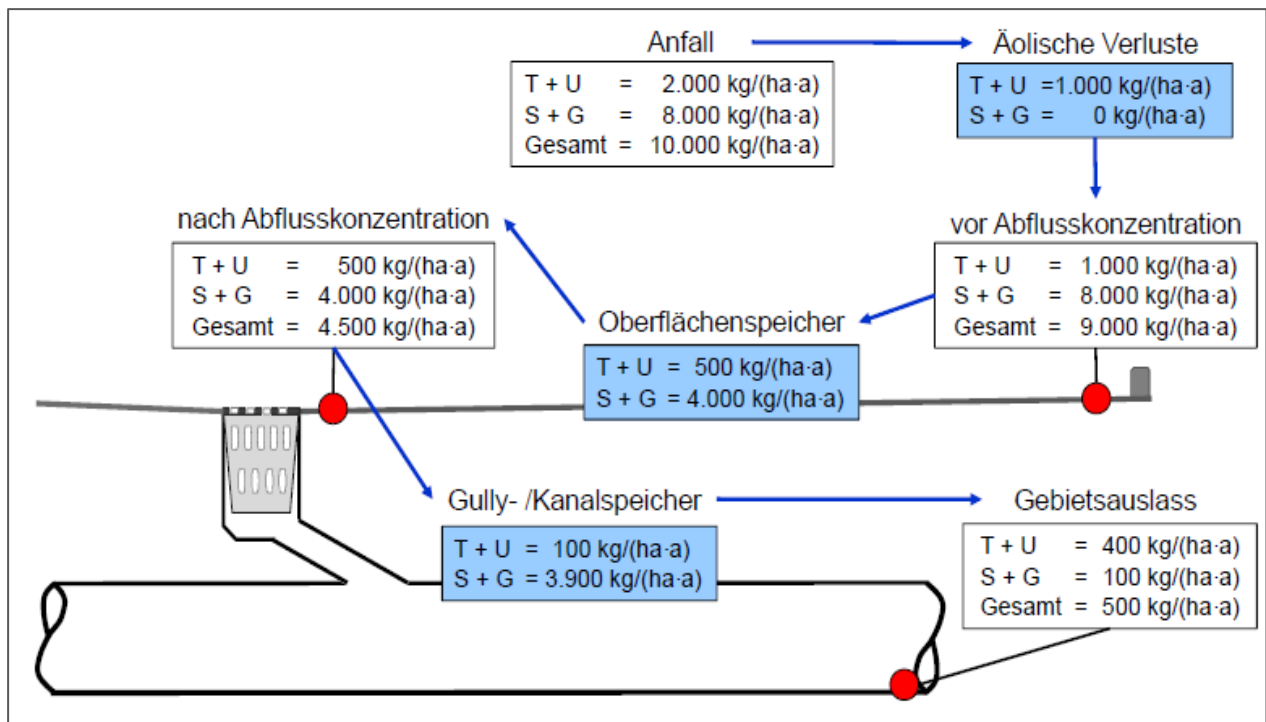


Bild 2-29: Klassierung und Sortierung von Feststoffen während des Transportes [Fuchs et al., 2010a]; T+U: Tone und Schluffe (i.A. < 63 µm); S+G: Sand und Kies

Eine Elimination der Feststoffe aus dem Kanalsystem kann allerdings nur stattfinden, wenn die Kanäle gespült und der Schlamm daraus entfernt wird. Das wird z.B. in den großen, flachen Trenngebietskanälen in Berlin und Hamburg praktiziert. In Berlin sind zusätzlich am Ende eines Kanalsystems oftmals Sandfänge vorhanden, in der ein weiterer Rückhalt grober Feststoffe stattfindet [Fuchs, 2013].

Je größer das Einzugsgebiet, desto länger ist der Transportweg eines Feststoffes und desto größer die Wahrscheinlichkeit der Retention bzw. Elimination. Dies ist sehr gut erkennbar an folgender Tabelle.

Aus Einzugsgebieten, die (wesentlich) kleiner als 0,5 ha sind, werden  $AFS_{ges}$ -Gehalte von 1.300 bis zu 6.000 kg/(ha·a) ausgetragen [Fuchs et al., 2010b], während in mittleren Einzugsgebieten zwischen 2 und 5 ha 600 bis 1.500 kg/(ha·a) [Rossi et al., 1997] und in Einzugsgebieten über 10 ha nur etwa 100 bis 1.000 kg/(ha·a)  $AFS_{ges}$  im Trenngebietsauslass nachgewiesen werden [Fuchs et al., 2010b]. Der sehr hohe Wert im Einzugsgebiet Wilmersdorf/Fennsee kann mit der hohen Anzahl an Alleebäumen und somit einer hohen Menge an Vegetationsabfällen erklärt werden. Der niedrige Wert im Einzugsgebiet Pücklerteich lässt sich mit der Art der Oberflächenbefestigung (Pflaster mit großen Fugen) sowie einer häufigen Straßenreinigung begründen [Fuchs, 2013].

Tabelle 2-5: AFS<sub>ges</sub>-Austrag aus Einzugsgebieten unterschiedlicher Größe, erweitert nach [Fuchs et al., 2010b]

| Einzugsgebiet       | Au<br>[ha] | AFS <sub>ges</sub><br>[kg/(ha·a)] | Quelle                    |
|---------------------|------------|-----------------------------------|---------------------------|
| A 113 neu           | 0,018      | 5.927                             | Fuchs et al., 2010b       |
| A 100               | 0,011      | 4.560.                            | Fuchs et al., 2010b       |
| Höxter              | 0,030      | 2.512                             | Pick et al., 2002         |
| Hildesheim          | 0,410      | 2.100                             | Grottker, 1987            |
| Augsburg            | 0,001      | 1.300                             | Nadler u. Meißner, 2004   |
| Genf-Avanchets      | 4,6        | 1.437                             | Rossi et al., 1997        |
| Lausanne-Rumine     | 2,3        | 1.356                             | Rossi et al., 1997        |
| Lausanne -Budron    | 5,7        | 868                               | Rossi et al., 1997        |
| Genf-Marziano       | 1,8        | 831                               | Rossi et al., 1997        |
| Lausanne-Ouchy      | 1,7        | 636                               | Rossi et al., 1997        |
| Wilmersdorf/Fennsee | 90,0       | 1.130                             | Fuchs et al., 2006        |
| Adlershof           | 45,0       | 344                               | Grotehusmann et al., 2005 |
| Wilmersdorf         | 12,7       | 337                               | Terzioglu et al., 1987    |
| Biesdorf            | 50,8       | 327                               | Lambert et al., 2005      |
| Rudower Felder      | 14,1       | 305                               | Schütte, 2001             |
| Reinickendorf       | 12,6       | 212                               | Heinzmann, 1993           |
| Pücklerteich        | 23,0       | 103                               | Grotehusmann et al., 2009 |

*Im Einzugsgebiet findet eine Klassierung der Feststoffe statt. Während die groben Feststoffe auf der Straßenoberfläche und im Kanal zurückbleiben, ist die Reduktion der feinen Feststoffe, die im Niederschlagsabfluss gelandet sind, klein. Je kleiner ein Einzugsgebiet ist, desto mehr grobe Feststoffe werden aus der Kanalisation ausgetragen. In großen Einzugsgebieten ist ein Rückhalt oder eine Elimination grober Feststoffe wahrscheinlicher.*

## 2.4 Korngrößenverteilung abfiltrierbarer Stoffe

Abfiltrierbare Stoffe im Niederschlagsabfluss weisen je nach Herkunft unterschiedliche Korngrößen auf. Dies ist in Bild 2-30 dargestellt.



Staubniederschläge setzen sich, wie bereits erwähnt, aus Feststoffen mit Korngrößen von etwa 1 µm bis etwa 200 µm sowie gelösten Anteilen zusammen. Darin enthaltene Pollen sind meistens kleiner als 100 µm.

Verkehrsbedingte Einträge umfassen in ihrer Gesamtheit das gesamte Spektrum von gelöst über fein im µm-Bereich bis sehr grob mit Korngrößen im mm-Bereich. Hier hängt der Korngrößenbereich von der Art der Emission (Ruß, Abrieb, Korrosion) ab.

Auch der Dachabrieb und Korrosionsprodukte aus Dachmaterialien können das gesamte Korngrößenspektrum umfassen.

Dies gilt ebenso für Einträge aus der Vegetation (Blüten, Laub), für Bodenerosion sowie für landwirtschaftliche Einträge. Einträge aus Bautätigkeiten können aus Feststoffen im gesamten Korngrößenspektrum bestehen.

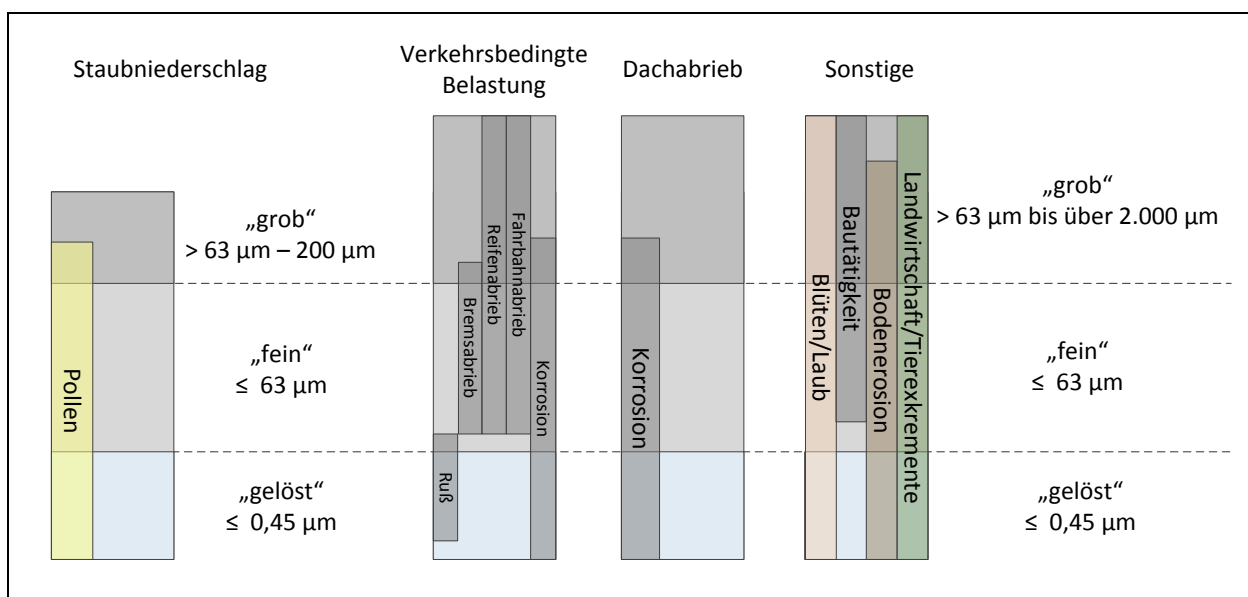


Bild 2-30: Korngrößen von Einträgen in Niederschlagsabflüssen (qualitativ) (eigene Darstellung)

Die folgenden Kapitel stellen Erkenntnisse aus Messreihen und Untersuchungen zusammen, um den Korngrößenbereich der Feststoffanteile bis 63 µm im Niederschlagsabfluss zu quantifizieren. Zunächst erfolgt im Kapitel 2.4.1 eine eindeutige Definition der Fraktion der feineren Anteile abfiltrierbarer Stoffe in Niederschlagsabflüssen.

Eine Interpretation einiger Veröffentlichungen ist schwierig, da die Mess- und Probenaufbereitungsmethode teilweise unterschiedlich war bzw. nicht ausreichend beschrieben wurde. Ein wichtiger Punkt ist z.B. die Probenvorbehandlung. Je länger die Proben eines Niederschlagsabflusses vor der Analyse aufbewahrt werden, desto mehr Agglomerate können sich bilden. Um methodisch zu gleichen Ergebnissen zu kommen, empfiehlt es sich, die Feststoffe bei der Probenvorbehandlung in die Primärpartikel zu zerteilen. Bei der Interpretation der Ergebnisse wäre also die An-

gabe der Dauer der Probenaufbewahrung bzw. die Angabe über die Probenvorbehandlung sehr wichtig.

Ein weiterer Punkt ist, dass abhängig von den Randbedingungen im Abfluss (pH-Wert, oxidierendes oder reduzierendes Milieu, vorhandene Begleitungen etc.) Inhaltsstoffe gelöst oder partikulär vorliegen können. Ein Beispiel dafür sind Metalle, die in einem sauren Dachabfluss gelöst anfallen, aber bei Berührung mit basischen Betonmaterialien oder bei Mischung mit Niederschlagsabflüssen mit höheren pH-Werten ausfallen und zum Feststoffgehalt beitragen.

#### 2.4.1 Definition PM63 (AFS<sub>fein</sub>)

Der Parameter PM63 (particulate matter  $\leq 63 \mu\text{m}$ ), bisher auch oft als AFS<sub>fein</sub> oder als T+U bezeichnet, ist bislang in keiner Norm oder Richtlinie definiert worden. Er stellt die Fraktion der feineren Anteile der abfiltrierbaren Stoffe im Korngrößenbereich  $\leq 63 \mu\text{m}$  dar, dies entspricht der aus der Bodenkunde kommenden Grenze zwischen den sedimentierbaren Sanden ( $> 63 \mu\text{m}$ ) und den weniger bis nicht sedimentierbaren Schluffen ( $\leq 63 \mu\text{m}$ ) dar. Dieser Wert wiederum stammt aus im englischsprachigen Raum gebräuchlichen Siebgrößen. 2,5/1000 Zoll entsprechen  $63,5 \mu\text{m}$ .

Bei der Bestimmung dieses feinen Feststoffanteils wird die Probe zunächst durch einen Sieb mit einer Maschenweite von  $63 \mu\text{m}$  gesiebt und dann über einen Filter mit einer bestimmten Porengröße (etwa zwischen  $0,45 \mu\text{m}$  und  $12 \mu\text{m}$ ) gefiltert. Da die zu verwendende Porengröße in der entsprechenden DIN (näheres dazu siehe Kapitel 2.1) offen gelassen wird, ist oftmals nicht klar, welche Fraktionen tatsächlich enthalten sind. Dies kann je nach verwendeter Trennschärfe den Gehalt einer Probe um einige Prozentpunkte verschieben. [Kreiling, 2012] fand z.B. in pollenbelastetem Dachabfluss einer zweimonatigen Messkampagne etwa 1/3 der feinen abfiltrierbaren Stoffe  $< 63 \mu\text{m}$  in der Korngröße von  $0,45 \mu\text{m}$  bis  $25 \mu\text{m}$  vor.

Oftmals wird ein Membran- oder Glasfaserfilter mit einer Porenweite von  $0,45 \mu\text{m}$  verwendet, dies stellt sicher, dass nur die als gelöst geltenden Stoffe den Filter passieren.

*Im Folgenden wird der PM63 als Feinpartikel im Niederschlagswasser mit einer Korngröße von 0,45 bis 63  $\mu\text{m}$  definiert, sofern nichts anderes beschrieben wird (Siebung der Probe über ein 63 $\mu\text{m}$ -Sieb und Filtration über Filter mit einer Porengröße von 0,45  $\mu\text{m}$ ).*



## 2.4.2 Staubniederschlag

[Gruber, 1981] untersuchte sehr intensiv die Zusammensetzung des Staubniederschlags in der Stadt Linz in den Jahren 1973 bis 1978. Die Korngrößenverteilung bezogen auf die Masse an acht Messstellen sowie der arithmetische Mittelwert daraus sind in Bild 2-31 dargestellt.

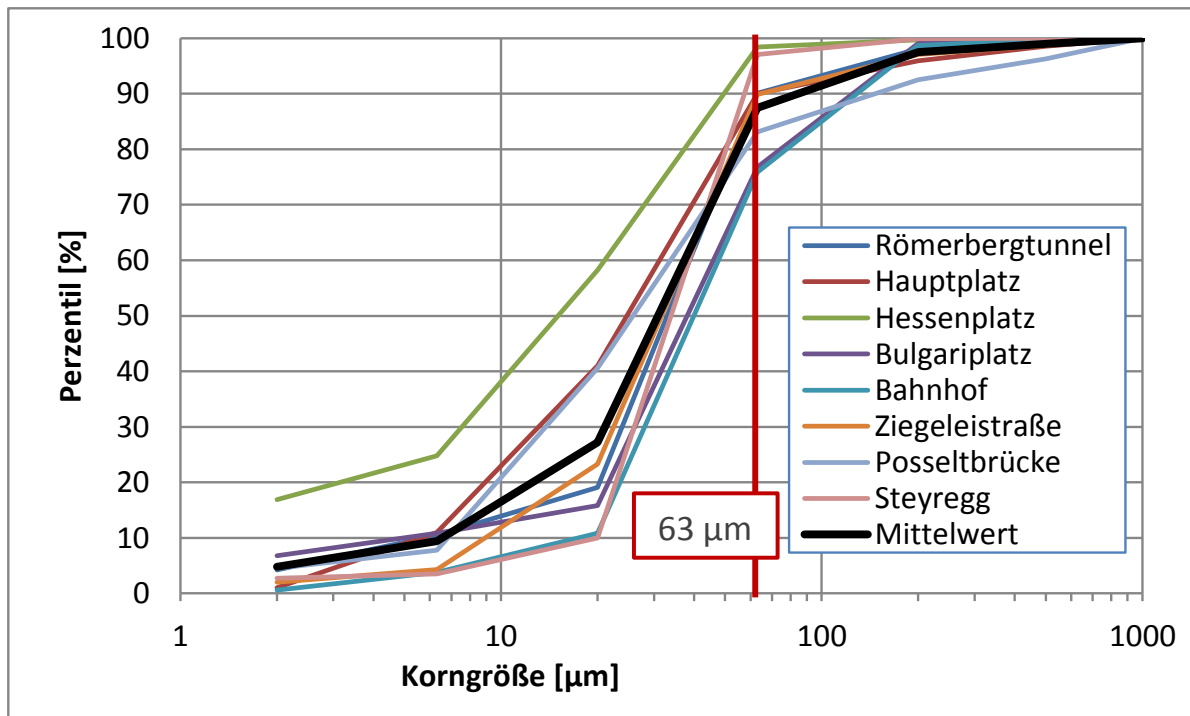


Bild 2-31: Korngrößenverteilung im Staubniederschlag der Stadt Linz, Messungen 1973 und 1974, aus [Gruber, 1981]

Nach dieser Darstellung ist der Korngrößenbereich kleiner  $63 \mu\text{m}$  mit etwa 75% bis 95%, im Mittel mit 88% im Staubniederschlag enthalten.

Der Staubniederschlag ist jedoch insbesondere in den 70er und 80er Jahren aufgrund von Minderungsmaßnahmen gerade in Industrie- und Verbrennungsprozessen nicht nur absolut stark gesunken [Landesumweltamt Brandenburg, 2002], sondern hat sich vermutlich auch von der Zusammensetzung her geändert.

In Bild 2-32 ist die Korngrößenverteilung im Gesamtstaub verschiedener Herkunft in Kalifornien, USA, dargestellt. Mineralischer Staub und Baustellenstaub liegen danach überwiegend im Bereich  $> 10 \mu\text{m}$  bis  $200 \mu\text{m}$  vor. Staub aus verschiedenen Verbrennungsprozessen ist dagegen wesentlich feiner mit einem überwiegenden Korngrößenbereich  $< 1 \mu\text{m}$ .

Staub- und Rußfilter halten Partikel oberhalb einer bestimmten Korngröße zurück, daher müsste der Staub aus Verbrennungsprozessen, die mittlerweile mit Filtern ausgestattet sind, feiner geworden sein. Für Stäube aus Verbrennungsprozessen, die mit einer dem heutigen Stand der Technik entsprechenden effizienten Entstaubungsanlage (Gewebefilter) ausgestattet sind, wird von einem Feinstaub-Anteil mit middle-

ren aerodynamischen Durchmessern  $< 10 \mu\text{m}$  von mindestens 90 % ausgegangen [Grotz und Langer, 2007], zitiert aus [Dreiseidler und Baumbach, 1999] und [LfU, 2000].

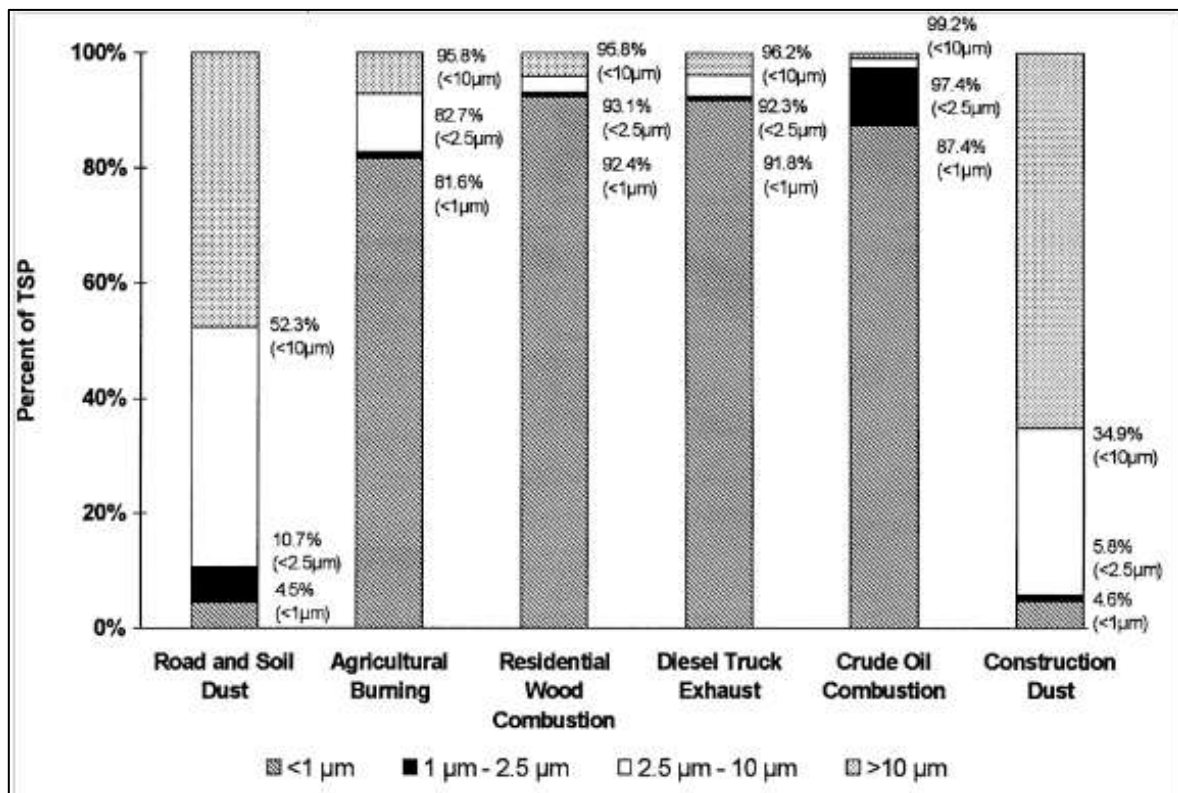


Bild 2-32: Größenverteilung verschiedener Partikelquellen in Kalifornien, USA, aus [Watson und Chow, 2000]

Da wiederum Aktivitäten wie Feldabbrennen oder das Verbrennen von Gartenabfällen seit der Zeit der Untersuchung in Linz gänzlich verboten wurden und der Hausbrand mit Kohle zurückgegangen ist, fehlt dieser Feianteil gänzlich im heutigen Staubbiederschlag und die Zusammensetzung insgesamt müsste sich leicht in Richtung „grob“ verschieben.

Neuere Untersuchungen aus Australien ergaben einen Anteil der Partikelgröße  $< 63 \mu\text{m}$  im Staubbiederschlag aus Bulksammlern von etwa 70% an vier Straßenstandorten sowie von 33 bis 85% an vier unterschiedlich genutzten Standorten (Industriegebiete oder Gebiete mit gemischter Nutzung (Wohnen, Industrie, Autobahnnähe)) [Gunawardena, 2012].

*Der Anteil an PM<sub>63</sub> im Staubbiederschlag liegt je nach Aktivitäten im Einzugsgebiet im Bereich von 33% bis 90%, häufig zwischen 70 und 90%.*

### 2.4.3 Verkehrsflächenabfluss

Die veröffentlichten Daten zu Kornverteilungen von Feststoffen in Verkehrsflächenabflüssen sind nicht sehr umfangreich und widersprüchlich. Eine Interpretation ist außerdem schwierig, da sich Probennahme, Analytik und auch die Auswertung der Daten unterscheiden bzw. nicht dokumentiert sind. Oft werden vor einer Messung der Partikelverteilung grobe bzw. sedimentierbare Stoffe separiert, so dass sich die prozentualen Angaben nur auf einen Korngrößenbereich z.B.  $< 150 \mu\text{m}$  oder  $< 300 \mu\text{m}$  beziehen. Feine Feststoffe agglomerieren zum Teil zu größeren Partikeln, so dass das Ergebnis auch abhängig von der Messmethode (Darstellung der Primärpartikel oder der Agglomerate) sehr unterschiedlich sein kann.

Der Feststofffeinanteil in Niederschlagsabflüssen liegt nach [DWA, 2010] abhängig von Niederschlagsgeschehen, Straßenreinigungsintervallen und weiteren Randbedingungen im Einzugsgebiet bei 10% bis 90%, im Mittel bei etwa 50%. [Xanthopoulos und Hahn, 1993] konnten einen Bereich von 4 bis 33% PM<sub>63</sub> im Straßenabfluss verschiedener Einzugsgebiete in Karlsruhe identifizieren. Eine Stichprobe aus einer Straße in Burgdorf (17.000 DTV) ergab mehr als 90% an PM<sub>63</sub> mit einem Peak bei unter  $10 \mu\text{m}$ .

[Lygren et al., 1984] bestimmten die Kornverteilung von Straßenabflüssen mit einer DTV von 8.000 ( $n = 20$ ) über die Sinkgeschwindigkeit. Der Anteil an Partikeln mit einer kleineren Sinkgeschwindigkeit als  $8,5 \text{ cm/min}^2$  betrug zwischen 18,5 und 92 %, im Mittel 62%.

[Legret und Pagotto, 1999] ermittelten im Abfluss einer Autobahn bei Nantes 82,4 % der Feststoffe mit einem Korndurchmesser von unter  $200 \mu\text{m}$ .

[Aryal et al., 2005] werteten den Verlauf der feinen Fraktion  $< 45 \mu\text{m}$ , der groben Fraktion und der Gesamtfraktion von vier Ereignissen in Autobahnabflüssen in der Schweiz aus. In drei Ereignissen konnten etwa 70% an feinen Anteilen  $< 45 \mu\text{m}$  abgelesen werden, in einem weiteren Ereignis ca. 45%.

In Bild 2-33 sind die Kornverteilungen von Straßenstäuben und in Bild 2-34 von Straßenabflüssen aus Untersuchungen aus Australien bzw. USA und Europa dargestellt.

Es zeigt sich, dass Straßenstäube gröber als Feststoffe in Straßenabflüssen sind, vgl. auch Kapitel 2.3.1. PM<sub>63</sub> werden im Straßenstaub in einer Bandbreite von 2% bis maximal 18 %, im Schwerpunkt etwa 10%, gefunden. Das Maximum der Korngröße liegt bei 3.000 bis über  $10.000 \mu\text{m}$ .

---

<sup>2</sup> Korngröße vermutlich etwas größer als ca.  $50 \mu\text{m}$ , abgeschätzt aus der Stoke'schen Beziehung zwischen Sinkgeschwindigkeit und Korndurchmesser für Sandkörner

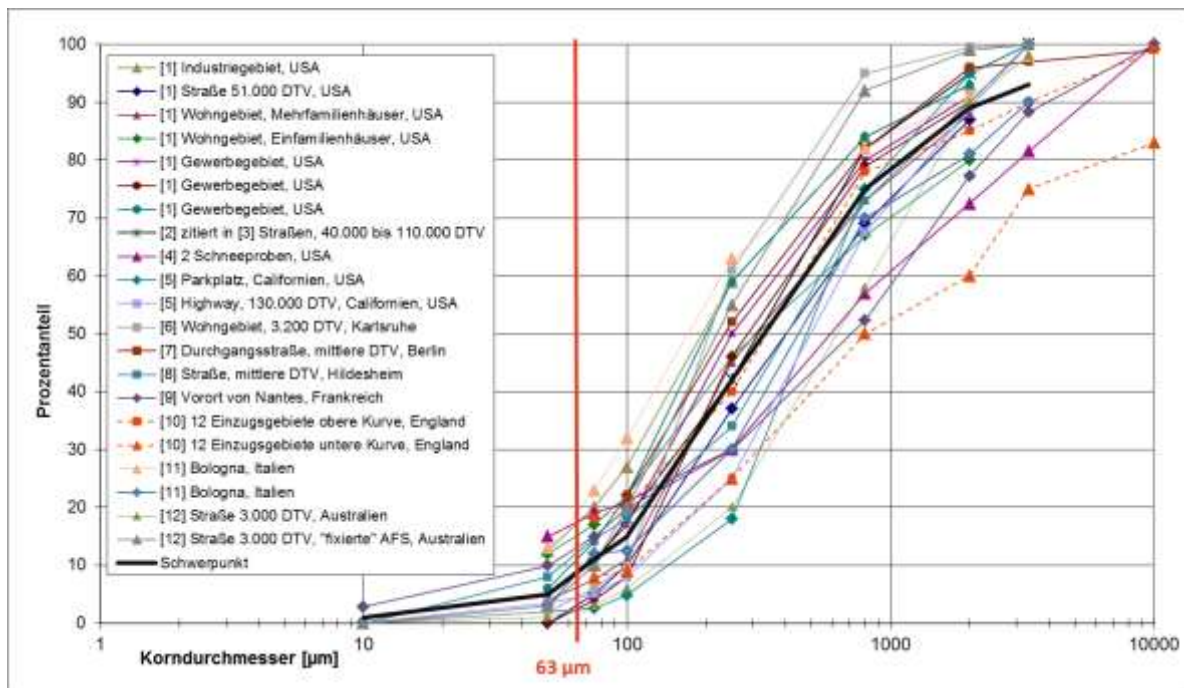


Bild 2-33: Sieblinien von Straßenstäuben.

Messpunkte teilweise abgelesen oder angepasst an andere Korngrößen

Literatur: [1] Lau und Stenstrom, 2005; [2] Shaheen, 1975; [3] Brunner, 1977; [4] Sansalone und Buchberger, 1996; [5] Kayharian et al., 2012; [6] Xanthopoulos und Hahn, 1993; [7] Sommer, 2007; [8] Grottker, 1987; [9] Colandini, 1997; [10] Butler und Clark, 1995; [11] Bolognesi et al., 2008; [12] Vaze und Chiew, 2002

Für Kornverteilungen in Straßenabflüssen sind leider noch weniger Daten vorhanden. Aus Bild 2-34 ist zu erkennen, dass die Feianteile von Feststoffen in Straßenabflüssen  $< 63 \mu\text{m}$  etwa 40% bis 90%, im Schwerpunkt 60 bis 70% betragen.

Die Ermittlung der Korngrößenverteilung des Straßenabflusses aus der USA an einer Stadtautobahn mit 130.000 DTV ( $n = 5$ ) erfolgte nach Trocknung und Siebung, eventuell weicht das Ergebnis daher von den anderen Untersuchungen ab.

Der maximale Korndurchmesser der Feststoffe liegt meist unter  $2.000 \mu\text{m}$ , der der in Australien und der Schweiz beprobten Niederschlagsabflüsse unter  $400 \mu\text{m}$ .

Dies liegt neben Unterschieden der Straßenreinigung oder der Niederschlagsintensitäten auch an der Probenaufbereitung. In der Studie aus der Schweiz wurden nur Korngrößen  $< 400 \mu\text{m}$  ausgewertet [Furumai et al., 2002]. In einer hier nicht dargestellten Studie aus Australien wurden Feststoffe  $> 710 \mu\text{m}$  vor der Partikelanalyse entfernt [Drapper et al., 2000]. Dies lässt eine ähnliche Vorgehensweise der Probenvorbehandlung in den in Bild 2-34 dargestellten australischen Studien vermuten.

Auch die Jahreszeit kann eine Rolle bei der Kornverteilung in Abflüssen spielen. [Kreiling, 2012] fand in zwei Stichproben eines Regenereignisses im Straßenabfluss einer Straße mit DTV  $< 300$  im Mittel relativ viel feines Material (80% PM<sub>63</sub>) während der Vegetationszeit (Pollen).

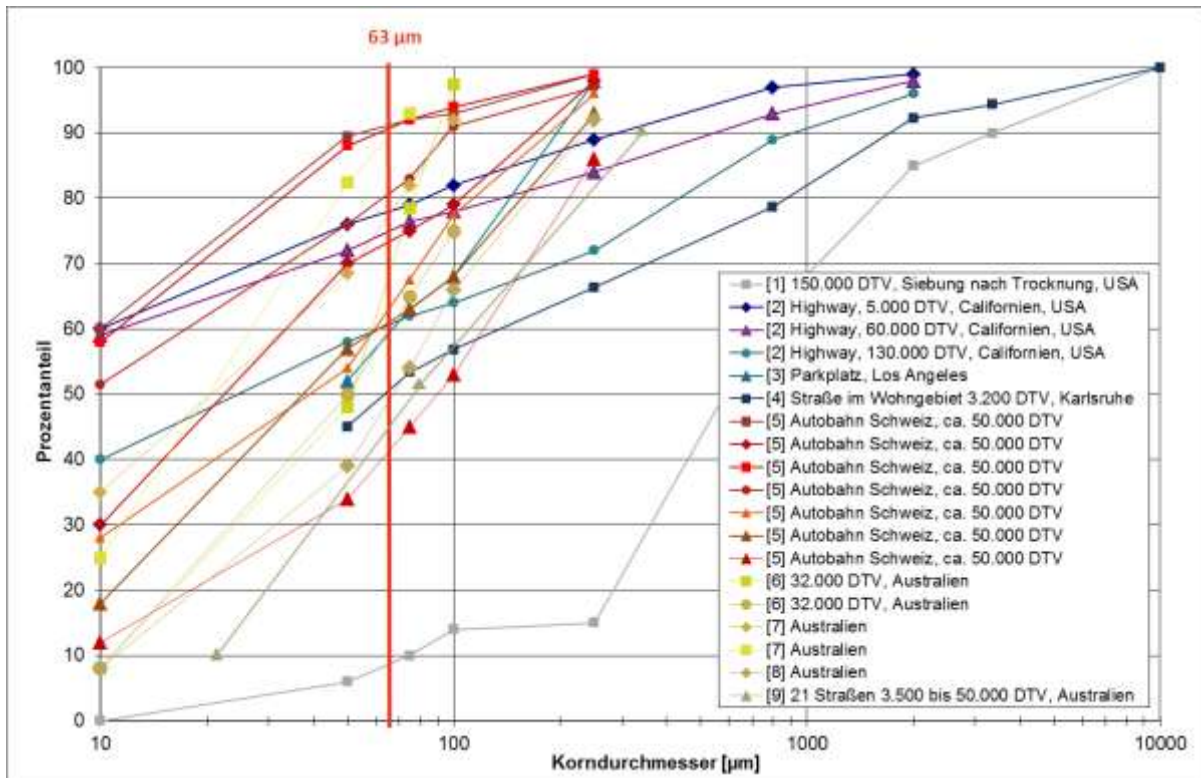


Bild 2-34: Sieblinien von Straßenabflüssen  
 Messpunkte teilweise abgelesen oder angepasst an andere Korngrößen  
 Literatur: [1] Sansalone und Buchberger, 1996; [2] Kayhanian et al., 2012; [3] Lau et al., 2001; [4] Xanthopoulos und Hahn, 1993; berechnet aus Angaben zu Korngrößen und Konzentrationen; [5] Furumai et al., 2002; [6] Lloyd und Wong, 1999; [7] Drapper, 1998; [8] Ball und Abustan, 1995 (zitiert in [7]), [9] Drapper et al., 1999

[Furumai et al., 2002] stellten darüber hinaus fest, dass die Kornverteilung in Niederschlagsabflüssen von der AFS-Gesamtbelastung abhängt. Sie fanden an einer einzigen Messstelle einer Autobahn in der Schweiz zwischen 40 und 90 % Feinanteil in den Niederschlagsabflussproben (n = 9), der umso kleiner war, je mehr Gesamtfeststoffe der Niederschlagsabfluss enthielt.

**Straßenstaub** weist eine Kornverteilung bis über 10.000 µm auf, wobei der PM63-Anteil etwa 10 % (3 bis 20%) beträgt.

**Straßenabflüsse sind in der Regel feiner.** Die größten Partikel liegen meist unter 2.000 µm. Der Feinanteil kann je nach Größe des Einzugsgebietes und Randbedingung im Einzugsgebiet (oder auch der Probennahme oder -vorbereitung) sehr unterschiedlich sein und zwischen 40% und 90% liegen. Er liegt im Schwerpunkt bei etwa 60% bis 70%. Hier wären weitere Untersuchungen wünschenswert.

Es gibt einen **Zusammenhang des Feinanteils zur Gesamtfeststoffkonzentration**: Der Feinanteil sinkt mit steigendem Feststoffgehalt.



#### 2.4.4 Dachabfluss

Es wird im Allgemeinen davon ausgegangen, dass abfiltrierbare Stoffe im Dachablauf Korngrößen unter  $63\ \mu\text{m}$  aufweisen und daher vollständig dem  $\text{PM}_{63}$  zuzuordnen sind [DWA, 2010]. Der Staubniederschlag, oft der Hauptbestandteil des Dachabflusses, weist jedoch Korngrößen bis zu  $200\ \mu\text{m}$  auf und ist somit teilweise bereits größer als  $63\ \mu\text{m}$ . Auch Korrosionsprodukte im Dachablauf können größer als  $63\ \mu\text{m}$  sein, vgl. Bild 2-15. Die Kornverteilungen von Dachabrieb sind je nach Material und Regenintensität vermutlich auch größer.

[Kreiling, 2012] fand während einer zweimonatigen Messkampagne in pollenbelasteten Dachabflüssen im Mittel etwa 56% an Feststoffen  $> 63\ \mu\text{m}$ . In den nicht pollenbelasteten Proben, die durch die Färbung als solche identifiziert werden konnten, betrug der Feststoffanteil  $> 63\ \mu\text{m}$  sogar 72% bis 95%.

Die Konzentrationen der Einzelereignisse sind in Bild 2-35 dargestellt.

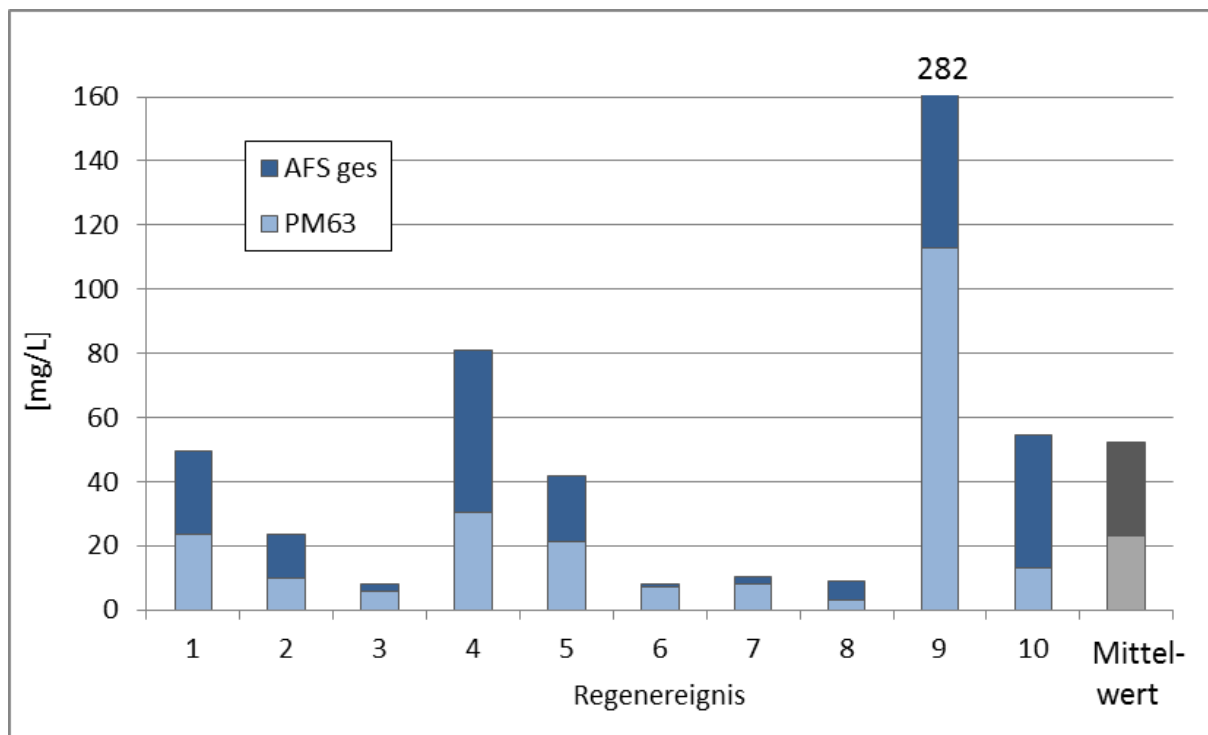


Bild 2-35:  $\text{AFS}_{\text{ges}}$  und  $\text{PM}_{63}$  im Abfluss eines Dachs in Darmstadt-Eberstadt während der Pollenflugphase, [Dierschke, Welker, 2013] verändert nach [Kreiling, 2012]

Weitere Untersuchungen, um den  $\text{PM}_{63}$ -Gehalt im Dachabfluss zu quantifizieren, wären notwendig, um allgemeingültige Aussagen zu erhalten und zwar abhängig von den verschiedenen möglichen Randbedingungen.

*Die einzelnen **Inhaltsstoffe im Dachabfluss** wie Staubniederschlag, Pollen oder Dachabrieb weisen teilweise **Korngrößen > 63 µm** auf, somit kann die These, dass Feststoffe in Dachabflüssen grundsätzlich < 63 µm sind, nicht aufrechterhalten werden.*

*Zur Quantifizierung wären weitere Untersuchungen wünschenswert.*

## **2.4.5 Sonstige**

Einträge aus der Bodenerosion, aus landwirtschaftlichen Tätigkeiten sowie aus Baustellenstaub- und -verschmutzungen in Niederschlagsabflüsse können das gesamte Spektrum von gelöst über PM<sub>63</sub> bis zu Partikeln größer 2.000 µm umfassen. Untersuchungen hierüber sind nicht bekannt.

## **2.5 Zusammensetzung von Staubniederschlag und Feststoffen in Niederschlagsabflüssen**

Der Parameter „Feststoff“ lässt keine Rückschlüsse über die Schädlichkeit auf Gewässer oder darin lebende Organismen zu. Abhängig von seiner Herkunft und seinen Eigenschaften (Korngröße, spezifisches Gewicht, Zusammensetzung) kann diese sehr unterschiedlich sein.

In diesem Kapitel werden mögliche Inhaltsstoffe im Staubniederschlag und in Feststoffen des Niederschlagsabflusses, ausführlicher als teilweise bereits im Kapitel 2.1 geschehen, Zusammenhänge von Schadstoffen zur Kornverteilung der Feststoffe sowie Konzentrationsbereiche der Inhaltsstoffe beschrieben.

### **2.5.1 Staubniederschlag**

Die Entstehung von Staubniederschlag sowie die Grenzwerte nach TA Luft und der empfohlene Depositionswert des Länderausschusses für Immissionsschutz (LAI) für die Summe an polychlorierten Biphenylen (PCB) und polychlorierten Dibenzop-dioxinen und Dibenzofuranen (PCDD/PCDF) sind bereits in Kapitel 2.2.1 behandelt worden. Im Staubniederschlag sind Feststoffe in einem Größenspektrum von etwa 1 bis 200 µm und daran haftende (Schad-)stoffe, die in einem Einzugsgebiet in die Luft emittiert werden, enthalten. Der in einem Gebiet mit seinen Inhaltsstoffen erfasste Staubniederschlag stellt demnach das Spektrum der Aktivitäten im Einzugsgebiet dar. Insbesondere die feinen, nicht absetzbaren Anteile des Feinstaubs können auch aus dem Einzugsgebiet hinaus transportiert werden oder aus anderen Einzugsgebieten eingetragen werden.

In einer sehr ausführlichen Untersuchung des Staubbiederschlags in Arnoldstein in Österreich [UBA, 2006] wurden die Inhaltsstoffe analysiert und unterteilt in einen „geogenen“ und „anthropogen/technologischen“ Phasenbestand. In verschiedenen Proben wurden aus geogener Herkunft am häufigsten Glimmer, Quarz und Feldspat, aber auch Calcit, Dolomit, Titanit, Magnetit, Gips, Blei- und Kupferglanz oder Eisenhydroxid gefunden, die in der Summe als anorganische Bestandteile zusammengefasst werden können. Der anthropogen/technologische Phasenbestand war weitaus vielfältiger und abhängig von der Probe differenzierter. Häufig wurden die anorganischen Bestandteile metallisches Eisen, Magnetit, Calciumsilikate, Blei und Kupfer in unterschiedlichen Formen, Gips als Bestandteil von Bauschutt, zahlreiche Elemente in Schlacken (Ca, P, K, Si, S, Mn, Mg, Fe, Ti, Cl, Zn, Na, Al...) oder globulares Glas gefunden, sehr häufig Kunststoffe mit wiederum zahlreichen Einzelementen, Koks, Kohle oder globulares kohliges Material, Abriebpartikel je nach Herkunft mit den Einzelbestandteilen Ruß, Eisen, Messing, Kupfer, Silikaten und anderen.

In Abgasen aus dem Straßenverkehr können folgende Stoffe enthalten sein: Stickoxide, Kohlenstoffmonoxide, Ruß, Kohlenstoff, Blei, Schwefel, Chlor, Magnesium, Natrium, Kupfer, Zink, Kohlenwasserstoffe, PAK, Phenole, PCDD/PCDF [Helmreich et al., 2005].

Organisches Material und damit Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor sind im Staubbiederschlag insbesondere in der Vegetationszeit durch den Eintrag von Pollen oder Blüten- und Laubbestandteile in die Luft enthalten, vgl. auch Kap. 2.2.5.

Gemessen wird der Staubbiederschlag insbesondere da, wo er problematisch ist bzw. sich dem Grenzwert der TA Luft nähert oder ihn sogar übersteigt. An Schwermetallen werden oft Blei, Cadmium, Arsen, Nickel, Chrom, Kupfer, Zink und Eisen gemessen. Wenn organische Schadstoffe gemessen werden, dann sind es die zahlreiche Einzelstoffe der polychlorierten Biphenyle (PCB) oder der polychlorierten Dibenzo-p-dioxinen und Dibenzofuranen (PCDD/PCDF).

Da sowohl der Staubbiederschlag als auch problematische Inhaltsstoffe seit den 1990er Jahren im Westen Deutschlands und seit den 2000er Jahren auch im Osten Deutschlands immer mehr zurückgehen, wird die Messaktivität an einigen Stellen bereits reduziert. So wurde z.B. die Anzahl der Messstellen im Stadtgebiet von Duisburg im Jahr 2002 von 238 auf 114 verringert. Staubbiederschlag und die darin enthaltenen metallischen Inhaltsstoffe wie Blei, Cadmium, Nickel und Arsen werden nur noch im Umfeld potenzieller Emittenten bestimmt [Stadt Duisburg, 2012].

Beispielhaft ist in Bild 2-36 die Karte für Bleibestimmungen im Land Nordrhein-Westfalen für das Jahr 2011 dargestellt, aus der hervorgeht, dass insbesondere in Lünen und Duisburg Grenzwertüberschreitungen für Blei auftraten. Als Grund dafür ist in Duisburg die Schrottverwertung im Duisburger Hafen und in Lünen eine Kupferhütte sowie Recyclingbetriebe ebenfalls am Hafen zu nennen [LANUV, 2011].



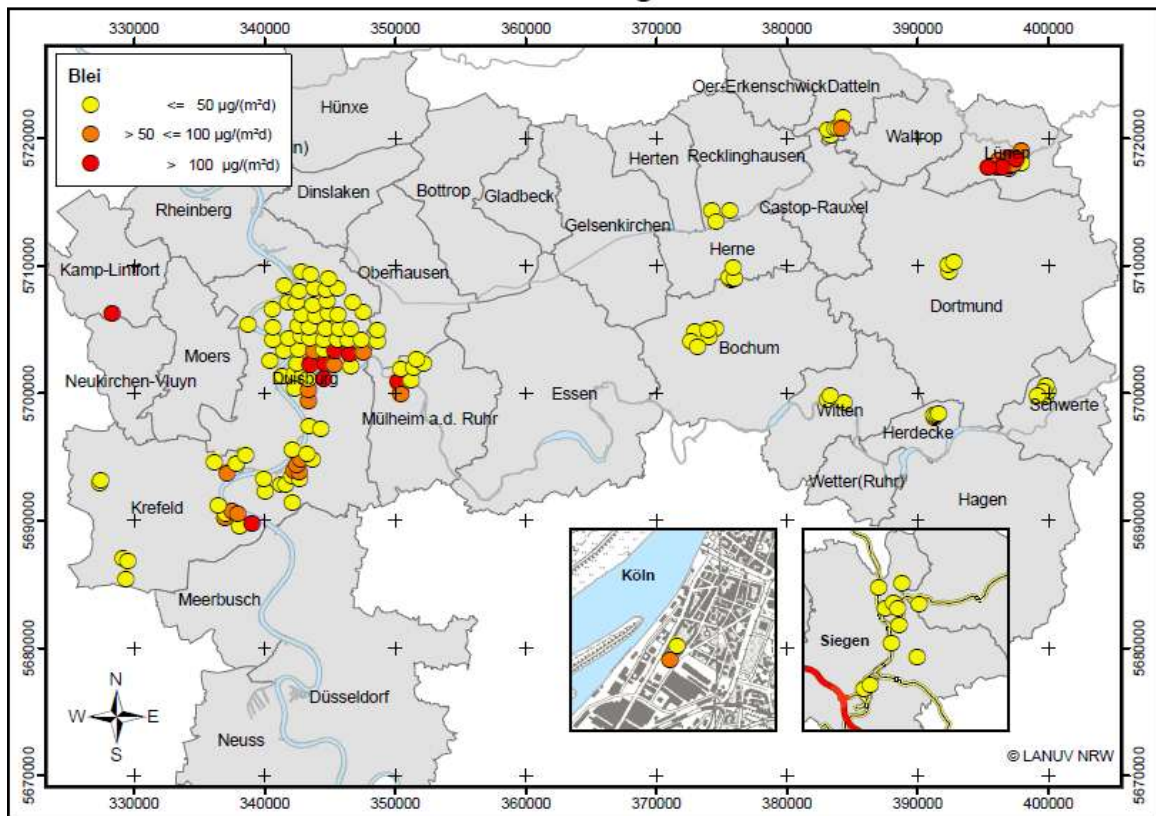


Bild 2-36: Blei im Staubniederschlag im Jahr 2011 in NRW, [LANUV 2012c]

Aus Bild 2-37 ist zu erkennen, dass an einigen problematischen Messstellen in NRW auch der empfohlene Depositionswert für PCB und PCDD/PCDF (4 pg WHO-TEQ/(m<sup>2</sup> · d)) überschritten wird.

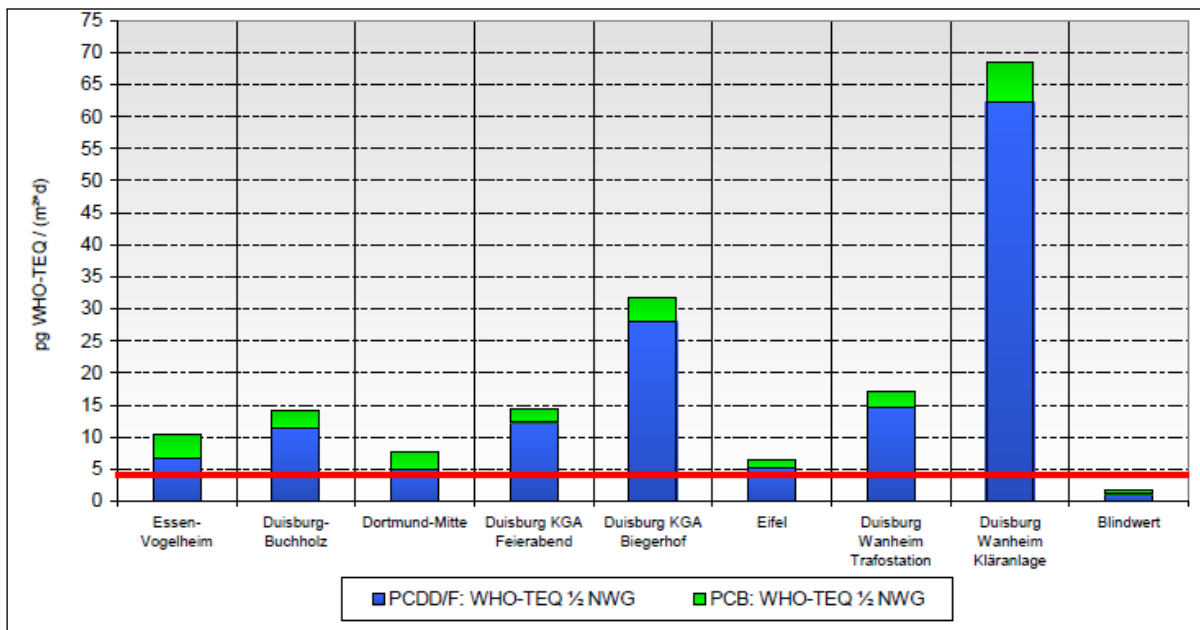


Bild 2-37: PCDD/PCDF und PCB im Staubniederschlag im Jahr 2011 in NRW – Grenzwert 4 pg WHO-TEQ/(m<sup>2</sup> · d) [LANUV 2012c]

*Die Qualität des Staubniederschlags gibt im Wesentlichen die Aktivitäten im Einzugsgebiet wieder. Abhängig davon kann er sehr unterschiedlich zusammengesetzt sein und eine Vielzahl der vorkommenden Elemente sowie eine Vielzahl von Molekülen geogener oder technisch/anthropogener Herkunft enthalten.*

## 2.5.2 Verkehrsflächenabfluss

Im Verkehrsflächenabfluss finden sich alle Inhaltsstoffe wieder, die auch im Staubniederschlag enthalten sind. Zusätzlich kommen Inhaltsstoffe aus dem Kraftfahrzeugverkehr hinzu. Diese wurden nach [Helmreich et al., 2005] erweitert und sind in Tabelle 2-6 den Stoffquellen zugeordnet.

Je nach Straßentyp und Umgebung sind außerdem Abfälle, tierische Exkreme und insbesondere auf Schnellstraßen tierische Reste vorhanden.

Nach erfolgter Bewertung der öko- oder humantoxikologischen Relevanz kann die Bedeutung eines Schadstoffes für die Umwelt nach [Moy et al., 2002], zitiert in [Geiger-Kaiser und Jäger, 2005], anhand der Häufigkeit des Auftretens in Kombination mit der relativen Überschreitung der jeweiligen Bestimmungsgrenze beurteilt werden. Bei der Beprobung an der österreichischen A1 [Geiger-Kaiser und Jäger, 2005] wurden z.B. nach dieser Methode die Schwermetalle Aluminium, Kupfer, Eisen und Zink als signifikant eingestuft, Blei, Cadmium, Chrom, Kobalt und Nickel dagegen nicht. An gemessenen PAK wurden vier Einzelverbindungen als signifikant eingestuft, zwei weitere jedoch nicht. Auch die Summe an KW wurde hier mit einem mittleren Gehalt unterhalb der Bestimmungsgrenze (0,03 mg/l) als potenziell nicht signifikant bewertet. An weiteren teilweise partikulär vorliegenden Stoffen wurden CSB, TOC und  $P_{\text{ges}}$  als signifikant eingestuft. In anderen Einzugsgebieten kann diese Vorgehensweise zu anderen Ergebnissen führen, da die Schadstoffkonzentrationen unterschiedlich und abhängig von den Aktivitäten im Einzugsgebiet sind.

In einer von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Studie wurden Konzentrationsbereiche von Schwermetallen und anderen Schadstoffen in Verkehrsflächenabflüssen ausführlich recherchiert [DWA, 2010]. in Tabelle 2-7 sind die Konzentrationsbereiche derjenigen Parameter, die partikulär vorliegen können, zusammen mit vorgeschlagenen Schwerpunktwerten aufgeführt. Der gelöste Anteil ist dabei abhängig von den Stoffeigenschaften, vom pH-Wert und dem Vorhandensein weiterer Ionen.

Eisen, Zink, Kupfer und Chrom liegen in Straßenabflüssen überwiegend als Feststoff vor, Cadmium jedoch überwiegend gelöst [Kocher und Wessolek, 2003], [Boller et al., 2005a].

Tabelle 2-6: Stoffquellen und Stoffe aus dem Kraftfahrzeugverkehr, erweitert nach [Helmreich et al., 2005]

| Stoffquelle                       | Stoffe   |
|-----------------------------------|--|
| Abgase                            | Stickoxide, Kohlenoxide, Ruß, Kohlenstoff, Blei, Schwefel, Chlor, Magnesium, Natrium, Kupfer, Zink, Kohlenwasserstoffe, PAK, Phenole, PCDD/PCDF  |
| Abrieb von Fahrbahnbelägen        | Silizium, Calcium, Magnesium, Chrom, Nickel<br>Blei, Zink in Beton <sup>1)</sup> ; Spuren von Antimon, Arsen, Barium, Blei, Cadmium, Chrom, Kobalt, Kupfer, Mangan, Molybdän, Nickel, Quecksilber, Thallium, Vanadium, Zink, Zinn in Zement möglich <sup>2)</sup><br>Vanadium, Nickel <sup>3)</sup> , BaP <sup>4)</sup> in Bitumen |
| Reifenabrieb                      | Chrom, Zink, PAK<br>schwer abbaubare organische Stoffe, Cadmium, im Kautschuk der Lauffläche: Schwefel, Zinkoxid, Öle als Weichmacher, Kieselsäure, Ruß als Farbstoff <sup>5)</sup><br>Kupfer <sup>6)</sup>  |
| Abrieb von Bremsbelägen           | Kohlenstoff (Graphit <sup>7)</sup> ), Eisen (metallisch <sup>7)</sup> ), Magnesium, Barium, Silizium (Silikate <sup>7)</sup> ), Schwefel, Titan, Chrom, Vanadium, Nickel, Zink, Kupfer (Messing <sup>7)</sup> )<br>Antimontrisulfid, Vorstufe zu krebserregend eingestuftem Antimontrioxid <sup>8)</sup>                           |
| Stoffe von Katalysatoren          | Platin, Rhodium, Palladium   |
| Tropfverluste                     | Öle, Kraftstoffe, Bremsflüssigkeit, Frostschutzmittel  |
| Verdampfungsverluste              | Kohlenwasserstoffe   |
| Korrosionsverluste von Fahrzeugen | Eisen, Kupfer, Cadmium, Zink, Aluminium <sup>9)</sup>  |
| Hybridantrieb <sup>9)</sup>       | Seltene Erden Elemente: Praseodym, Dysprosium, Terbium   |

<sup>1)</sup> [LfUMN, o.J.]; <sup>2)</sup> [VDZ, 2005]; <sup>3)</sup>[Baekken, 1993], zitiert in [BAST, 2008]; <sup>4)</sup> [Götz, 2007]; <sup>5)</sup> [Görisch, 2012]; <sup>6)</sup> [Charlesworth u. Lees, 1999]; <sup>7)</sup> [UBA, 2006]; <sup>8)</sup> [Weckwert, 2002], <sup>9)</sup> [Hürlimann et al., 2011]

Problematisch sind insbesondere die feinen Korngrößen im Niederschlagsabfluss, da sie schwerer absetzbar sind und aufgrund ihrer hohen spezifischen Oberfläche mehr Schadstoffe sorbieren können.

[Xanthopoulos u. Hahn, 1993] fanden in den Schwebstoffen bis 150 µm in Verkehrsflächenabflüssen 75 % der Blei- und der Nickelbelastung innerhalb der Korngrößenfraktion 6 bis 60 µm vor. Bei den größeren Sinkstoffen mit einer Korngröße bis über

1.000 µm fand sich die höchste Schwermetallbelastung wiederum in der feinsten Fraktion von 20 bis 50 µm.

[Kari und Herrmann, 1989] fanden neben verschiedenen Schwermetallen auch die organischen Schadstoffe wie die PAK Benzo(a)pyren und Flouranthen sowie das PCB Clophen überwiegend an den Fraktionen < 63 µm sorbiert (Berücksichtigung von Schwebstoffen bis 200 µm).

Tabelle 2-7: Größtenteils partikulär vorliegende Schadstoffe in Verkehrsflächenabflüssen, nach [DWA, 2010]

| Gesamtgehalt (gelöst und partikulär) |         |                       |                 |
|--------------------------------------|---------|-----------------------|-----------------|
| Parameter                            | Einheit | Konzentrationsbereich | Schwerpunktwert |
| Schwermetalle                        |         |                       |                 |
| Blei                                 | µg/l    | 50-300                | 170             |
| Cadmium                              | µg/l    | 0,5-6                 | 5,0             |
| Kupfer                               | µg/l    | 30-250                | 80              |
| Zink                                 | µg/l    | 200-600               | 440             |
| Organische Schadstoffe               |         |                       |                 |
| PAK                                  | µg/l    | 1,5-7,0               | 2,5             |
| Benzo-a-pyren                        | µg/l    | 0,05-0,3              | 0,3             |
| MKW                                  | mg/l    | 1,0-5,0               | 1,0             |
| Zehrstoffe                           |         |                       |                 |
| CSB                                  | mg/l    | 25-70                 | 100             |
| TOC                                  | mg/l    | 10-30                 | 20              |
| Nährstoffe                           |         |                       |                 |
| P <sub>ges</sub>                     | mg/l    | 0,2-1,2               | 0,5             |

In [DWA, 2010] sind die Schwermetall- und PAK-Anteile im Straßenstaub bzw. -abfluss in Abhängigkeit von der Kornfraktion aus unterschiedlichen Veröffentlichungen ausgewertet worden. Beispielhaft sind in Bild 2-38 die Grafik für Kupfer und in Bild 2-39 die Grafik für PAK dargestellt. Daraus geht hervor, dass **Kupfer zu 10% bis 65%** an der Feinfraktion < 63 µm zu finden ist, **PAK zu 20% bis 75%**. Aus den Bildern ist auch zu erkennen, dass im Straßenabfluss tendenziell noch mehr Kupfer bzw. PAK-Anteile der feineren Kornfraktion zuzuordnen sind als im Straßenstaub.

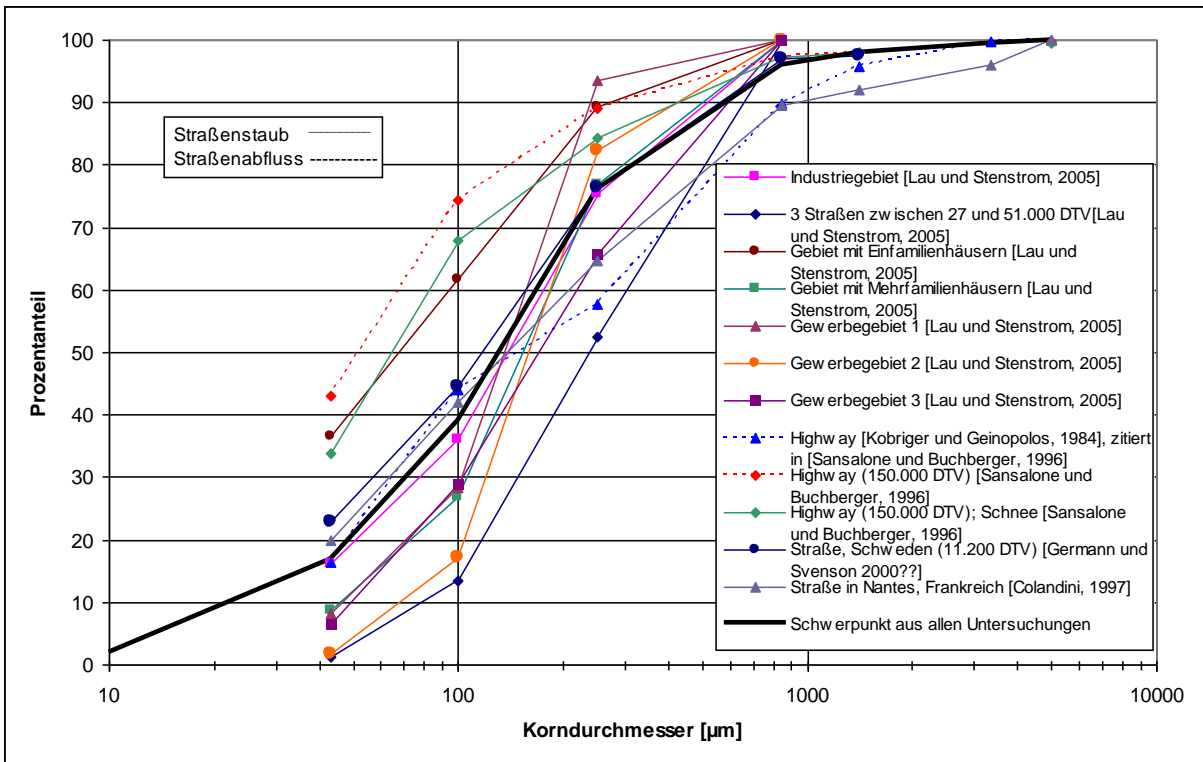


Bild 2-38: Kupfer an unterschiedlichen Kornfraktionen von Straßenstaub und im Straßenabfluss [DWA, 2010]

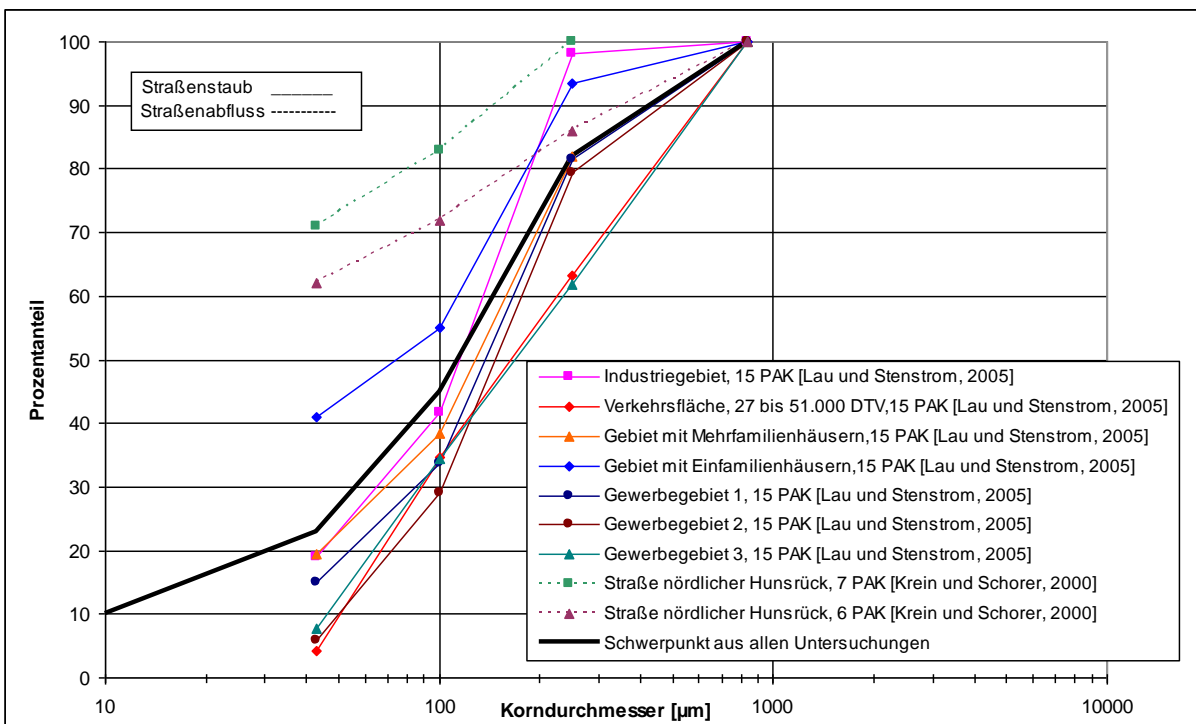


Bild 2-39: PAK an unterschiedlichen Kornfraktionen von Straßenstaub und im Straßenabfluss [DWA, 2010]

Die Verteilung an der feinen Fraktion lag für **Cadmium bei 15% bis 60%**, bei **Blei bei 10% bis bei 70%** und für **Zink bei 10% bis 60%**, auch tendenziell bei Straßenabflüssen höher als bei Straßenstäuben [DWA, 2010].

*Verkehrsflächenabflüsse beinhalten zusätzlich zu den Stoffen, die im Staubniederschlag zu finden sind, eine Vielzahl weiterer Stoffe, die je nach Randbedingungen oder Stoffeigenschaft überwiegend gelöst oder überwiegend partikulär vorliegt. Die Korngrößenverteilung einzelner Stoffe ist abhängig vom Standort sehr unterschiedlich, jedoch sind Schadstoffe überwiegend an der Feinfraktion der Abflüsse assoziiert. Eine Bewertung der Relevanz der einzelnen Inhaltsstoffe für die Umwelt mit Hilfe der Häufigkeit des Auftretens in Kombination mit der relativen Überschreitung der jeweiligen Bestimmungsgrenze kann einzugsgebietsabhängig zu unterschiedlichen Ergebnissen führen.*

### 2.5.3 Dachabfluss

Wie alle Niederschlagsabflüsse sind auch Dachabflüsse vom Staubniederschlag und seinen Inhaltsstoffen geprägt.

Zusätzlich spielt das verwendete Dachmaterial eine Rolle. Die Inhaltsstoffe der Dachhaut können sich bei Dachabrieb oder Korrosionserscheinungen im Dachabfluss wiederfinden. Mögliche Inhaltsstoffe von Dachmaterialien sind in Tabelle 2-8 zusammengefasst.

Problematisch sind insbesondere Metaldachflächen, aus denen mit dem Niederschlag hohe Schwermetall-Konzentrationen ausgetragen werden. Die Korrosion der Metalle ist dabei stoffabhängig und abhängig vom Standort des Daches (Schwefeldioxidgehalt der Luft), vom Alter des Daches und von der Art der Beschichtung. Das Abschwemmen der Korrosionsprodukte wird begünstigt bei einer geringen Dachneigung sowie hoher Niederschlagsintensität. Die Abschwemmraten liegen beim Kupfer im Bereich von  $1,3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  und beim Zink im Bereich von  $3,0 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ . Bei pH-Werten unterhalb von 7 liegt Zink überwiegend gelöst vor, Kupfer liegt bei pH-Werten unterhalb von 5 vorwiegend gelöst vor, bei höheren pH-Werten jedoch auch in partikulärer Form [Helmreich, 2010], siehe dazu auch Bild 2-15. [Faller und Reiß, 2005], zitiert in [Helmreich, 2010], fanden in Niederschlagsabflüssen 10% partikulären Anteil an Zink aus einem Titanzinkblechdach und 20% partikulären Anteil an Kupfer aus einem Kupferblechdach.

Als weitere Quelle insbesondere von Phosphor und sauerstoffzehrenden Stoffen ist der Eintrag über Vogelexkreme zu nennen.



Tabelle 2-8: Inhaltsstoffe von Dachmaterialien

| Dachmaterial          | Inhaltsstoffe   | Quelle   |
|-----------------------|---|--|
| Ziegel                | Lehm, Gemisch aus Ton und Sand: Feldspat, Quarz, Glimmer, Eisenhydroxid, Reste von kalkigen Organismen und organischen Substanzen, Kaolinit, Montmorillonit oder Illit aus Silizium und Aluminium   | Bayerische Architektenkammer, 2012                               |
| Betondachsteine       | Sand, Zement (kann enthalten: Antimon, Arsen, Barium, Blei, Cadmium, Chrom, Kobalt, Kupfer, Mangan, Molybdän, Nickel, Quecksilber, Thallium, Vanadium, Zink, Zinn), Zusatzstoffe (Silika, Quarzmehl, Kalksteinmehl, Flugasche aus Silizium und Aluminium) | VDZ, 2005<br>VDZ, 2006   |
| Dachpappe aus Bitumen | Schwefelhaltige Kohlenwasserstoffgemische mit Spuren von Vanadium, Nickel, BaP  | AGÖF, 2012<br>Baekken, 1993, zitiert in BAST, 2008<br>Götz, 2007 |
| Kupferblech           | Kupfer evtl. mit Legierungszusätzen Zink, Blei oder Zinn  | Deutsches Kupferinstitut Düsseldorf, o.J.                        |
| Zinkblech             | Zink mit geringen Anteilen an Titan und Kupfer  | FNB, o.J.  |
| Schiefer              | Hauptbestandteil Quarz und/oder Glimmer, je nach Herkunft unterschiedliche Nebengemengeteile  | Schumann, 1985   |

In Tabelle 2-9 sind einige nach [DWA, 2010] mögliche in unterschiedlichen Anteilen partikulär vorliegende Schadstoffe in Dachabflüssen zusammengefasst.

Tabelle 2-9: Teilweise partikulär vorliegende Schadstoffe in Dachflächenabflüssen (Materialien ohne wesentliche Metallanteile), nach [DWA, 2010]

| Gesamtgehalt (gelöst und partikulär) |         |                       |                 |
|--------------------------------------|---------|-----------------------|-----------------|
| Parameter                            | Einheit | Konzentrationsbereich | Schwerpunktwert |
| Schwermetalle                        |         |                       |                 |
| Blei                                 | µg/l    | 20-111                | 55              |
| Cadmium                              | µg/l    | 0,5-1,5               | 0,8             |
| Kupfer                               | µg/l    | 5-200                 | 100             |
| Zink                                 | µg/l    | 100-1.200             | 600             |
| Organische Schadstoffe               |         |                       |                 |
| PAK                                  | µg/l    | 0,5-2,5               | 1,0             |
| Benzo-a-pyren                        | µg/l    | 0,01-0,3              | 0,1             |
| MKW                                  | mg/l    | 0,32-1,0              | 0,7             |
| Zehrstoffe                           |         |                       |                 |
| CSB                                  | mg/l    | 25-70                 | 50              |
| TOC                                  | mg/l    | 4-20                  | 15              |
| Nährstoffe                           |         |                       |                 |
| P <sub>ges</sub>                     | mg/l    | 0,1-0,3               | 0,2             |

*Zusätzlich zum **Staubniederschlag** spielt das **verwendete Dachmaterial** für **Dachabflüsse** eine Rolle. Die Inhaltsstoffe der Dachhaut können sich bei Dachabrieb oder Korrosionserscheinungen im Dachabfluss wiederfinden. Problematisch hinsichtlich der Niederschlagsbelastung sind insbesondere **Metalldachflächen**, aus denen mit dem Niederschlag hohe Schwermetall-Konzentrationen ausgetragen werden, die **überwiegend gelöst**, aber abhängig vom pH-Wert zu geringen Teilen auch partikulär vorliegen.*

#### 2.5.4 Sonstige

Durch **Bodenerosion** können im Prinzip alle Bodeninhaltsstoffe und Stoffe, die über den Staubniederschlag eingebracht wurden, mit dem Niederschlag ausgetragen werden. Dies sind Feststoffe, sauerstoffzehrende Stoffe, Nährstoffe sowie unterschiedlichste Schadstoffe. Werden Böden landwirtschaftlich genutzt, kann der Gehalt



an Nähr- und Schadstoffen erhöht sein, z.B. Stickstoff und Schwermetalle aus der (Klärschlamm-)düngung oder Pestizide aus der Pflanzenbehandlung.

Über Fahrzeuge aus landwirtschaftlichen Tätigkeiten (z.B. Anhaftungen von Böden an den Fahrzeugreifen, Einträge aus Ernterückständen, Verlust von Heu, Streu oder Ähnlichem) können weitere Verschmutzungen auf Straßenoberflächen und somit in den Niederschlagsabfluss gelangen.

Bei Bautätigkeiten stammt das Feststoffaufkommen auf befestigten Flächen hauptsächlich aus Stäuben wie Zement- oder Schleifstaub, durch Bodenerosion der unbefestigten Flächen, aber auch aus Verlusten von Baumaterialien (Sand) oder den Anhaftungen an LKW-Reifen (Lehm, Boden).

## 2.6 Wechselwirkung mit der Umwelt

Die gewässerschädigende Wirkung von Einleitungen aus der Kanalisation in **Oberflächengewässer** wird vor allem kritisch hinsichtlich des hydraulischen Stresses aber auch hinsichtlich der Feststoffbelastung beurteilt [Fenz und Nowak, 1998]. Feststoffe können insbesondere in kleinen Fließgewässern zu einer Verschlammung der Gewässersohle und zu einer Verminderung des Sauerstofftransports in tiefere Schichten des Interstitials führen. In der Folge wird vielen Wasserorganismen der Lebensraum bzw. der Rückzugsraum genommen [Fenz und Nowak, 1998]. Feine Feststoffe < 10 µm verbleiben aufgrund ihrer geringen Sedimentationsgeschwindigkeit oft Tage, in stehenden Gewässern bis zu einer Woche, im Wasserkörper. Organismen, die die Nahrung filternd aufnehmen (z.B. Muscheln), Sedimentbewohner (z.B. Würmer, Zuckmückenlarven) oder im Wasser atmende Tiere (Fische) sind aufgrund der hohen Schadstoffbelastung der feinen Feststoffe gefährdet. Es wird angenommen, dass Schadstoffe bei diesen Tiergruppen im Körper akkumuliert werden [Hürlimann et al., 2011].

Bei einem hohen Anteil an Organik und/oder Resuspension von abgelagerter organischer Substanz bei Regenereignissen kann sich darüber hinaus der Sauerstoffbedarf eines Gewässers erhöhen [Rossi et al., 2004b], wobei diese Problematik bei der Trennkanalisation im Vergleich zur Mischkanalisation als weniger kritisch angesehen wird. Ausnahmen stellen dabei Fehllanschlüsse aus z.B. verschmutzten landwirtschaftlich genutzten Hofflächen dar [Fenz und Nowak, 1998]. Das potenzielle Sauerstoffdefizit für Einleitungen aus Trennsystemen wird mit 0,15 (0,10 bis 0,19) g O<sub>2</sub>/g AFS beziffert [Rossi et al., 2004a].

Die Akkumulation von sorbierten Schwermetallen und organischen Schadstoffen im Sediment stellt ein langfristiges Problem dar. Nach [Gaskell et al., 2009] können mit Schwermetallen und PAK beladene Feststoffe aus Autobahnabflüssen toxische Konzentrationen erreichen. Sie stellten anhand von Untersuchungen in sechs britischen Gewässern fest, dass sich Schwermetalle und PAK in Fischen und Invertebraten an-

reichern können und sich demzufolge Lebensgemeinschaften insbesondere in akkumulierten Sedimenten ändern können. Sowohl im Labor als auch in situ konnten sie nachweisen, dass Autobahnabflüsse toxisch auf Invertebraten wirken. PAK wurden dabei als Schlüsselschadstoffe identifiziert.

[Fenz und Nowak, 1998] beurteilten die Veränderung der Sedimentbeschaffenheit eines Gewässers durch Einleitungen aus Niederschlagsabflüssen in jedem Fall als gravierenden Eingriff.

Das Kompartiment **Boden und Grundwasser** kann ebenso wie die Oberflächengewässer durch die an den Feststoffen anhaftenden organischen (z.B. PAK) oder anorganischen (z.B. Blei) Schadstoffe belastet werden. Zum Schutz von Boden und Grundwasser sind daher in der Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) Richtwerte für eine Vielzahl von Parametern dargestellt, die zur Beurteilung z.B. für ein Einleiten von Niederschlagswasser herangezogen werden [BBodSchV, 1999]. Diese Werte werden zukünftig mit der Mantelverordnung (Mantel-V, derzeit Entwurf vom 31.10.2012) [Mantel-V, 2012] größtenteils verschärft und um weitere Parameter ergänzt.

Böden an Verkehrsstraßen werden vor allem im Nahbereich bis 10 m Entfernung durch Spritzwasser und darin enthaltende Schadstoffe belastet. Darüber hinaus werden die mit dem Wind flächenhaft verteilten Stoffe bis 60 m Entfernung, im Extremfall bis 100 m Entfernung abgelagert [Golwer, 1991]. Neuere Untersuchungen von der [Bast, 2010 und 2011], von [Boller et al., 2005b] und [Kocher, 2011] bestätigen, dass die Stoffanreicherung in Fahrbahnnähe stattfindet.

Der Boden weist dabei eine gute Rückhalteleistung auf. In der Schweiz wird der Ansatz verfolgt, Straßenabwasser gezielt und kontrolliert über das Bankett zu entwässern und die wassergefährdenden Stoffe im ausgewählten Bodenmaterial gezielt zurückzuhalten, da über Seitenstreifen nur 20 bis 30 % der Verkehrsflächenabflüsse erfasst würden [GSA, 2006]. [Kocher, 2011] konnte zeigen, dass bereits ein Bankettaufbau ohne spezielle Anforderungen an das Baumaterial und ohne Verdichtung einen guten Schadstoffrückhalt bietet. An Bodenfeststoffe gebundene Substanzen sind bis auf Kupfer kaum eluierbar und die Prüfwerte der BBodSchV für Sickerwasser werden i.A. schon im oberen Bankettbereich eingehalten. Nach der Untersuchung von [Kocher, 2011] ist der Rückhalt in den Banketten auch nach langer Standzeit („unendlich“) wirksam, da das aufwachsende Sediment trotz Vorbelastung mit Schadstoffen weiterhin gute Rückhalteeigenschaften und einen günstigen pH-Wert aufweist.

## 2.7 Behandlungsmöglichkeiten und erforderliche Wirkungsgrade

Niederschlagsabflüsse können dezentral, am Ort des Entstehens, oder zentral nach Transport und ggf. Vorreinigung in Straßeneinläufen und Retention in Kanalsystemen behandelt werden. Straßenabflüsse werden insbesondere bei Außerortsstraßen über die angrenzende Böschung versickert und erfahren über die Bodenpassage eine Reinigung.

An dezentralen Anlagen ist eine Vielzahl von technischen Ausführungen am Markt. Dies sind Sedimentationseinheiten, technische Filtersysteme oder substratgefüllte Mulden-/Rinnensysteme.

Zentral werden vor allem Regenklärbecken eingesetzt, zur weitergehenden Behandlung auch Retentionsbodenfilter.

Wichtig im Zusammenhang mit der Ermittlung des PM<sub>63</sub> ist vor allem der Ort der Behandlung. Wie in Kapitel 2.3.4 dargelegt, findet eine Klassierung der Feststoffe in Abhängigkeit von der Größe des Einzugsgebietes statt. Während dezentrale Systeme mit mehr, vor allem groben, Feststoffen beaufschlagt werden, werden zentralen Systemen flächenspezifisch weniger Feststoffe mit einem höheren PM<sub>63</sub>-Anteil zugeführt. Die PM<sub>63</sub>-Zufuhr in zentrale Behandlungssysteme beträgt durch den Rückhalt im Straßeneinlauf/Kanalsystem etwa 75% der Zufuhr von dezentralen Systemen [Fuchs et al., 2010a].

Um einen emissionsbezogenen Wirkungsgrad für Behandlungsanlagen einzuführen, müsste der dauerhafte Rückhalt im Kanalsystem mitberücksichtigt werden, siehe hierzu auch Kap. 2.3.4. Straßeneinläufe und Kanalsysteme stellen schließlich Bauwerke dar, in die Investitionen geflossen sind und die gewartet werden müssen.

Abhängig vom PM<sub>63</sub>-Grenz- oder Emissionswert zur Einleitung in den Boden oder in Oberflächengewässer (die gegenwärtig noch offen sind) und dem zu erwartenden PM<sub>63</sub>-Gehalt eines Straßen- oder Mischflächenabflusses ergeben sich unterschiedliche erforderliche Wirkungsgrade für beide Behandlungssysteme. Um den gleichen Gesamtrückhalt zu erhalten sind - als fiktives Beispiel - bei einem Rückhalt von 60% in dezentralen Systeme ein Rückhalt von 50% in zentralen Systemen (nach erfolgter Retention im Kanalsystem von 20%) erforderlich.



### 3 Quantifizierung von $AFS_{ges}$ und $PM_{63}$ in Niederschlagsabflüssen

Im Folgenden wird mit Hilfe der bereits zusammengestellten Untersuchungen und weiteren Auswertungen eine Methodik entwickelt, Feststoffe in Dach-, Verkehrs- und Mischflächenabflüssen berechnen zu können.

Eine statistische Lösung z.B. mittels multivariater Datenanalyse wurde im Vorfeld ausgeschlossen, da diese Art von Modellen besondere Anforderungen an die verwendeten Daten stellen. Die Daten müssen z.B. in ausreichender Zahl vorhanden, ausreißerfrei und symmetrisch verteilt sein. Die zu Niederschlagsabflüssen verfügbaren Daten sind jedoch sehr variabel - die Randbedingungen und Einflussgrößen sind sehr unterschiedlich bzw. gar nicht bekannt. Dies betrifft verschiedene Messstellen, aber auch die Ergebnisse an ein und derselben Messstelle von Ereignis zu Ereignis oder sogar von Jahr zu Jahr (vgl. dazu Kap. 4.1, Derchinger Straße [Nadler und Meißner, 2008], A1, Österreich [Geiger-Kaiser und Jäger, 2005]). Ein weiteres generelles Problem bei der Durchführung von Messprogrammen und Gewinnung von Daten ist die Probandichte. [Grotehusmann et al., 2013] weisen darauf hin, dass die Erfassung von 60 bis 80% der Abflussanteile (in ihrer Studie) sehr gut ist. Herkömmlich erfasste Abflussanteile liegen jedoch oft bei 20%, damit ist nur ein Ausschnitt der über das Jahr erfolgten Abflüsse repräsentiert. Daten können somit nicht gleich gewichtet werden, da unterschiedliche Datenmengen und Datenausschnitte zugrunde liegen. Daher werden die Terme der entwickelten Formel empirisch aus Beobachtungen und Vergleichen heraus ermittelt und anhand von Messprogrammen optimiert und verifiziert.

Da die Anzahl der verfügbaren  $PM_{63}$ -Studien derzeit viel zu gering ist, um eine Verifikation der Methode durchführen zu können, wird die Berechnung des  $AFS_{ges}$ -Gehalts parallel durchgeführt und schließlich der  $PM_{63}$ -Gehalt mit Hilfe des jeweiligen Feinanteils der einzelnen Einträge berechnet. Falls die Erkenntnisse über den Gehalt und das Verhalten von  $PM_{63}$  in den nächsten Jahren wachsen, so ist ein Anpassen der Formel problemlos möglich.

Die Quantifizierung des Abtrags von Feststoffen durch Niederschlagsabflüsse erfolgt in folgenden Schritten:

1. Ermittlung des Gesamtfeststoff- und  $PM_{63}$ -Gehaltes auf einer Fläche in  $[mg/(m^2 \cdot d)]$  bzw.  $[kg/(ha \cdot a)]$
2. Berücksichtigung reduzierender und verstärkender Faktoren für  $AFS_{ges}$  und  $PM_{63}$
3. Berücksichtigung von Retentionsfaktoren im Verlauf des Transportes

Der Schritt 2 ist notwendig, da wie in Kapitel 2.3.2 gezeigt, nicht sämtliche Feststoffe im Niederschlagsabfluss landen bzw. Randbedingungen vorherrschen können, die zu einem erhöhten oder verminderten Feststoffaufkommen führen. Die einzelnen Aufkommensanteile werden je nach Herkunftsfläche zusammengefügt und ergeben

unter Beachtung von Abminderungs- oder Erhöhungsfaktoren ein Gesamtaufkommen in [kg/ha·a].

In größeren Kanalsystemen mit Straßeneinläufen sind zusätzlich Retentionsfaktoren zu berücksichtigen.

Vereinfacht ergibt sich folgende Formel für die Berechnung des Gesamtfeststoffabtrags:

$$\text{Feststoffabtrag AFS} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{ha} \cdot \text{a}} \right] =$$

(Staubniederschlag

$$+ \text{AFS}_{\text{Abrieb}} \cdot \text{Faktoren}_{\text{Randbedingungen}}$$
$$+ \text{AFS}_{\text{Sonstiges}} \cdot \text{Faktoren}_{\text{Randbedingungen}}) \cdot \text{Faktoren}_{\text{Reduktion}}$$

und für die Berechnung des PM63-Abtrags:

$$\text{Feststoffabtrag PM 63} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{ha} \cdot \text{a}} \right] =$$

(Staubniederschlag · Anteil PM63

$$+ \text{AFS}_{\text{Abrieb}} \cdot \text{Anteil PM63} \cdot \text{Faktoren}_{\text{Randbedingungen}}$$
$$+ \text{AFS}_{\text{Sonstiges}} \cdot \text{Anteil PM63} \cdot \text{Faktoren}_{\text{Randbedingungen}}) \cdot \text{Faktoren}_{\text{Reduktion}}$$

Die Umrechnung in eine Feststoffkonzentration [mg/l] erfolgt schließlich unter Beachtung von Niederschlägen und Verlusten. Die Angabe der Feststoffkonzentration ist sinnvoll, um einen Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Konzentrationen durchführen zu können.

### 3.1 Gesamtfeststoff- und PM63-Flächendeposition

#### 3.1.1 Staubdeposition

Staubniederschlagsmessungen werden in Deutschland inzwischen flächendeckend vorgenommen und sind auch als Jahresmittelwerte vorhanden. Staubniederschlag beinhaltet die trockene und nasse Deposition, neben den partikulären also auch die gelösten Inhaltsstoffe im Regen sowie die jahreszeitlich bedingte Komponente der Pollenbelastung.

Die Ermittlung der einzelnen Anteile erfolgt getrennt gemäß Bild 3-1.



Bild 3-1: Ermittlung von niederschlagsabflussrelevanten Feststoffen aus dem Staubniederschlag

Die Staubniederschlagswerte gingen seit den Aufzeichnungen in Deutschland stetig zurück, in den westlichen Bundesländern bereits in den 1970er und 80er Jahren [HLUG, 2009], in den östlichen Bundesländern in den 90er Jahren (vgl. Bild 3-2). Der Rückgang der Staubbelastung von 2000 bis heute ist dagegen nur noch minimal. Werte nach etwa 2000 sind somit gleichermaßen gut heranzuziehen, während frühere Betrachtungen insbesondere aus den östlichen Bundesländern und Berlin zu hohe Werte liefern würden.

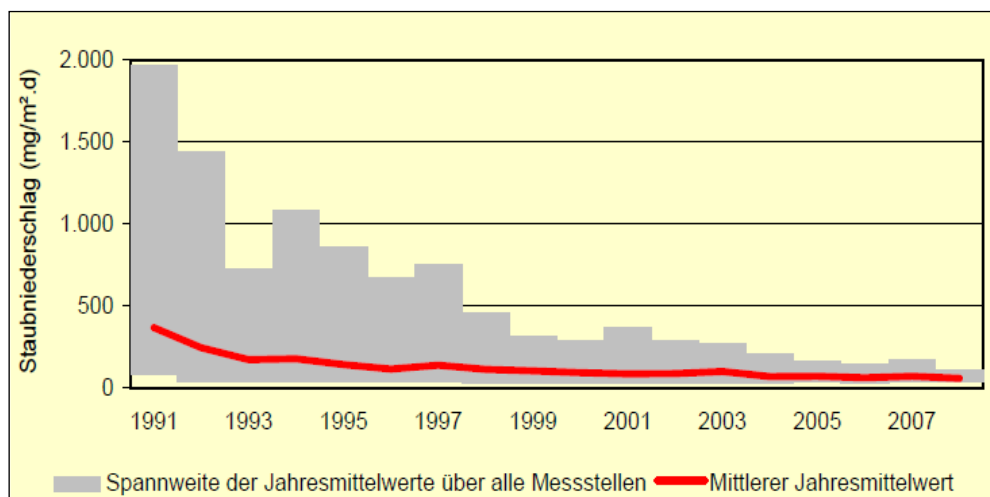


Bild 3-2: Mittlere Staubniederschlagbelastung in Brandenburg (Jahresmittelwerte) in Brandenburg [LUA Brandenburg, 2009]

In Tabelle 3-1 sind Jahresmittelwerte des Staubniederschlags teilweise mehrerer Jahre und/oder mehrerer Messstationen zusammengefasst. Unterschieden wird dabei in „ländlich/Hintergrund“, „städtisch“ und am „Emissionsstandort“.

Tabelle 3-1: Staubniederschlagsmessungen ab 2000, Literaturzusammenstellung

|                      | Ort                               | Art   | Jahr der Messung      | Jahresmittelwert [mg/m <sup>2</sup> ·d] | Quelle                 |
|----------------------|-----------------------------------|---|-----------------------|---|------------------------|
| ländlich/Hintergrund | Schweiz/Österreich/Süddeutschland | Außenbereich, Median aus 33 Literaturfundstellen                                      | 2000 bis 2003         | 67                                      | UMEG (2004)            |
|                      | Deutschland                       | Literaturzusammenstellung, ländliche Gebiete  | 2003                  | 40 bis 100                              | Möller (2009)          |
|                      | Schleswig-Holstein                | Hintergrundbelastung, 3 Messstellen   | 2008/2009             | 50/60/80                                | Temme (2009)           |
|                      | Brandenburg                       | Mittelwert aus 9 Hintergrundmessstationen und Kleinstädten < 20.000                   | 2008                  | 51                                      | LUA Brandenburg (2009) |
|                      | Hessen                            | 2 emissionsferne Standorte  | 2001                  | 51/86                                   | HLUG (2009)            |
|                      | Bayern                            | Mittelwert aus 16 Hintergrundmessstationen und Kleinstädten < 20.000                  | 2010                  | 34                                      | LfU (2010)             |
|                      | Sachsen                           | Mittelwert aus 2 ländlichen Messstationen   | 2003 bis 2010         | 43                                      | LULG ( 2010)           |
|                      | Thüringen                         | Mittelwert aus 13 Hintergrundmessstationen und Kleinstädten < 20.000                  | 2010                  | 38                                      | TLUG (2010)            |
|                      | Niedersachsen                     | Mittelwert über 10 Messstationen, 3 Jahre (ländlich, aber auch Großstädte)            | 2002 bis 2004         | 40                                      | NMUEK (2010)           |
|                      | Brandenburg                       | Mittelwert über alle 21 Messstationen im Land   | 1999 bis 2007<br>2008 | 70 bis 90<br>60                         | LUA Brandenburg (2009) |
| städtisch            | Schweiz/Österreich/Süddeutschland | Siedlungsbereich, Median aus 33 Literaturfundstellen                                  | 2000 bis 2003         | 81                                      | UMEG (2004)            |
|                      | Saarbrücken-Eschberg              | 3 Messstellen Stadtteil (7000 E) liegt etwa 2 km östlich der Stadtmitte Saarbrückens. | 2008                  | 60                                      | LUA Saarland (2009)    |
|                      | Bayern                            | Mittelwert aus 10 Messstellen in Städten zwischen 20.000 und 100.000 Einwohnern       | 2010                  | 52                                      | LfU (2010)             |
|                      | Bayern                            | Mittelwert aus 13 Messstellen in Städten über 100.000 Einwohnern                      | 2010                  | 60                                      | LfU (2010)             |
|                      | Sachsen                           | Mittelwert aus 4 städtischen Messstationen  | 2003 bis 2010         | 82                                      | LULG ( 2010)           |
|                      | Brandenburg                       | Mittelwert aus 8 Messstellen in Städten zwischen 20.000 und 100.000 Einwohnern        | 2008                  | 59                                      | LUA Brandenburg (2009) |



Tabelle 3-1 (Fortsetzung): Staubniederschlagsmessungen ab 2000, Literaturzusammenstellung

| Ort               |             | Art   | Jahr der Messung | Jahresmittelwert [mg/m <sup>2</sup> ·d] | Quelle                 |
|-------------------|-------------|---|------------------|---|------------------------|
| städtisch         | Brandenburg | Mittelwert aus 3 Messstellen in Städten über 100.000 Einwohnern   | 2008             | 70                                      | LUA Brandenburg (2009) |
|                   | Thüringen   | Mittelwert aus 10 Messstellen in Städten zwischen 20.000 und 100.000 Einwohnern   | 2010             | 92                                      | TLUG (2010)            |
|                   | Thüringen   | Mittelwert aus 3 Messstellen in Städten über 100.000 Einwohnern   | 2010             | 100                                     | TLUG (2010)            |
| Emissionsstandort | Saartal     | Mittelwert von 19 Messstellen im Umfeld von Emittenten der Eisen- und Stahlindustrie, Saarbrücken, Völklingen und Dillingen-Saarlouis | 2008             | 154                                     | LUA Saarland (2009)    |
|                   | Sachsen     | 5 verkehrsnaher Messstandorte   | 2003 bis 2010    | 118                                     | LULG (2010)            |
|                   | NRW         | 2 Messstellen am Kraftwerk Datteln  | 2008 bis 2011    | 180                                     | E.ON (2011)            |
|                   | NRW         | 26 belastete Standorte  | 2010             | 149                                     | LANUV (2012b)          |
|                   | NRW         | 44 belastete Standorte  | 2011             | 193                                     | LANUV (2012b)          |

Es zeigt sich zum einen, dass Hintergrundstandorte (34 bis 100 mg/m<sup>2</sup>·d) genauso durch Staubniederschläge belastet sein können wie städtische Gebiete (52 bis 100 mg/(m<sup>2</sup>·d)). Der Vergleich zwischen der Hintergrundbelastung und der städtischen Staubniederschlagsbelastung innerhalb eines Gebietes oder aus einer Studie zeigt jedoch, dass die Hintergrundbelastung des Staubniederschlags oder die Staubbelastung in ländlichen Standorten immer geringer ist als die städtische Belastung, siehe Deutschland - Literaturzusammenstellung, Bayern, Sachsen, Brandenburg oder Thüringen. Der Unterschied zwischen Hintergrundbelastung/ländlicher Standort und städtischer Belastung in jeweils einem Gebiet bzw. in der gleichen Studie liegt im Bereich von 10 bis 60 mg/(m<sup>2</sup>·d).

Verkehrsnaher Messstellen in Städten sind höher belastet als andere städtische Messstellen, wie die Zusammenfassung verkehrsnaher Standorte in Sachsen mit im Durchschnitt 118 mg/(m<sup>2</sup>·d) ergab. Diese Anteile werden jedoch gesondert über die verkehrsbedingten Belastungen in Kapitel 3.2.1 ermittelt.

Die Belastung an emissionsnahen Standorten liegt bei den vier ausgewerteten Veröffentlichungen etwa bei 150 bis 190 mg/(m<sup>2</sup>·d). Viel höhere Werte sind auch nicht zu

erwarten, da es sich um Jahresmittelwerte handelt und der Grenzwert der TA Luft von 350 mg/(m<sup>2</sup>·d) im Monatsmittelwert eingehalten werden muss.

Sicherlich ist diese Zusammenstellung nur exemplarisch. Sie zeigt aber die Tendenzen der drei Belastungskategorien auf. Gewählt wird für die Berechnung des Feststoffaufkommens jeweils eine relativ niedrige Staubniederschlagsbelastung von

- 40 mg/(m<sup>2</sup>·d) für ländlichen Standort/Hintergrundbelastung
- 60 mg/(m<sup>2</sup>·d) für städtischen Standort
- 150 mg/(m<sup>2</sup>·d) für Emissionsstandort

da in Staubniederschlägen immer auch Anteile aus dem Verkehr enthalten sind, die gesondert ermittelt und zur Gesamtdeposition hinzuaddiert werden (vgl. Kap. 3.2.1).

Die angegebenen Werte enthalten **Staubniederschläge bis < 200 µm Korndurchmesser sowie gelöste Stoffe aus der nassen Deposition**. Die gelösten Stoffe tragen nicht zum Feststoffaufkommen bei und müssen daher abgezogen werden. Zur Berechnung des PM<sub>63</sub>-Aufkommens ist außerdem dessen Anteil am Gesamtfeststoffaufkommen zu ermitteln. Im Folgenden werden diese Anteile quantifiziert.

Da mittlere Staubniederschlagswerte ein ganzes Jahr umfassen, ist bei den ermittelten Werten die Belastung von Pollen/Blüten, die im Frühjahr und Sommer den Staubniederschlag erhöhen können, enthalten. Um diesen Anteil gesondert berechnen zu können, wird er in Kapitel 3.1.1.2 anhand von monatlichen Staubniederschlagsaufzeichnungen bestimmt.

### *3.1.1.1 Gelöste Anteile im Staubniederschlag*

Eine Zusammenstellung von Regendaten bezüglich des Ionengehalts (H<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), der Leitfähigkeit sowie des gelösten Kohlenstoffs (DOC) ist in Tabelle 3-2 dargestellt.

Die gemessenen Ionen in [mg/l] wurden addiert, wobei nur Messreihen, in denen Sulfat mitgemessen wurde, berücksichtigt wurden, da Ammoniumsulfat (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> im allgemeinen bei definierten Einzelstoffen überwiegt [Möller, 2009]. In etwa 80% aller ausgewerteten Messreihen lag jeweils Sulfat in der höchsten Konzentration vor. Eine Ausnahme stellen Studien in Meeresnähe dar, Natrium in Küstennähe z.B. entstammt zu 100 % aus Seewasser [Reinstorf, 2007]. In 200 m Entfernung vom Meer kann der Chloridgehalt im Niederschlag bis ca. 50 mg/l, der Natriumgehalt bis ca. 20 mg/l betragen [Mattheß, 1990]. Dies erklärt eventuell auch die hohen Staubniederschlagsmesswerte aus Schleswig-Holstein in Hintergrundstationen, vgl. Tabelle 3-2. Allein der Chloridgehalt lag z.B. in St-Peter-Ording an der Nordsee zwischen 1988 und 1996 im Niederschlag bei 10,7 mg/l im Mittel [Lehmhaus et al., 1998].

Tabelle 3-2: Ionen, Leitfähigkeit und DOC in Niederschlägen, Literaturzusammenstellung

| Beschreibung   | Jahr der Messung           | Summe gemessener Ionen [mg/l] | Leitfähigkeit [ $\mu$ S/cm] | DOC [mg/l] | Quelle  |
|--|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------|---|
| Mittelwert aus 11 Regenereignissen, Ecuador (Hintergrundbelastung)                       | 2003/2004                  | 1,6                           |                             |            | Beiderwieden (2004)                                 |
| 14 Messstellen im Bezirk Herten, NRW. Erhöhte Werte der LF durch Regenschreiber aus Zink | 1999                       | 16,6                          | 30 -134                     |            | Rahm (2000)   |
| Eintrag zu üblichen Regeninhaltsstoffen  |                            | 7,3                           |                             |            | Köller (2010), zitiert aus Encyclopaedia Britannica |
| Bayreuth, Werte abgelesen aus Diagramm   |                            | 3,7                           |                             | 3          | Förster, Knoche (1999)                              |
| München, n = 9 aus 2 Jahren  | 2006                       | 12,7                          |                             |            | Bittner (2006)                                      |
| Bottrop, n = 9 aus 2 Jahren  | 2006                       | 10,4                          |                             |            | Bittner (2006)                                      |
| Schweden, n = 4  | 2005                       |                               |                             | 2          | Berndtsson et al. (2009)                            |
| Japan, n = 5   | 2005/2006                  |                               |                             | 2,5        | Berndtsson et al. (2009)                            |
| Darmstadt, n = 3   |                            | 9,2                           | 45                          | 3 (CSB)    | Beier (2008)  |
| Hunsrück, Station Deuselberg, Mittelwert aus 20 Jahren                                   | 1982 bzw. 1995/96 bis 2003 | 5,3                           | 17                          |            | Beier (2008)  |
| Sachsen, Mittelwert von 10 Stationen aus drei Jahren                                     | 2001 bis 2003              | 7,6                           | 21                          |            | Beier (2008)  |
| Schleswig-Holstein, 13 Messstellen, teilweise am Meer, Mittelwert                        | 1988 bis 1996              | 11,5 (max 22,9)               |                             |            | Lehmhaus et al., (1998)                             |

Auch hier eignen sich ältere Studien nicht, da die Belastung säurebildender Regeninhaltsstoffe in den letzten 30 Jahren stark zurückgegangen ist, wie in Bild 3-3 dargestellt ist. Ein Maß dafür ist auch die Leitfähigkeit, die in den letzten 30 Jahren im Mittel an fünf ausgewählten Messstationen in Deutschland von 40 auf 10  $\mu$ S/cm zurückging [UBA, 2011].

Außer den genannten die Leitfähigkeit verursachenden Stoffen sind im Niederschlag gelöste organische Stoffe enthalten, die in der Summe als DOC gemessen werden können. In den ausgewerteten Studien wurden nur drei Werte gefunden (2 bis 3 mg/l) sowie ein CSB-Wert in der Höhe von 3 mg/l.

Weitere Ionen wie z.B. Kupfer, Zink oder organische Schadstoffe sind ebenfalls im Niederschlag gelöst, liegen jedoch im  $\mu\text{g}$ - bzw.  $\text{ng}$ -Bereich vor [Förster, 1990], [Förster und Knoche, 1999], [Nolting et al., 2008], so dass eine Berücksichtigung im Weiteren nicht erfolgt.

Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass der Bereich der Summe an (gemessenen) Ionen von etwa 2 mg/l (als Hintergrundwert) bis etwa 17 mg/l reicht. Messungen aus städtischen Gebieten ergeben etwa 9 bis 12 mg/l, aus einem Querschnitt des Bundeslandes Sachsen ca. 8 mg/l und aus einer Station des ländlichen Hunsrücks ca. 5 mg/l.

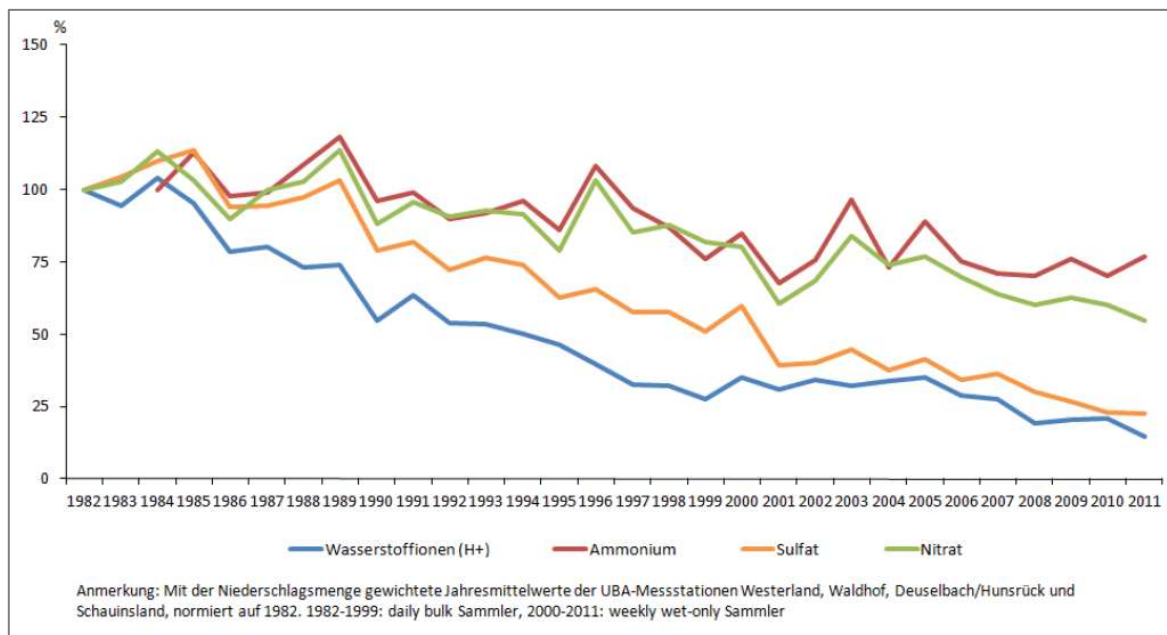


Bild 3-3: Entwicklung der Ionenkonzentration im Niederschlag (normiert auf 1982) an den Messstationen des UBA-Luftmessnetzes 1982 – 2011 [UBA, 2013]

Gewählt werden folgende Konzentrationen an gelösten Inhaltsstoffen im Staubbiederschlag, die bei einer Umrechnung von Staubbiederschlag (trockene und nasse Deposition) zu Feststoffen im Staubbiederschlag abgezogen werden müssen:

- ländlich/Hintergrund: 8 mg/l
- städtisch: 13 mg/l
- besondere Belastungen durch z.B. Industrie: 20 mg/l

Umgerechnet auf den Staubbiederschlag unter Zugrundelegung eines mittleren Niederschlags von 800 l/(m<sup>2</sup>·a) ergeben sich an gelösten Stoffen:

- ländlich/Hintergrund 17,5 mg/(m<sup>2</sup>·d) (44 % vom SN)
- städtisch 28,5 mg/(m<sup>2</sup>·d) (47 % vom SN)
- besondere Belastungen durch z.B. Industrie 43,8 mg/(m<sup>2</sup>·d) (29% vom SN)

*Das Feststoffaufkommen bis 200 µm aus dem Staubniederschlag inklusive Pollenbelastung beträgt also<sup>3</sup>:*

*22,5 mg/(m<sup>2</sup>·d) bzw. 82 kg/(ha·a) für ländlichen Standort/Hintergrundbelastung*

*31,5 mg/(m<sup>2</sup>·d) bzw. 115 kg/(ha·a) für städtischen Standort*

*106 mg/(m<sup>2</sup>·d) bzw. 387 kg/(ha·a) für Emissionsstandort*

In Kapitel 2.4.2 wurde die Kornverteilung in Staubniederschlägen dargestellt. Die einzige ausführliche Untersuchung aus Linz stammt aus den 80er Jahren, so dass eine Veränderung seither vermutet wird. Aus der Untersuchung ging hervor, dass 88% der Staubniederschläge einen Korndurchmesser von < 63 µm aufweisen. Neuere Untersuchungen aus Australien ergaben einen Anteil der Partikelgröße < 63 µm im Staubniederschlag aus Bulksammlern von 33% bis 85%; häufig von 70% an unterschiedlich genutzten Standorten [Gunawardena, 2012].

*In Ermangelung neuerer Erkenntnisse aus Europa oder Deutschland wird davon ausgegangen, dass etwa 80% des Gesamtstaubniederschlags (TSP bis 200 µm) einen Korndurchmesser von < 63 µm hat.*

*Anteil<sub>PM63,Staub</sub> = 0,8*

*Das Feststoffaufkommen bis 63 µm aus dem Staubniederschlag inklusive Pollenbelastung beträgt damit:*

*66 kg/(ha·a) für ländlichen Standort/Hintergrundbelastung*

*92 kg/(ha·a) für städtischen Standort*

*310 kg/(ha·a) für Emissionsstandort*

*Dies müsste allerdings durch weitere Messungen belegt werden.*

---

<sup>3</sup> Rechnung: 40 – 17,5 = 22,5 mg/(m<sup>2</sup>·d) für ländlichen Standort/Hintergrundbelastung  
80 – 48,5 = 31,5 mg/(m<sup>2</sup>·d) für städtischen Standort  
150 – 44 = 106 mg/(m<sup>2</sup>·d) für Emissionsstandorte

### 3.1.1.2 Pollen/Blüten in der Vegetationsphase

In der Vegetationsphase können Pollen oder Blüten Niederschlagsabflüsse ganz erheblich mit Feststoffen organischer Natur belasten. Dies kann in der Folge aufgrund des punktuellen Eintrags zu Kolmationsproblemen gerade in dezentralen Behandlungsanlagen führen. Pollen oder Blüten werden auch über den Staubbiederschlag erfasst. Wie hoch der Anteil am Staubbiederschlag und anschließend im Niederschlagsabfluss ist, ist allerdings nicht bekannt. Anhand der Auswertung von veröffentlichten Daten und an der FH Frankfurt im Rahmen einer Masterarbeit [Kreiling, 2012] durchgeführten Messungen im Dachabfluss soll die Feststoffdeposition aus Pollen quantifiziert werden.

In Bild 3-4 sind die monatlichen Messwerte der Probennahmestellen in insgesamt drei Gebieten dargestellt, in Bild 3-5 monatliche Messwerte für 2010 und 2011 in NRW.

Die Messwerte aus Linz [Hager, 2002] stammen aus dem Jahr 1998/1999 und sind daher insgesamt im Vergleich zu heutigen Messwerten hoch (der Staubbiederschlag hat sich seitdem in Österreich wie auch in Deutschland stark verringert). Die Messdaten von 120 Messorten wurden getrennt ausgewertet nach Standorten ohne besondere Emissionen oder mit besonderen Emissionen aus Industrie oder Verkehr. An den nicht belasteten Standorten ist ein Anstieg im März zu beobachten, der bis etwa August anhält. An den Standorten mit besonderen Emissionen, die mit einer anderen Skalierung dargestellt sind, ist dieser Anstieg nicht so deutlich zu erkennen, hier werden die Staubbiederschläge durch andere Emissionen überprägt.

Im Gebiet Saartal/Saarbrücken [LUA Saarland, 2009] mit 23 Messstandorten ist ein Anstieg der Werte aus dem Jahr 2008 erst im Mai und im Juli zu beobachten. Hier sind besonders hohe Werte im Oktober festzustellen.

In Bayern [LfU, 2010] (38 Messstandorte) schien die Vegetationsphase im Jahr 2010 von März bis Juli zu dauern. Im Oktober und November sind auch hier hohe Werte festzustellen.

Die aus NRW dargestellten Standorte (26 Standorte im Jahr 2010; 44 Standorte im Jahr 2011) [LANUV, 2012b] stammen aus höher belasteten Regionen mit Emittenten z.B. aus

- Industrie (Kokereien, Metallverarbeitung), Gewerbe und Landwirtschaft
- Umschlagseinrichtungen von Gütern, z. B. an Häfen, Bahnhöfen, Halden und Freilägern
- Baustellen
- Tagebau.



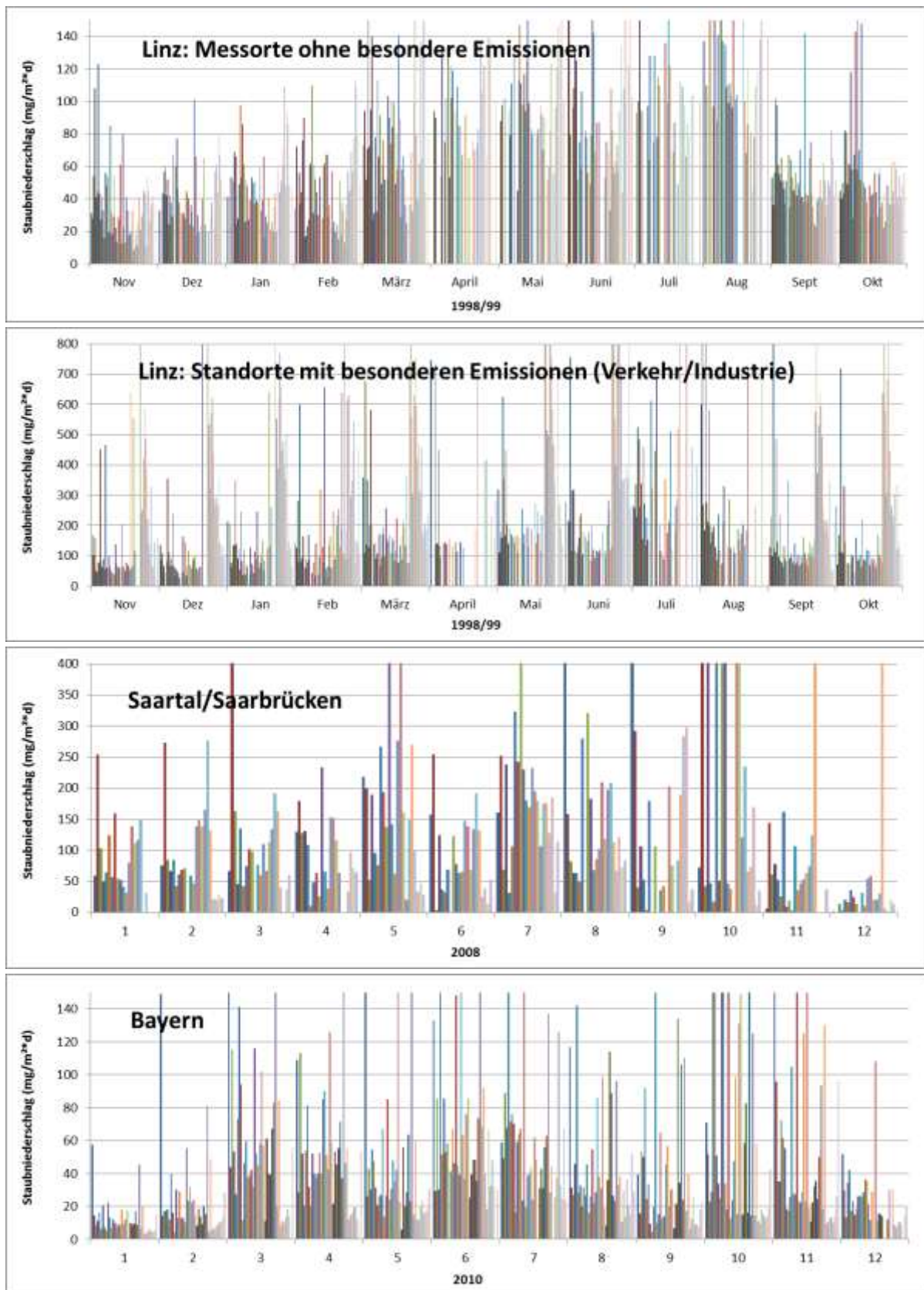


Bild 3-4: Monatliche Staubniederschläge in drei Gebieten, dargestellt sind jeweils die Messorte nebeneinander je Monat. Von oben nach unten: Linz: Messorte ohne besondere Emissionen, Linz: Standorte mit besonderen Emissionen [Hager, 2002], Saartal/Saarbrücken [LUA Saarland, 2009], Bayern [LfU, 2010]

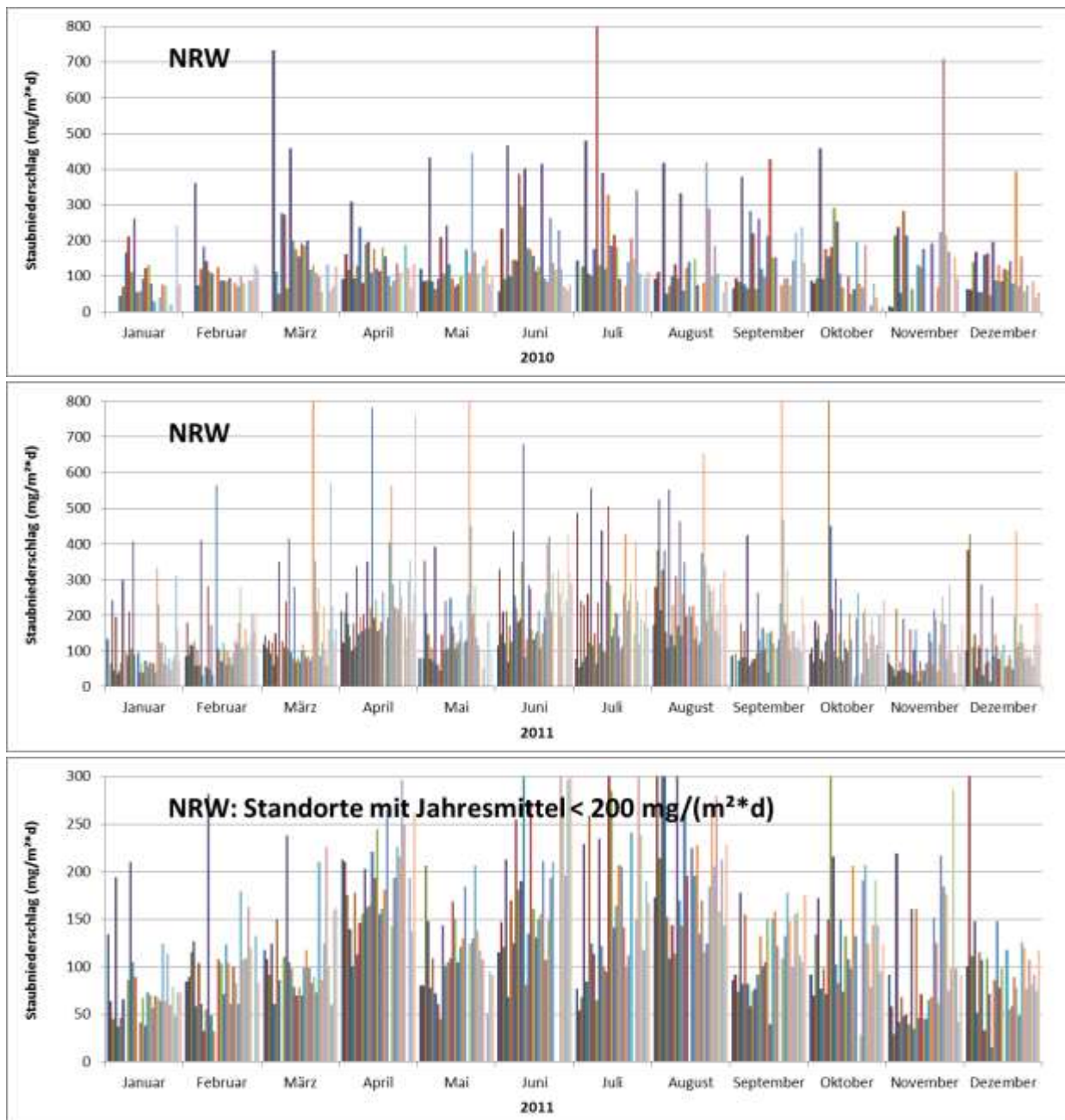


Bild 3-5: Monatliche Staubniederschläge in NRW, dargestellt sind jeweils die Messorte nebeneinander je Monat. Von oben nach unten: 2010, 2011, Standorte mit geringen Belastungen 2011. Werte aus [LANUV, 2012a]

Daher sind die Messwerte insgesamt erhöht und liegen vereinzelt über dem Grenzwert [LANUV, 2012a]. Zusätzlich dargestellt sind daher die Staubniederschläge der Messstellen, die im Mittel weniger als  $200 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  aufwiesen, also wenig durch besonders hohe Emissionen belastet sind. Ein Anstieg der einzelnen Werte ist hier von April bis August zu beobachten.

Die Vegetationsphase ist je nach Art der Vegetation von Standort zu Standort unterschiedlich, auch können sich abhängig vom Wetter Belastungen aus der Vegetation an einem Standort von Jahr zu Jahr deutlich unterscheiden. Dies ist erkennbar im



Vergleich der Messdaten aus NRW im Jahr 2010 und 2011 in Bild 3-5. Im Jahr 2010 scheint die Vegetationszeit an einigen Standorten bereits im März zu beginnen, im Jahr 2011 erst im April.

Diesen Unterschied zeigt auch Bild 3-6, in der die monatlichen Staubbiederschläge an drei Standorten in Bayern aus dem Jahr 2003 und 2005 dargestellt sind. Während im Jahr 2005 am verkehrsbelasteten Münchener Stachus z.B. gleichbleibend hohe Staubbiederschläge von Februar bis August feststellbar sind, gab es 2003 Peaks in der gleichen Größenordnung nur im März, Juni und November, wobei die Ursache auch andere sein könnten, z.B. Baustellentätigkeiten oder erhöhtes Verkehrsaufkommen.

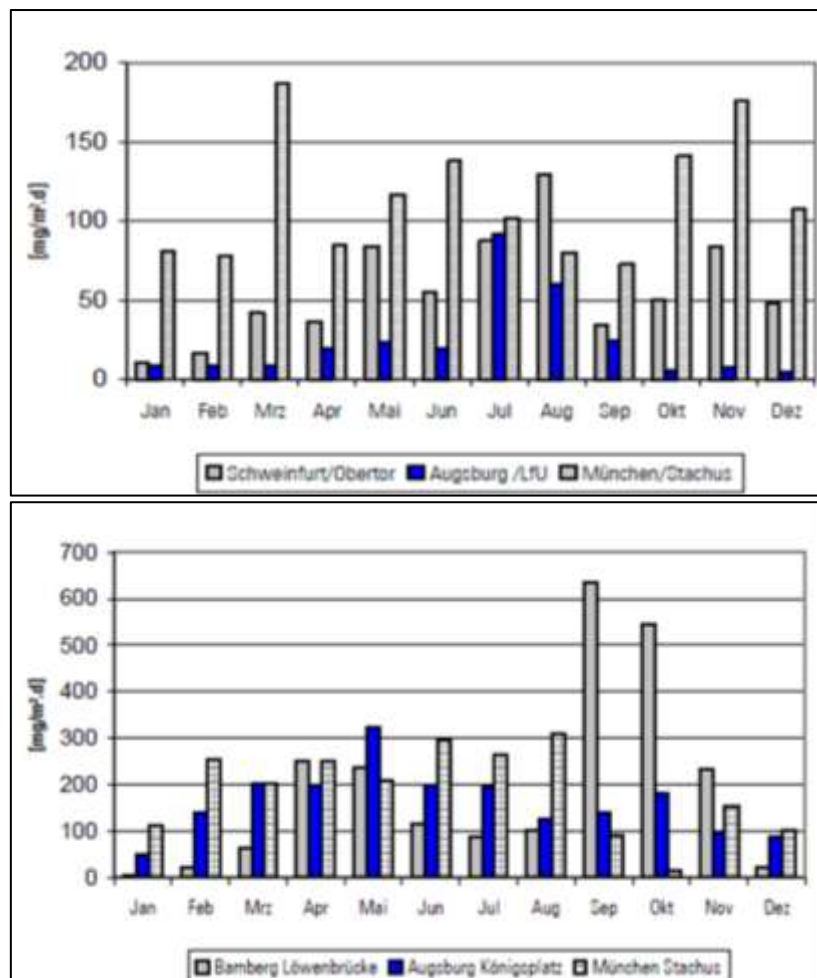


Bild 3-6: Monatliche Staubbiederschläge in bayerischen Standorten, oben: 2003 [LfU, 2003], unten: 2005 [LfU, 2005]

Die statistische Auswertung der in Bild 3-4 und Bild 3-5 dargestellten Daten (vgl. Tabelle 3-3) ergab in den vier Standorten einen Mittelwert außerhalb der Vegetationsphase zwischen 20 und 91 mg/(m²·d), wobei diese Phase unterschiedlich definiert wurde (Linz: Nov bis Feb; Saartal/Saarbrücken: Jan bis Apr, Nov, Dez; Bayern: Jan, Feb und Dez; NRW: Nov bis Feb). Während der Vegetationsphase (Linz: März bis Aug; Saartal/Saarbrücken Mai bis Aug; Bayern März bis Juli, NRW: Apr bis Aug)

stiegen die Staubniederschläge im Mittel auf 60 bis 186 mg/(m<sup>2</sup>·d). Dies bedeutet einen vegetationsbedingten Anstieg von im Mittel um 40 bis 95 mg/(m<sup>2</sup>·d).

Tabelle 3-3: Statistische Auswertungen der Staubniederschläge [mg/m<sup>2</sup>·d] in vier Messgebieten, Linz 1998/99 [Hager, 2002], Saartal/Saarbrücken 2008 [LUA Saarland, 2009], Bayern 2010 [LfU, 2010], NRW 2011 [LANUV, 2012a]

|   | Linz,<br>Standorte ohne<br>besondere<br>Emissionen | Saartal/<br>Saarbrücken | Bayern | NRW,<br>Standorte mit<br>geringer<br>Belastung |
|---|--|-------------------------|--------|--|
| <b>Mittelwert "Winter"</b>  | 45   | 87                      | 20     | 91   |
| <b>Mittelwert "Vegetation"</b>  | 104  | 147                     | 60     | 186  |
| <b>Differenz</b>  | 59   | 61                      | 40     | 95   |
| <b>90%-Wert "Vegetation"</b>  | 148  | 269                     | 114    | 297  |
| <b>Differenz 90%-Wert<br/>"Vegetation" zu<br/>Mittelwert "Winter"</b> | 103  | 182                     | 94     | 206  |

Nicht jeder Standort liegt im Einzugsgebiet von pollenrelevanten Pflanzen, daher beeinflussen auch vegetationsfreie Standorte diesen Mittelwert. Interessant ist daher auch, wie hoch der maximale Anstieg an einem Messpunkt aufgrund der Vegetation sein kann. Dies wird mit Hilfe des 90%-Wertes aller Messwerte während der Vegetationsphase im Vergleich zum Mittelwert außerhalb der Vegetationszeit abgeschätzt. Die Differenzbildung ergab Werte von 94 bis 206 mg/(m<sup>2</sup>·d). Hier ist vermutlich der Anteil der Vegetationsflächen überdurchschnittlich.

*Folgende Zusammenhänge lassen sich zusammenfassen:*

- *Pollen/Blüten sind je nach Region und Jahr zwischen März und August im Staubniederschlag enthalten und zwar meist etwa 4 Monate.*
- *Die Erhöhung des Staubniederschlags (bis 200 µm und inklusive gelöster Anteile) in der Vegetationszeit an vier ausgewerteten Standorten betrug zwischen 40 und 95 mg/(m<sup>2</sup>·d), im Mittel bei etwa 65 mg/(m<sup>2</sup>·d).*
- *Die pollenbedingte Einzelerhöhung (90%-Wert im Vergleich zu Mittelwert in der vegetationsfreien Zeit) an einzelnen Standorten mit hohem Vegetationsanteil kann bis etwa 200 mg/(m<sup>2</sup>·d) betragen.*
- *Der Flächen- oder Vegetationsfaktor beträgt somit etwa 1/3 (65/200).*
- *Im Herbst (September und Oktober) sind oftmals stark erhöhte Werte an einzelnen Standorten festzustellen, vermutlich verursacht durch Laubeinträge oder Winderosion. Die Mittelwerte in dieser Zeit sind nur leicht erhöht.*

- Die niedrigsten Werte finden sich meist drei Monate lang von November bis Januar oder Dezember bis Februar. Heiztätigkeiten, die einen hohen Anteil an feinen Partikeln  $< 0,1 \mu\text{m}$  verursachen (Ruß), scheinen sich im Gegensatz zur Auswirkung auf den Feinstaub also nicht signifikant auf den Staubniederschlag auszuwirken.

Für die Ermittlung des Gesamtfeststoffaufkommens durch Pollen müssen die gelösten Anteile abgezogen werden, die wie oben ermittelt, mit 45% des gesamten Staubniederschlags angenommen werden. Dieser Wert wird bestätigt durch eine Untersuchung von [Kreiling, 2012], der in künstlich angesetzttem Pollenwasser 53% der CSB-Belastung gelöst vorfand. Das vegetationsbedingte Gesamtfeststoffaufkommen durch Pollen beträgt somit:

$$65 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}) \cdot 0,55 = 36 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}) \text{ bzw. } 131 \text{ kg}/(\text{ha} \cdot \text{a}) \text{ bei durchschnittlichem Vegetationsanteil}$$

$$200 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}) \cdot 0,55 = 108 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}) \text{ bzw. } 394 \text{ kg}/(\text{ha} \cdot \text{a}) = \text{ca. } 400 \text{ kg}/(\text{ha} \cdot \text{a}) \text{ bei maximaler Vegetation}$$

Zum Vergleich der theoretisch ermittelten Werte mit realen Niederschlagsabflüssen kann eine Untersuchung von [Kreiling, 2012] herangezogen werden, der Dachflächenabflüsse in einem wenig belasteten Gebiet in 24 Regenereignissen während der Vegetationszeit in den Monaten April bis Mai beprobte.

In Bild 3-7 sind das von [Kreiling, 2012] beprobte Dach und die Umgebung dargestellt.



Bild 3-7: Lage des untersuchten Daches [Kreiling, 2012]

Ob eine Probe pollenbelastet war, konnte gut an der Gelbfärbung des Filtrerrückstandes erkannt werden, siehe Bild 3-8. Die Proben wurden direkt im Anschluss an das Regenereignis gemessen.

Der abflussgewichtete Mittelwert der Phase mit Pollen in der Untersuchung von [Kreiling, 2012] betrug in 21 Niederschlagsereignissen 52 mg/l AFS<sub>ges</sub>, in den Messungen ohne Pollenbelastung wurden als Belastung aus Staubbiederschlag und Dachabrieb 12,6 mg/l gefunden. Die maximale AFS<sub>ges</sub>-Konzentration von 282 mg/l wurde nach einer 11-tägigen Trockenperiode, bei der zudem ein 3-tägiger stärkerer Wind vorangegangen war, ermittelt. Der 90-%-Wert der pollenbelasteten Proben betrug 136 mg/l AFS<sub>ges</sub>.



Bild 3-8: Pollenbelaste (links) und unbelastete (rechts) Probe [Kreiling, 2012]

Es regnete während der Messperiode 92 mm (57 Tage), der Abflussbeiwert wurde zu 0,97 ermittelt.

Daraus lässt sich die pollenbedingte Feststoffdeposition berechnen zu:

$$232 \text{ kg}/(\text{ha}\cdot\text{a}),$$

welche zwischen der mittleren und maximalen oben ermittelten Deposition liegt.

Die aus dem 90-%Wert ermittelte Deposition betrug:

$$724 \text{ kg}/(\text{ha}\cdot\text{a}),$$

welcher etwa doppelt so hoch wie der oben ermittelte Maximalwert ist.

Die aus gemessenen Abflüssen berechneten Depositionswerte bestätigen, dass Pollen tatsächlich ein hohes Potenzial an Feststoffeintrag auf Flächen haben.

Dass sie hier um etwa den Faktor 2 höher liegen, zeigt, dass es klimatische und jahreszeitliche Bedingungen oder auch Standorte gibt, die extrem bezüglich einer Pollenbelastung sind. Die oben ermittelten Werte werden somit ergänzt um den Extremwert von 750 kg/(ha·a).

[Kreiling, 2012] untersuchte auch den PM63-Anteil der Feststoffe im Dachabfluss, der in den pollenbeeinflussten Proben (n = 21) im Mittel 52% (5% bis 100%) betrug. Dieser Wert erscheint relativ niedrig zu sein, da zum einen Staubbiederschlag generell einen PM63-Anteil von etwa 80% hat und die Korngröße von Pollen zwischen 10 und 100 µm liegt. Da es durchaus möglich ist, dass an diesem Standort Bäume mit überwiegend großen Pollen > 63 µm die Pollendeposition beeinflussten, wird für die weiteren Berechnungen der PM63-Anteil analog zur Staubdeposition in Höhe von 80% angenommen.

Den Vegetationsanteil für einzelne Standorte genau abzuschätzen ist schwierig. Vorgeschlagen wird, im Normalfall einen Vegetationsfaktor von 1/3 anzunehmen. Dieser kann aber variiert werden von 0 bis 1. Extrembeispiele sind in Bild 3-9 dargestellt.



Bild 3-9: Beispiele für Vegetationsfaktoren, links: 1, rechts: 0, aus [Amrosik, 2012]

Gesamtfeststoffaufkommen durch Pollen während der Vegetationszeit und bei maximalem Baumbestand

110 mg/(m<sup>2</sup>·d) bzw. 400 kg/(ha·a)

205 mg/(m<sup>2</sup>·d) bzw. ca. 750 kg/(ha·a) im Extremfall

Jahreszeitfaktor  $f_{\text{Früh}}$ : = 0,33 (4 Monate)

Vegetationsfaktor  $f_{\text{veg}}$ : = 0 bis 1, normal: 0,33

Mittleres Jahresaufkommen durch Pollen bei „normalem“ Baumbestand

12,2mg/(m<sup>2</sup>·d) bzw. 44,4 kg/(ha·a)

Anteil<sub>PM63,Pollen</sub>: = 0,8



### 3.1.1.3 Feststoffaufkommen aus Staubbiederschlag ohne Pollenbelastung

Von der in Kap. 3.1.1.1 ermittelten Staubbilastung wird nun die durchschnittliche Pollenbelastung abgezogen, um das Feststoffaufkommen durch Staubbiederschläge getrennt berechnen zu können. Die Jahreszeit- und Vegetationsfaktoren mit jeweils 1/3 berücksichtigt, ergeben sich im Mittel 12,2 mg/(m<sup>2</sup>·d) bzw. 44,4 kg/(ha·a) Feststoffe aus Pollen. Somit beträgt die Feststoffdeposition aus Staubbiederschlägen ohne Pollenbelastung:

Gesamtfeststoffaufkommen durch Staubbiederschläge ohne Pollen<sup>4</sup>:

10,3 mg/(m<sup>2</sup>·d) bzw. 38 kg/(ha·a) für ländlichen Standort/Hintergrundbelastung

19,3 mg/(m<sup>2</sup>·d) bzw. 71 kg/(ha·a) für städtischen Standort

93,8 mg/(m<sup>2</sup>·d) bzw. 343 kg/(ha·a) für Emissionsstandorte

Anteil<sub>PM<sub>63</sub></sub>: 0,8

### 3.1.2 Verkehrsbedingtes Feststoffaufkommen

Zusätzlich zu den Belastungen aus Staubbiederschlag inklusive Pollen/Blüten sind bei Verkehrsflächenabflüssen Feststoffanteile hinzuzurechnen, die aufgrund von Verkehrsaktivitäten vor Ort entstehen. Es wird davon ausgegangen, dass sämtliche Anteile aus der Verbrennung von Kraftstoffen (Abgase und Ruß), die überwiegend einen Korndurchmesser von < 2,5 µm aufweisen, im Staubbiederschlag mit enthalten sind. Dafür werden die Beträge aus Brems-, Reifen- und Fahrbahnabrieb, deren Feianteile teilweise auch im Staubbiederschlag der Grundbelastung enthalten sind, gesondert ermittelt und zur Grundbelastung hinzuaddiert.

Bild 3-10 zeigt die Vorgehensweise bei der Ermittlung des verkehrsbedingten Abriebs. Zunächst werden Fahrbahn- Reifen- und Bremsabrieb jeweils quantifiziert und zum gesamten verkehrsbedingten Abrieb aufaddiert.

Da das winterbedingte Feststoffaufkommen insbesondere nach einer Streusalzung beträchtlich sein kann, wird es gesondert ermittelt.

<sup>4</sup> Rechnung: 22,5 - 12,2 = 10,3 mg/(m<sup>2</sup>·d) für ländlichen Standort/Hintergrundbelastung  
31,5 - 12,2 = 19,3 mg/(m<sup>2</sup>·d) für städtischen Standort  
106 - 12,2 = 93,8 mg/(m<sup>2</sup>·d) für Emissionsstandorte

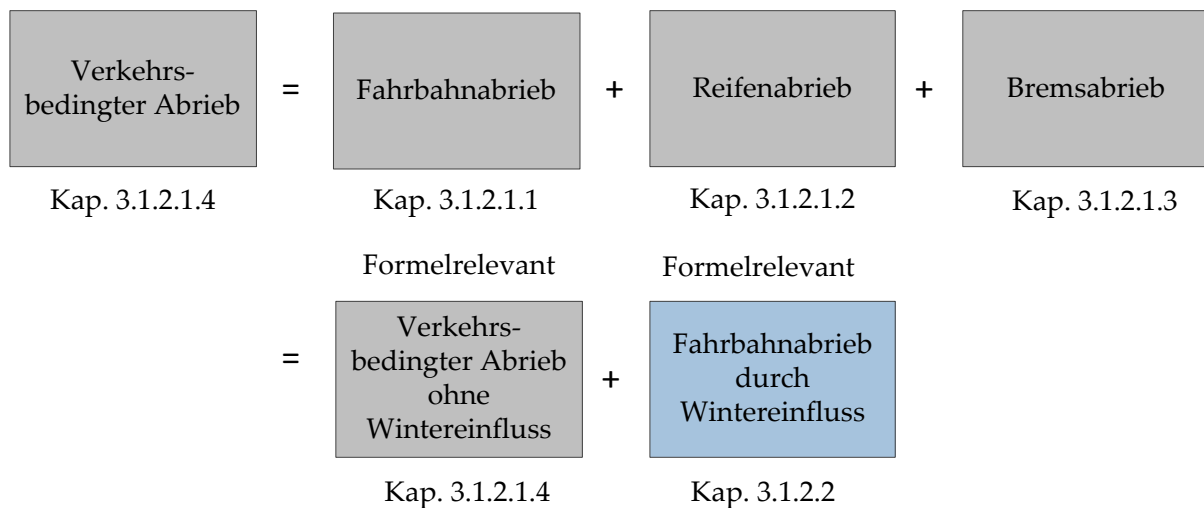


Bild 3-10: Ermittlung von niederschlagsabflussrelevanten Feststoffen aus verkehrsbedingtem Abrieb

### 3.1.2.1 Abriebsprodukte

Der **Gesamtabrieb aus dem Straßenverkehr** wurde nach [Hillenbrand et al., 2005] für Deutschland mit 1.737.120 t/a aus Fahrbahnabrieb, 111.420 t/a aus Reifenabrieb und 12.350 t/a aus Bremsabrieb beziffert. Er wurde mittels spezifischen Massenverlusten in [mg/km Fahrzeugleistung] ermittelt.

Eine Möglichkeit der Quantifizierung des Abriebs je m<sup>2</sup> ist, sie auf die gesamte Verkehrsfläche in Deutschland zu beziehen, die laut statistischem Bundesamt im Jahr 2004 etwa 17.500 km<sup>2</sup> und im Jahr 2010 etwa 18.000 km<sup>2</sup> betrug [Statistisches Bundesamt, 2012]. Die Verkehrsfläche untergliedert sich in Straße, Weg, Platz, Bahngelände, Flugplatz, Schiffsverkehr und sonstige Flächen, wobei Straßen, Wege und Plätze in der Summe mehr als 90% ausmachen, Straßen etwa 50% und Plätze weniger als 2% der Gesamtfläche (Zahlen aus Baden-Württemberg von 2001 [Wöllper, 2004]). Unter der Annahme, dass 50% der Verkehrsfläche Flächen mit Kfz-Bewegungen sind (9.000 km<sup>2</sup>), lässt sich der Abrieb pro ha Verkehrsfläche grob abschätzen zu<sup>5</sup>:

1.930 kg/(ha·a) Fahrbahnabrieb

120 kg/(ha·a) Reifenabrieb

14 kg/(ha·a) Bremsabrieb

Diese Werte stellen Mittelwerte für alle Straßentypen und Verkehrsbelastungssituationen dar.

Verglichen mit Reifen- und Fahrbahnabrieb ist der Bremsabrieb bezüglich des Feststoffgehaltes demnach vernachlässigbar, wobei diese Aussage nicht für einzelne schädliche Inhaltsstoffe gilt.

<sup>5</sup> 1.737.120 t/a · 1000 kg/t · 10.000 m<sup>2</sup>/ha/9.000 km<sup>2</sup> · 1000 m/km · 1000 m/km = 1.930 kg/ha·a Fahrbahnabrieb

[Legret und Pagotto, 1999] ermittelten für eine Autobahn mit 12.000 DTV je Richtung (also 24.000 DTV) und 7% Schwerlastverkehr 314 kg/(km und Jahr) Reifenabrieb sowie 100 kg/(km und Jahr) Bremsabrieb. Die Autobahnbreite an der Messstelle betrug 11,6 m. Umgerechnet auf Hektar und Jahr ergeben sich etwa:

270 kg/(ha·a) Reifenabrieb und

86 kg/(ha·a) Bremsabrieb

was aufgrund der höheren Belastung einer Autobahn von der Größenordnung her plausibel erscheint.

Insbesondere beim Fahrbahnabrieb ist mit einem gewichtsmäßig hohen Anteil an größeren Anteilen  $\gg 63 \mu\text{m}$  Korngröße zu rechnen. Um den PM<sub>63</sub> genauer quantifizieren zu können, werden im Folgenden die Abriebszahlen auch über veröffentlichte Daten zum Staubniederschlag (Korngröße bis 200  $\mu\text{m}$ ) ermittelt.

#### 3.1.2.1.1 Fahrbahnabrieb

Der Fahrbahnabrieb ist sehr variabel und hängt von vielen Faktoren im Einzugsgebiet ab (Zustand der Straße, DTV, Anteil Schwerlastverkehr etc.). Ein Zusammenhang zwischen der Art des Fahrbahnbelags (Beton oder Asphalt) mit dem Feststoffaufkommen in Verkehrsflächenabflüssen konnte nicht hergestellt werden [Barrett et al., 1995].

Ältere Einschätzungen gehen von sehr hohen spezifischen Fahrbahnabriebszahlen aus, z.B. 20 bis 50 g/(km und Fahrzeug) [Lygren et al., 1984] bzw. 11-24 g/(km und Fahrzeug) [Lindgren, 1996]. Diese Einschätzungen bezogen sich jedoch teilweise auf Fahrzeuge mit Spikes oder Schneeketten und auf den gesamten Abrieb, also auch auf sehr grobe Bestandteile. Umgerechnet auf das Feststoffaufkommen ergeben sich bei Annahme von 10.000 DTV 33.000 bis 150.000 kg/(ha·a). Dieser Wert erscheint unrealistisch hoch.

Für Bundesstraßen und Autobahnen wurde ein spezifischer jährlicher Fahrbahnabrieb von 0,8 mm bis 1,0 mm [Muschak, 1989] genannt. Unter der Annahme eines mittleren spezifischen Gewichts der Baumaterialien von 1,8 t/m<sup>3</sup> ( $Q_{\text{Asphalt}} = 1,3 \text{ t/m}^3$ ,  $Q_{\text{Beton}} = 2,2 \text{ t/m}^3$ ) ergibt sich hier ein Feststoffaufkommen von 14.000 bis 18.000 kg/(ha·a). Dieser Wert ist ebenfalls sehr hoch. Es ist zu bedenken, dass es um den Verlust an Fahrbahnsubstanz insgesamt geht und hier sehr grobe Anteile mit enthalten sind, die für einen Niederschlagsabfluss nicht zur Verfügung stehen. Die Situation aus Bild 3-11 z.B. macht deutlich, dass sehr grober Fahrbahnabrieb gerade nach den Frostperioden zwar vorhanden ist, aber entweder durch die Größe der Partikel nicht mit dem Niederschlagsabfluss transportiert werden kann oder durch Reparaturen der Fahrbahndecke vor einem Abspülen mit dem Niederschlagsabfluss entfernt wird.





Bild 3-11: Nicht transportierter Fahrbahnabrieb/-verlust nach einem Niederschlagsereignis

[Nielsen et al. 2003] ermittelten für eine Bestandsaufnahme der Feinstaubbelastung in Dänemark aus zahlreichen Literaturdaten 145 mg Gesamtstaub bis 200 µm (TSP)/PKW sowie 780 mg TSP/LKW und Busse je Kilometer. 5% davon wurde dem Feinstaub PM 10 zugeordnet. Der Anteil des groben Fahrbahnabriebs, der nicht in die Luft transportiert wird (> 200 µm), ist im TSP nicht enthalten. Unklar ist, welcher durchschnittliche Verkehr in Dänemark herrscht und auf welche Straßenbreite sich dieser Wert bezieht. Angenommen werden durchschnittlich 5.000 bis 10.000 DTV und eine Straßenbreite von 12 m.

Damit ergibt sich eine geschätzte PM-200-Belastung von:

220 bis 440 kg PM200/(ha·a) für PKW und

1.185 bis 2.370 kg PM200/(ha·a) für LKW.

In Tabelle 3-4 sind alle Angaben bezogen auf kg/(ha·a·DTV) mit den speziellen Randbedingungen zusammengefasst.

Tabelle 3-4: Zusammenstellung ermittelter Fahrbahnabrieb je DTV

| Wert<br>kg/(ha·a·DTV) | Korngröße  | Fahrzeugtyp | Verkehrsart  | umgerechnet mit<br>Daten aus |
|-----------------------|--|-------------|--|------------------------------|
| 0,640                 | alle, auch die nicht mit NA transportiert werden | alle        | unter Annahme von 25.000 DTV, Bundesstraßen und Autobahnen | [Muschak, 1989]              |
| 0,193                 | alle, auch die nicht mit NA transportiert werden | alle        | unter Annahme von 10.000 DTV, alle Straßen                 | [Hillenbrand et al., 2005]   |
| 0,022 bis 0,044       | PM200  | PKW         | mittlere Situation   | [Nielsen et al. 2003]        |
| 0,119 bis 0,237       | PM200  | LKW         | mittlere Situation   | [Nielsen et al. 2003]        |

Bei den Angaben des Fahrbahnabriebs aus [Hillenbrand et al., 2005] für alle Straßen wurde von einer durchschnittlichen DTV von 10.000 ausgegangen. Bei den Angaben aus [Muschak, 1989] für Bundesstraßen und Autobahnen, wurde von einer durchschnittlichen DTV von 25.000 ausgegangen.

Offen ist die Kornverteilung des Fahrbahnabriebs, um Rückschlüsse auf den PM63-Anteil ziehen zu können. Fahrbahnabrieb ist gröber als Brems- oder Reifenabrieb sowie Staubniederschlag, siehe auch Kap. 2.2.2 und 2.4.3, und somit von der Kornverteilung gröber als die in Bild 2-33 dargestellten Straßenstäube. Daraus lassen sich ausgehend von den Kurven, die weit rechts liegen, etwa 40% grobe Anteile > 1.000 µm herauslesen. Unterstellt wird, dass das die Anteile sind, die nicht in den Straßenabfluss transportiert werden, der ja insgesamt mehr feinere Anteile aufweist, siehe auch Bild 2-34. 60 % der Feststoffe sind kleiner als 1.000 µm und werden in den Niederschlagsabfluss transportiert, wie auch die feineren Anteile, von denen nach Bild 2-34 20 % kleiner 200 µm und 5% kleiner 63 µm sind.

Die abgeschätzte prozentuale Aufteilung der Korngrößen im Fahrbahnabrieb ist in Bild 3-12 dargestellt.

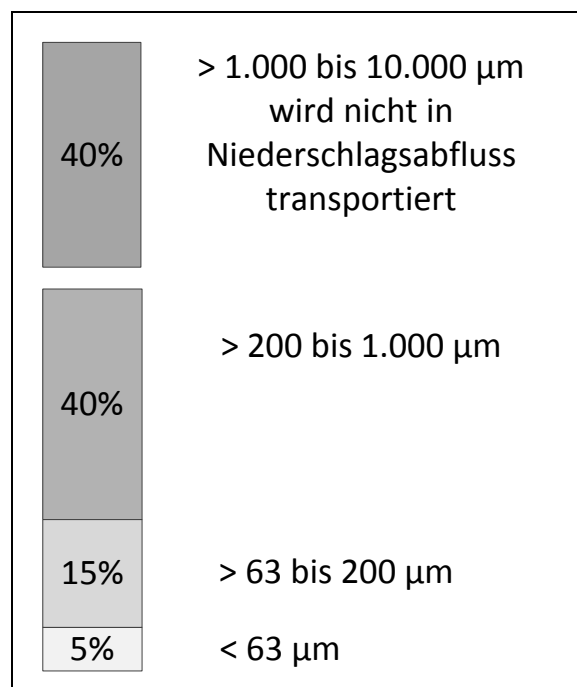


Bild 3-12: Mögliche Korngrößenverteilung von für Niederschlagsabflüsse relevantem Fahrbahnabrieb, eigene Darstellung

Ausgehend von einem spezifischen Wert von 0,2 kg/(ha·a·DTV) ergeben sich somit 0,12 kg/(ha·a·DTV), die abflussrelevant sind, sowie 0,01 kg/(ha·a·DTV) PM63-Anfall aus Fahrbahnabrieb.

In diesen Werten ist der winterbedingte Anfall an Fahrbahnabrieb mitenthalten, dieser wird mit 0,03 kg/(ha·a·DTV) abgeschätzt, im Mittel mit 30% PM63Anteil, siehe dazu Kap. 3.1.2.2.

Über die Einschätzung, dass 10% des gesamten Verkehrs von LKW und Bussen verursacht wird und die Belastung durch LKW im Vergleich zu PKW fünfmal so groß ist, ergeben sich etwa<sup>6</sup>:

Für den Niederschlagsabfluss relevantes Gesamtfeststoffaufkommen aus Fahrbahnabrieb für normalen Verkehrsfluss, ohne Wintereinfluss:

0,064 kg/(ha·a·DTV) PKW

0,320 kg/(ha·a·DTV) für LKW und Busse

PM63-Aufkommen aus Fahrbahnabrieb für normalen Verkehrsfluss ohne Wintereinfluss

0,008 kg/(ha·a·DTV) für PKW

0,040 kg/(ha·a·DTV) für LKW und Busse

### 3.1.2.1.2 Reifenabrieb

Der Reifenabrieb im Staub ist überwiegend größer als 10 µm mit einem vermuteten Schwerpunkt in der Größenverteilung < 100 µm [Düring et al., 2004]. [Nielsen et al., 2003] gehen ebenfalls von einem nur geringen Anteil (kleiner 10%) der Korngröße von 10 µm im Gesamtstaub TSP (< 200 µm) aus. In einer Untersuchung in Staubbiederschlägen in Österreich [UBA, 2006] wurden Abriebprodukte aus dem Verkehr in drei Proben identifiziert, die eine Korngröße von 70 bis 100 µm aufwiesen, was den vermuteten Schwerpunkt belegt.

Das Emission Inventory Guidebook der Europäischen Umweltagentur [EEA, 2003] weist für den Gesamt-Reifenabrieb in Abhängigkeit vom Fahrzeugtyp aus verschiedenen Studien stammende Werte zwischen 36 und 193 mg/(km und Fahrzeug) bzw. zwischen 8 und 90 mg/(km und Reifen) abhängig vom Fahrzeugtyp und ob es sich um Vorder- oder Hinterreifen handelt. In dieser Studie wird angemerkt, dass ein Teil des Reifenabriebs als Staubbiederschlag niedergeht, also nicht im Feinstaub der Luft enthalten ist, oder auch in größeren Fetzen vorliegt, das heißt eher viel größer als 100 µm ist.

Nach einer Literaturlauswertung von [Nielsen et al., 2003] beträgt der Reifenabrieb im Staubbiederschlag TSP je Kilometer Straßelänge für PKW im Durchschnitt 69 mg und für LKW und Busse 371 mg/km.

Aus diesen Daten lässt sich folgendes herauskristallisieren:

<sup>6</sup> Rechnung AFS<sub>ges</sub>: 0,12 - 0,03 kg/(ha·a·DTV) = 0,9 PKW-Abrieb + 0,1 · 5 · LKW-Abrieb

PKW-Abrieb = 0,09 / 1,4 = 0,064 kg/(ha·a·DTV)

LKW-Abrieb = 5 · 0,064 kg/(ha·a·DTV) = 0,320 kg/(ha·a·DTV)

Rechnung PM63: 0,02 - 0,03 · 0,3 kg/(ha·a·DTV) = 0,9 PKW-Abrieb + 0,1 · 5 · LKW-Abrieb

PKW-Abrieb = 0,011 / 1,4 = 0,008 kg/(ha·a·DTV)

LKW-Abrieb = 5 · 0,008 kg/(ha·a·DTV) = 0,040 kg/(ha·a·DTV)

Der gesamte Reifenabrieb beträgt etwa 36 bis zu 193 mg/km und PKW je nach Fahrzeugtyp, für LKW und Busse je nach Anzahl und Art der Bereifung mehr (371 bis über 1.000 mg/km). Darin sind auch größere Bestandteile enthalten. Der Schwerpunkt der Korngröße der Reifenabriebspartikel liegt bei etwa 100 µm.

Unter der Annahme von durchschnittlich 10.000 DTV und einer Straßenbreite von 12 m lässt sich der spezifische Anfall an TSP bis 200 µm pro ha und Jahr berechnen zu:

110 bis 600 kg/(ha · a) (10.000 DTV, b = 12 m, PM200) für PKW und  
1.130 bis 3.000 kg/(ha · a) für LKW.

In Tabelle 3-5 sind sämtliche Daten zu Reifenabrieben bezogen auf die DTV zusammengefasst.

Die Spannweite des möglichen Feststoffaufkommens ist demnach recht groß. Die Belastung durch LKW liegt mit einem Faktor von 5 bis 10 höher als die durch PKW. Gewählt wird ein mittlerer Wert für PKW und in Ermangelung weiterer Kenntnisse ein Faktor von 5 zwischen LKW und PKW.

Tabelle 3-5: Zusammenstellung ermittelter Reifenabrieb je DTV

| Wert<br>kg/(ha·a·DTV) | Korngröße | Fahrzeugtyp        | Verkehrsart        | umgerechnet mit<br>Daten aus       |
|-----------------------|-----------|--------------------|--------------------|------------------------------------|
| 0,008                 | alle      | alle               | mittlere Situation | [Hillenbrand et al., 2005]         |
| 0,011                 | alle      | 93% PKW, 7%<br>LKW | Autobahn           | [Legret und Pagotto, 1999]         |
| 0,010 bis 0,060       | TSP       | PKW                | mittlere Situation | [EEA, 2003], [Nielsen et al. 2003] |
| 0,113 bis 0,300       | TSP       | LKW                | mittlere Situation | [EEA, 2003], [Nielsen et al. 2003] |

Auch beim Reifenabrieb ist die Kornverteilung, um Rückschlüsse auf den PM 63 ziehen zu können, offen. Der Gesamtfeststoffgehalt entspricht dem PM200. Der Schwerpunkt der Kornverteilung liegt etwa bei 100 µm, so dass der PM63-Anteil auf etwa 60% des Gesamtfeststoffaufkommens abgeschätzt wird.

Gesamtfeststoffaufkommen aus Reifenabrieb für normalen Verkehrsfluss

0,035 kg/(ha·a·DTV) für PKW

0,175 kg/(ha·a·DTV) für LKW und Busse

PM63-Aufkommen aus Reifenabrieb für normalen Verkehrsfluss

0,021 kg/(ha·a·DTV) für PKW

0,105 kg/(ha·a·DTV) für LKW und Busse

### 3.1.2.1.3 Bremsabrieb

Der Bremsabrieb wird überwiegend dem Feinstaub kleiner als 10 µm zugeordnet [Nielsen et al., 2003]. In einer Untersuchung in Staubbiederschlägen in Österreich [UBA, 2006] wurden jedoch auch Bremsbelagsabriebprodukte (blättrige, unregelmäßige Kornaggregate aus Graphit, metallischem Eisen, Messing, Kupfer und Silikaten) in einer Staubbiederschlagsprobe identifiziert, die Korngrößen von bis zu 150 µm aufwiesen. Da Bremsabrieb im Vergleich zu den anderen Abriebsarten eine untergeordnete Rolle spielt, wird für die Bilanz angenommen, dass Bremsabrieb vollständig dem PM<sub>63</sub> zuzuordnen ist (obwohl dies nicht ganz zutreffend ist).

Abhängig vom Verkehrsfluss wurden in der Schweiz unterschiedliche Bremsabriebsemissionen gefunden. In Zürich-Weststraße (ca. 23.000 DTV, 2-spurig mit Parkbuchten (google-earth), geschätzte Breite  $b = 9$  m) mit gestörtem Verkehrsfluss wurden 15 mg/(km·Kfz) im PM<sub>10</sub> gefunden. Dagegen war der Beitrag des Bremsabriebs entlang der Überlandautobahn in Reiden (2·2 Fahrstreifen + 2 Standstreifen, (google-earth) geschätzte Breite  $b = 21$  m, 47.000 DTV, 11% Schwerlastverkehr [Kanton Luzern, 2013]) mit flüssigem Verkehr deutlich geringer (3 mg/(km·Kfz)). An beiden Standorten wurden die Emissionsfaktoren für Bremsabrieb für schwere Motorfahrzeuge auf etwa den Faktor zehn geschätzt im Vergleich zu leichten Motorfahrzeugen [ASTRA, 2009]. Umgerechnet auf den auf die Fläche und das Jahr bezogenen Feststoffanfall ergeben sich:

140 kg/(ha · a) (23.000 DTV,  $b = 9$  m, PM<sub>10</sub>) bei gestörtem Verkehrsfluss<sup>7</sup>

25 kg/(ha · a) (47.000 DTV,  $b = 21$  m, PM<sub>10</sub>) bei flüssigem Verkehr<sup>8</sup>

Nach einer Literaturlauswertung von [Nielsen et al., 2003] beträgt der Bremsabrieb je Kilometer Straßenlänge im TSP (bis 200 µm) bei PKW 6 mg, bei LKW und Bussen 32 mg/km. Das Emission Inventory Guidebook der Europäischen Umweltagentur der EU [EEA, 2003] verwendet als Grundlage für weitere Berechnungen des Feinstaubanfalls ähnliche Zahlen mit 7 mg/km für PKW und 12 bis 32 mg/km für LKW bzw. Schwerlastler.

Umgerechnet auf die Einheit kg/(ha·a) unter der Annahme oben verwendeter Belastungen und Straßenabmessungen bedeuten dies

55 bis 64 kg/(ha · a) (30.000 DTV,  $b = 12$  m, PM<sub>200</sub>) für PKW

110 bis 292 kg/ha · a) (30.000 DTV,  $b = 12$  m, PM<sub>200</sub>) für LKW

In Tabelle 3-6 sind alle Angaben bezogen auf kg/(ha·a·DTV) mit den speziellen Randbedingungen zusammengefasst.

---

<sup>7</sup> Rechnung: (15 mg (Kfz·a)/ 1000 mg/g/1000 g/kg) · 23.000 Kfz · 365 d/a/(9 m · 1.000 m/10.000m<sup>2</sup>/ha))

<sup>8</sup> Rechnung: (3 mg/(Kfz·a)/ 1000 mg/g/1000 g/kg) · 47.000 Kfz · 365 d/a/(21 m · 1.000 m/10.000 m<sup>2</sup>/ha))

Tabelle 3-6: Zusammenstellung ermittelter Bremsabrieb je DTV

| Wert<br>kg/(ha · a · DTV) | Korngröße | Fahrzeugtyp      | Verkehrsart       | umgerechnet mit<br>Daten aus |
|---------------------------|-----------|------------------|-------------------|------------------------------|
| 0,0036                    | alle      | 93% PKW, 7% LKW  | Autobahn          | [Legret und Paggotto, 1999]  |
| 0,0005                    | PM10      | 89% PKW, 11% LKW | flüssiger Verkehr | [ASTRA, 2009].               |
| 0,0060                    | PM10      | alle             | gestörter Verkehr | [ASTRA, 2009].               |
| 0,0017                    | TSP       | PKW              | alle              | [EEA, 2003]                  |
| 0,0040 bis<br>0,0100      | TSP       | LKW              | alle              | [EEA, 2003]                  |

Gewählt für die nachfolgenden Berechnungen werden:

*Gesamtfeststoff- und PM63 Aufkommen aus Bremsabrieb für normalen Verkehrsfluss*  
 0,002 kg/(ha·a·DTV) für PKW  
 0,010 kg/(ha·a·DTV) für LKW und Busse

### 3.1.2.1.4 Gesamtabrieb

In Tabelle 3-7 ist das ermittelte Gesamtfeststoff- und PM63-Aufkommen aus Fahrbahn-, Reifen- und Bremsabrieb je Fahrzeug für normalen Verkehr ohne den frostbedingten Einfluss verstärkten Fahrbahnabriebs dargestellt.

Tabelle 3-7: PM63-Abrieb je PKW und LKW bei normalem Verkehr, (DTV: in [Fahrzeuge/d])

|   | AFS <sub>ges</sub><br>[kg/(ha·a·DTV)] |                  | Anteil<br>PM63<br>[%] | PM63<br>[kg/(ha·a·DTV)] |                  |
|---|---------------------------------------|------------------|-----------------------|-------------------------|------------------|
|   | PKW                                   | LKW/Busse        |                       | PKW                     | LKW/Busse        |
| Fahrbahnabrieb<br>(dem Niederschlagsabfluss zur Verfügung stehend; ohne Wintereinfluss) | 0,064                                 | 0,320            | 12,5                  | 0,008                   | 0,040            |
| Reifenabrieb  | 0,035                                 | 0,175            | 60                    | 0,021                   | 0,105            |
| Bremsabrieb   | 0,002                                 | 0,010            | 100                   | 0,002                   | 0,010            |
| <b>Summe</b>  | <b>ca. 0,100</b>                      | <b>ca. 0,500</b> | <b>ca. 30</b>         | <b>ca. 0,030</b>        | <b>ca. 0,150</b> |

Der Gesamtabrieb besteht demnach zu etwa 2/3 aus Fahrbahnabrieb und etwa 1/3 aus Reifenabrieb. Da der relativ grobe Fahrbahnabrieb (12,5% Feinanteile) den überwiegenden Anteil des dem Niederschlagsabfluss zur Verfügung stehenden verkehrsbedingten Abriebs ausmacht, ist der PM63-Anteil im gesamten verkehrsbedingten Abrieb mit ca. 30 % gering.

Bremsabrieb ist mit ca. 2% unbedeutend, was die Gesamtfeststoffmenge betrifft, trägt aber zu 7% am gesamten PM63-Aufkommen bei, da er vollständig aus Feinanteilen besteht.

Das durch Schwerverkehr verursachte Feststoffaufkommen wird etwa fünfmal größer angenommen als das durch PKW verursachte Aufkommen.

Gesamtfeststoffaufkommen aus verkehrsbedingtem Abrieb, das für Niederschlagsabfluss zur Verfügung steht für normalen Verkehrsfluss, ohne winterbedingten Feststoffanteil

0,10 kg/(ha·a·DTV) für PKW

0,50 kg/(ha·a·DTV) für LKW und Busse

Anteil<sub>PM63,Verkehr</sub>: 0,30

### 3.1.2.2 Winterbedingte Feststofferhöhung

Der Fahrbahnabrieb kann teilweise durch den **Frost** sowie die **Streusalzung** im Winter erhöht werden. Hier ist noch nicht abschließend geklärt, welche einzelnen Faktoren die AFS-Erhöhung beeinflussen. Vermutet werden zum einen die vorherrschenden Temperaturen, die Dauer und Anzahl der Frostperioden, das eingesetzte Straßenmaterial und der Straßenzustand sowie die Belastung durch Fahrzeuge (DTV) [Hausmann, 2009], aber auch die Höhe und Art des Streusalzeinsatzes. Auch kann eine mangelnde Entwässerung Ursache von Frosthebungen bei einer Asphaltdecke sein und in der Folge zu Einzelrissen oder Schlaglöchern führen [Rosauer, 2010].

Der Einsatz von Streusalz bewirkt eine Dispergierung der feineren Feststoffe, siehe auch Kap. 2.3.2. Daher wird der Anteil des PM63 im winterbedingten Feststoffaufkommen bei Einsatz von Streusalz höher.

Autobahnen werden bei angekündigtem Frost und Schneefall grundsätzlich gestreut. Die Streutechnik und die Anzahl der Wiederholungsstreuungen obliegen dabei der zuständigen Autobahnmeisterei. Üblich sind Trockensalz (NaCl), zusätzlich als Befuchtungsmedium MgCl<sub>2</sub>- oder CaCl<sub>2</sub>-Lösung, welches mehr Feuchtigkeit aus der Luft aufnehmen kann und somit den Lösungsprozess beschleunigt oder eine NaCl-Lösung [Hausmann, 2009]. Um Straßen gegen Frostschäden zu schützen, werden sie abhängig von dem sogenannten Frostindex, der abhängig von Lage, Höhe und klimatischen Bedingungen in einer deutschlandweit gültigen Karte herausgegeben wurde, mit einer Mehrdicke beaufschlagt. Beim Aufbau der Straßen wird darüber hinaus die jeweilige Frosteindringtiefe berücksichtigt. Es existieren drei Frostzonen, der Westen Deutschlands ist mit Ausnahme der Mittelgebirge überwiegend in der



Zone mit dem geringsten Frostindex (I) eingeteilt. Im Osten von Thüringen, Sachsen und Bayern, in Alpennähe sowie im Harz herrscht dagegen der höchste Frostindex (III) vor. Dies bedeutet, dass hier die Kälteperioden länger und mit niedrigeren Temperaturen gekennzeichnet sind [Gerth et al., 2008].

Die Abschätzung der winterbedingten Feststoffhöhung wird mittels Messungen an einer Stadtautobahn in Berlin mit 119.000 DTV, einer Messung an einer Kreuzung in Hamburg mit 28.000 DTV, an einer Bundesstraße in Augsburg mit 7.000 DTV und an einer österreichischen Autobahn mit 60.000 DTV vorgenommen.

[Lambert, 2011] ermittelte einen zusätzlichen Beitrag an Sediment an einer Autobahn in Berlin mit 119.000 DTV von 1.350 kg/ha in drei Monaten, wobei 47,7 % dem Feinanteil < 63 µm zuzuordnen waren. Umgerechnet auf die Einheit [kg/(ha·a·DTV)] ergeben sich **0,045 kg AFS<sub>ges</sub>/(ha·a·DTV)** und **0,023 kg PM63/(ha·a·DTV)**.

[Nadler und Meißner, 2008] untersuchten neun Jahre lang die Belastung an der Derchinger Straße in Augsburg, eine Bundesstraße mit einer DTV von etwa 7.000. Interessant sind die AFS-Mittelwerte der einzelnen Quartale, an denen die winterbedingte Belastung abgelesen werden kann, vgl. Tabelle 3-8. Die Erhöhung im Straßenabfluss im Vergleich zu den Mittelwerten der drei anderen Quartale lag im 2. Quartal bei **302 mg/l AFS<sub>ges</sub>**, wobei hier auch der Polleneinfluss mit enthalten ist. Umgerechnet auf eine Abriebdeposition ergeben sich (mit N = 811 mm/a als langjähriges Mittel für Augsburg, ψ = 0,8) etwa: 1.959 kg/ha·a, abzüglich einer durchschnittlichen Pollenbelastung von 133 kg/(ha·a) ergibt sich ein winterbedingtes zusätzliches Feststoffaufkommen von 1.826 kg/(ha·a). Bezogen auf die DTV lassen sich **0,261 kg AFS<sub>ges</sub>/(ha·a·DTV)** berechnen, also wesentlich mehr als in der Berliner Untersuchung.

Tabelle 3-8: AFS<sub>ges</sub> in [mg/l] als Mittelwert je Quartal in einer neunjährigen Messkampagne an der Derchinger Straße in Augsburg mit 7.000 DTV [Nadler und Meißner, 2008]

| Quartale    | 4    | 1   | 2   | 3    | 1 - 4 |
|-------------|------|-----|-----|------|-------|
| AFS in mg/l | 49,7 | 120 | 378 | 56,7 | 98,4  |

Aus zwei Stichproben an einer mit Ampeln versehenen Straßenkreuzung in Hamburg mit 28.000 DTV und häufigen Brems- und Anfahrvorgängen wurde nach der Winterstreuzeit ein über den sonstigen Mittelwert hinausgehende Konzentration von **1.382 mg/l AFS<sub>ges</sub>** im Straßenabfluss ermittelt [Dierkes, 2010]. Dies ergibt (mit N = 670 mm, ψ = 0,8) etwa 7.400 kg/(ha·a) bzw. **0,265 kgAFS<sub>ges</sub>/(ha·a·DTV)**.

[Geiger-Kaiser und Jäger, 2005] ermittelten an der österreichischen Autobahn A1 mit 60.000 DTV AFS-Maximalwerte im Winter an drei Messstellen in der Höhe von 350 mg/l, 270 mg/l und 460 mg/l AFS<sub>ges</sub> im Vergleich zum Gesamtmittelwert von 60 mg/l im 1,5 Jahre dauernden Untersuchungszeitraum. Daraus lässt sich auf eine winterbe-

dingte Erhöhung von etwa **200 bis 400 mg/l AFS<sub>ges</sub>** oder 1.280 bis 2.560 kg/(ha·a) schließen. Bezogen auf die DTV sind dies: **0,021 bis 0,043 kg AFS<sub>ges</sub>/(ha·a·DTV)**.

Eine andere Herangehensweise an die mögliche Belastung von Verkehrsflächenabflüssen mit Feststoffen im Winter wird mit Hilfe der Vorgaben des Laborprüfverfahrens DIN EN 1338 vorgenommen. Dieses Prüfverfahren dient dazu, den Abrieb von Betonpflastern aufgrund von Frostwechseln zu ermitteln. Der nach DIN EN 1338 zu testende Abrieb an Betonpflastern nach simulierten 28 Frostperioden darf maximal 1 kg/m<sup>2</sup> betragen. Vorausgesetzt, dass sich diese Frostperioden innerhalb eines Jahres abspielen, ergeben sich rechnerisch somit maximal 1 kg/(m<sup>2</sup>·a) oder 10.000 kg/(ha·a). Werden diese Frostperioden auf fünf Jahre verteilt, ergeben sich **2.000 kg AFS<sub>ges</sub>/(ha·a)**. Bei 10.000 Fahrzeugen täglich sind dies **0,2 kg AFS<sub>ges</sub>/(ha·a·DTV)**, **bei 50.000 Fahrzeugen 0,04 kg AFS<sub>ges</sub>/(ha·a·DTV)**. Dies entspricht von der Größenordnung her den aus den Untersuchungen ermittelten Aufkommenswerten.

In Tabelle 3-9 sind die Ergebnisse der Studien zusammengefasst.

Tabelle 3-9: Winterbedingte Erhöhung des AFS-Aufkommens

| Studie  | Messwert  | Umrechnung auf kg/(ha·a)           | Umrechnung auf kg/(ha·a·DTV) | Quelle                        |
|---|---|------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Autobahn, Berlin, 119.000 DTV, 6 Fahrspuren   | 1.350 kg/ha zusätzliches Straßensediment in drei Monaten, 48% PM63    | 1.350                              | 0,011                        | Lambert, 2011                 |
| Bundesstraße, Augsburg. 7.000 DTV             | 302 mg/l Erhöhung im mittleren Abfluss im 2. Quartal, 9 Messjahre     | 1.826                              | 0,261                        | Nadler und Meißner, 2008      |
| Straße mit Ampelkreuzung, Hamburg, 28.000 DTV | 1382 mg/l mehr als im Mittel, 2 Stichproben                           | 7.400                              | 0,265                        | Dierkes, 2010                 |
| Autobahn Österreich, 60.000 DTV, 8 Fahrspuren | 200 bis 400 mg/l im Winter mehr als im Mittel, 1,5 Messjahre          | 1.280 bis 2.560                    | 0,021 bis 0,043              | Geiger-Kaiser und Jäger, 2005 |
| Laborprüfverfahren DIN EN 1338                | Vorgabe: Betonverlust maximal 1 kg/m <sup>2</sup> in 28 Frostperioden | 10.000 (1 Jahr)<br>2.000 (5 Jahre) | 0,04 bis 0,2                 | DIN EN 1338                   |

Winterbedingte Erhöhungen des AFS<sub>ges</sub>-Aufkommens liegen zwischen 1.300 und 7.400 kg/(ha·a), wobei die Werte mit hohen Belastungen vermutlich auf die Verkehrsart (Ampelkreuzung, Hamburg) zurückzuführen ist. Die DTV macht sich zwar auf das winterbedingte Aufkommen bemerkbar, bei der Umrechnung auf DTV-spezifisches Aufkommen variieren die Werte jedoch um mehr als das 20-fache. Vermutlich gibt es eine DTV-unabhängige Grundbelastung die mit dem Straßenzustand, der Streusalzung, dem Frostindex und der Anzahl der Frostwechsel zu tun hat. Diese wird verstärkt durch die DTV und das Fahrverhalten, wie aus den Ergebnissen der Studie aus Hamburg vermutet werden kann.

Vorgeschlagen wird eine Grundbelastung von 500, 1.000 bzw. 1.500 kg/(ha·a), abhängig von der Frostindexzone, anzunehmen. Zusätzlich sollte eine DTV-spezifische Belastung von 0,03 kg/(ha·a·DTV) angenommen werden. Hier empfiehlt es sich, das Fahrverhalten (Bremsvorgänge, ruhiges Fahren, vgl. Kap. 3.1.6.1) sowie die Anzahl der Fahrspuren miteinzubeziehen, da der zusätzliche Fahrbahnabtrag sich nicht von dem nicht durch Frost bedingtem unterscheiden dürfte.

Im Folgenden werden die getroffenen Annahmen mit Hilfe der in den Studien angegebenen Randbedingungen überprüft. Hamburg liegt in der Frostindexzone I, hier lag jedoch nur ein Einzelwert zur Beurteilung vor. Berlin liegt in der mittleren Frostzone, diese Autobahn ist mit 119.000 DTV sehr stark belastet, hat aber 6 Fahrspuren. Augsburg liegt zwischen Frostzone I und II und die österreichischen Autobahnen (8 Fahrspuren) in Frostzone III.

Nach diesen Vorgaben lassen sich folgende Belastungen berechnen:

|          |               |             |               |
|----------|---------------|-------------|---------------|
| Berlin:  | 1.095 kg/ha·a | Augsburg:   | 1.210 kg/ha·a |
| Hamburg: | 4.950 kg/ha·a | Österreich: | 1.725 kg/ha·a |

In Berlin wurde das Feststoffaufkommen vor einem Abfluss ermittelt, also vermutlich auch größere Feststoffe, die nicht in den Abfluss gelangen würden, was den Unterschied zu dem gemessenen Aufkommen erklären kann. Auch die anderen Werte weichen von den oben ermittelten etwas ab, die Größenordnungen stimmen aber überein. Da auch die tatsächlichen Messwerte um den Faktor 2 schwanken können (vgl. Autobahn Österreich), ist die Formel für den winterbedingten Fahrbahnabrieb ausreichend genau.

Die betroffene Jahreszeit wird mit 3 Monaten im Jahr angenommen ( $f_{\text{Winter}} = 0,25$ ), obwohl Frostperioden in der Summe keine drei Monate anhalten. Es wird jedoch dem Umstand Rechnung getragen, dass die Beschädigung der Fahrbahndecke und das Herauslösen von Feststoffen sich meistens erst nach Beendigung der Frostperiode im Straßenabfluss bemerkbar machen.

Im Jahresmittel ergeben sich somit im Durchschnitt etwa 0,0325 kg/(ha·a·DTV)<sup>9</sup>.

---

<sup>9</sup> Rechnung:  $(0,03 \text{ kg}/(\text{ha}\cdot\text{a}\cdot\text{DTV}) + 1.000 \text{ kg}/(\text{ha}\cdot\text{a})/10.000 \text{ DTV}) \cdot 0,25 = 0,0325 \text{ kg}/(\text{ha}\cdot\text{a}\cdot\text{DTV})$

Der PM63-Anteil im winterbedingten Fahrbahnabrieb kann nur abgeschätzt werden. Die Untersuchung von [Lambert, 2011] deutet darauf hin, dass der PM63-Anteil im Feststoffaufkommen an Autobahnen im Winter relativ hoch ist, er betrug in seiner Studie 50%. Hier sind aber auch weitere feine Feststoffanteile aus anderen Quellen enthalten. Daher wird der PM63-Anteil schließlich niedriger als in der Studie von [Lambert, 2011], aber höher als im normalen Fahrbahnabrieb (PM63 = 12,5%) angenommen und zwar mit 40% für Autobahnen und, da nicht alle Straßen mit Salz gestreut werden, mit 20% für sonstige Straßen und Parkplätze.

Winterbedingtes Feststoffaufkommen

Grundbelastung:

- 500 kg/(ha·a) für Frostindexzone I
- 1.000 kg/(ha·a) für Frostindexzone II
- 1.500 kg/(ha·a) für Frostindexzone III

DTV-spezifische Belastung:

0,03 kg/(ha·a·DTV)

Faktoren für Fahrverhalten und Anzahl Fahrspuren aus Kap. 3.2.1 berücksichtigen.

Anteil<sub>PM63,Winter</sub> für Flächen mit Streusalz (Autobahnen): 40%

Anteil<sub>PM63,Winter</sub> für Flächen ohne Streusalzeinsatz: 20%.

### 3.1.3 Abflüsse von unbefestigten Flächen

Sind unbefestigte Flächen im Einzugsgebiet vorhanden, so können Feststoffe aus dem **Boden in den Abfluss erodieren**, wenn Niederschlagshöhe und Niederschlagsdauer ausreichen, um einen Abfluss zu erzeugen. Hierzu gibt es sehr wenige Untersuchungen.

In einer Studie von [Bannermann et al., 1993] konnten an Rasenflächen in den USA nur 50% der Anzahl an Niederschlagsereignissen erfasst werden im Vergleich zu Niederschlagsereignissen von Straßen oder Dächern. In zwei Ereignissen, die zum Abfluss an sechs Grünflächen in Wohngebieten führten, wurden im Mittel ca. 400 mg/l AFS gefunden [Bannermann et al., 1993].

Als Anhaltswert für größere Einzugsgebiete können die Messungen an drei Autobahnen von [Klein, 1982] dienen. Hier wies das Autobahneinzugsgebiet mit der geringsten Verkehrsbelastung und wöchentlicher Straßenreinigung den höchsten AFS<sub>ges</sub>-Wert auf, vgl. Tabelle 4-3, da mehr als 60% der Fläche unbefestigt ist. Geschätzt über den Flächenanteil und übliche AFS-Konzentrationen in Straßenabflüssen von ca. 150 mg/l ergeben sich etwa 320 mg/l für den Anteil der Bodenerosion.

In einer Stichprobe eines Niederschlagsereignisses der heute bewaldeten ehemaligen Deponie „Grüner Heiner“ wurden 341 mg/l an AFS gemessen [SES, 2012].

Alle drei Werte liegen im gleichen Größenbereich. Der Anteil des PM63 ist unbekannt und wird auf 33% abgeschätzt.

Somit ergeben sich als Anhaltswert etwa 350 mg/l an AFS<sub>ges</sub> und 115 mg/l PM63 aus unbefestigten, aber bewachsenen Flächen, bzw. für mittlere hydrologische Verhältnisse 2.500 kg/(ha·a) AFS<sub>ges</sub> und 833 kg/(ha·a) PM63, wobei sicher der Bewuchs, das Gefälle sowie die Bodenart beide Werte beeinflussen.

Feststoffaufkommen aus Bodenerosion von bewachsenen Flächen

2.500 kg/(ha·a) AFS<sub>ges</sub>

Anteil<sub>PM63, Bodenerosion</sub>: variabel, Vorschlag 33%

### 3.1.4 Einträge aus landwirtschaftlicher Tätigkeit

Punktuell können **Einträge aus landwirtschaftlichen Tätigkeiten** den Feststoffgehalt in Niederschlagsabflüssen erheblich beeinflussen. Die im Versuchsfeld Derchinger Straße in Augsburg festgestellten starken Schwankungen werden z.B. neben dem winterbedingten Streusalzeinsatz der Verschmutzung durch landwirtschaftliche Nutzung im Umfeld zugeordnet [Nadler und Meißner, 2008]. Im Jahr 2010 wurden an der gleichen Örtlichkeit in einem anderen Messprogramm im zweiten Quartal 2009 2.559 mg/l und im zweiten Quartal 2010 536 mg/l jeweils im Mittel gemessen [Hauraton, 2012]. Dies stellt eine Vervielfachung des frachtgewogenen Mittelwerts aus neun Jahren Messtätigkeit in der Höhe von 98,4 mg/l dar. Die winterbedingte Erhöhung berücksichtigt (ca. 300 mg/l) ergeben sich somit punktuelle AFS-Belastungen durch die Landwirtschaft bis zu 2.000 mg/l, umgerechnet auf mittlere hydrologische Verhältnisse bis zu 14.400 kg/(ha·a).

Eine Untersuchung vom Yamuna River in Indien [Sharma et al., 2012] ergab 77,6 mg/l AFS im abflussgewichteten Mittel aus zehn Regenereignissen in zwei Jahren während der Monsunzeit aus landwirtschaftlichen Nutzflächen. Die meteorologischen Verhältnisse dort sind allerdings nicht mit den deutschen zu vergleichen. In den zehn Regenereignissen alleine fielen 340 mm Niederschlag, so dass von einer starken Verdünnung des Niederschlagabflusses ausgegangen werden muss.

Als erster Anhaltswert wird folgendes mögliches Feststoffaufkommen vorgeschlagen:

Feststoffaufkommen aus landwirtschaftlichen Tätigkeiten

bis über 10.000 kg/(ha·a) AFS<sub>ges</sub>

Anteil<sub>PM63, Landwirtschaft</sub>: variabel, Vorschlag 33%

### 3.1.5 Einträge durch Bautätigkeiten

Auch Baustellen tragen durch Bodenerosion und erhöhte Staubbildung zu vermehrten Feststoffen in Abflüssen bei.

Im Umfeld einer Baustelle in einer Entfernung bis 250 m wurde z.B. das 14-fache des sonst üblichen Feinstaubgehaltes in der Luft gemessen [Stadt Herne, 2009], wobei Feinstaub nicht zwangsläufig am Ort des Geschehens als Staubbiederschlag niedergeht, siehe auch Kap. 2.1.1.

Die Bodenerosion von kleinen Baustellen im Dane County, Wisconsin, USA, wurde von [Owens et al., 2000] gezielt untersucht. Die AFS<sub>ges</sub>-Konzentration betrug hier in der aktiven Bauphase in einer Baustelle in einem Gewerbegebiet 15.000 mg/l (n = 8) und in einem Wohngebiet 2.400 mg/l (n = 3), vgl. Bild 3-13 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, im Durchschnitt etwa das 10-fache der normal üblich gemessenen Abflusswerte.

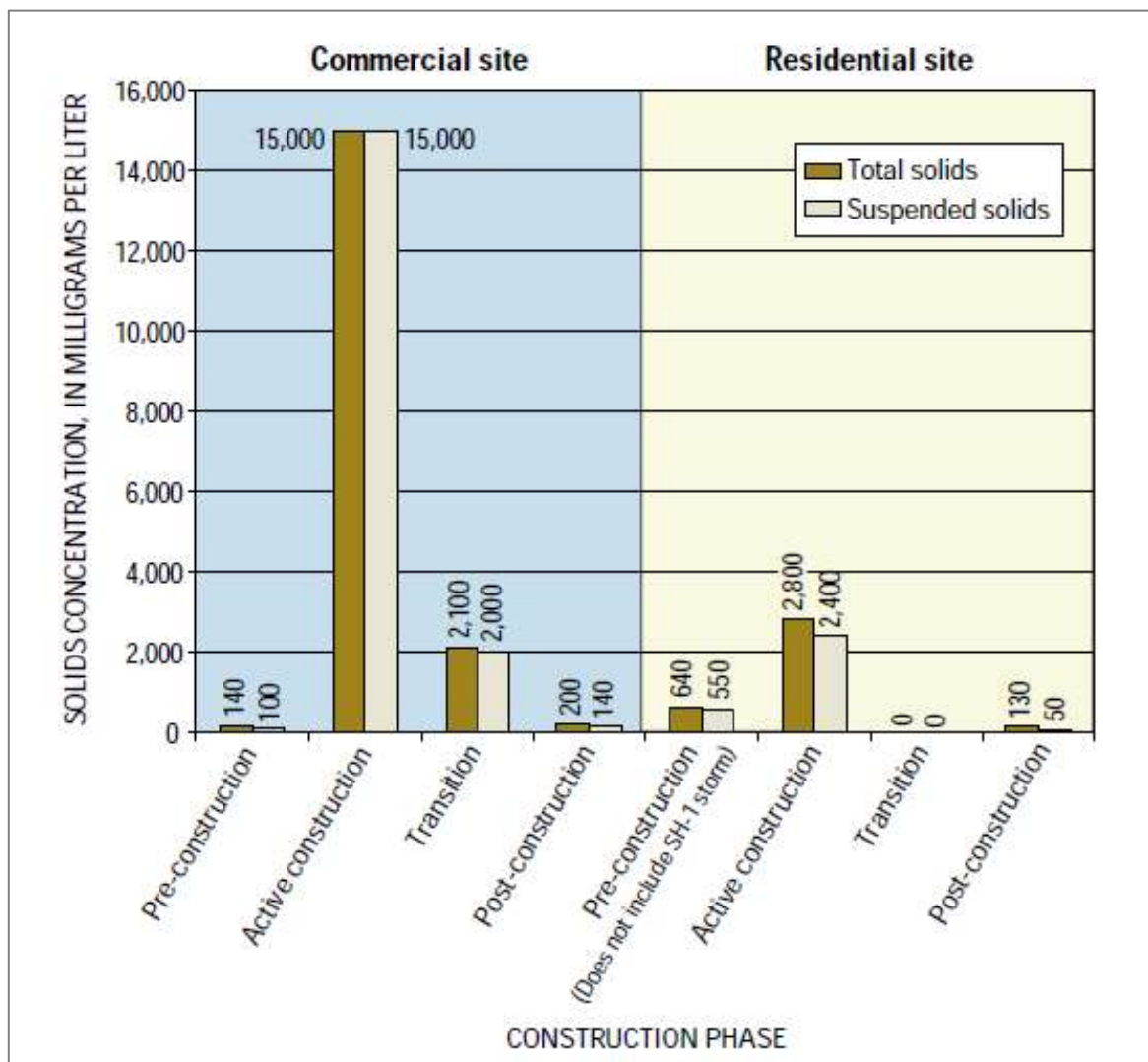


Bild 3-13: Abflussgewichtete Feststoffkonzentration in Baustellenabflüssen in Wisconsin in Abhängigkeit von der Bauphase; n = 3 bis 8 [Owens et al., 2000]  
 Total solids: Gesamtinhaltsstoffe; Suspended Solids: abfiltrierbare Stoffe

Zusätzlich können durch an LKW-Reifen haftende Verschmutzungen Straßenabflüsse stärker belastet werden, wobei hier normalerweise der Verursacher in der Pflicht ist, die Verschmutzungen zu beseitigen.

Der **PM63-Anteil ist unbekannt** und wie auch bei der Bodenerosion vermutlich sehr unterschiedlich.

Als erste Annahme wird folgendes Feststoffaufkommen vorgeschlagen:

*Feststoffaufkommen aus Bautätigkeiten*  
*bis über 10.000 kg/(ha·a) AFS<sub>ges</sub>*  
*Anteil<sub>PM63,Bau</sub>: variabel, Vorschlag 33%*

### 3.1.6 Abminderungs- und Erhöhungsfaktoren für das Feststoffaufkommen auf Verkehrsflächen

Die Schmutzakkumulation von Feststoffen wurde bereits eingehend beschrieben und quantifiziert. Ein Schmutzabtrag der Feststoffe kann durch Straßenreinigung, Windverfrachtung und Turbulenzen durch Verkehr in unterschiedlichem Maß erfolgen, vgl. dazu Bild 2-20, S. 27.

Dieses wird im Folgenden durch die Einführung von erhöhenden Faktoren ( $f > 1$ ) und abmindernden Faktoren ( $f < 1$ ) berücksichtigt, siehe Bild 3-14.

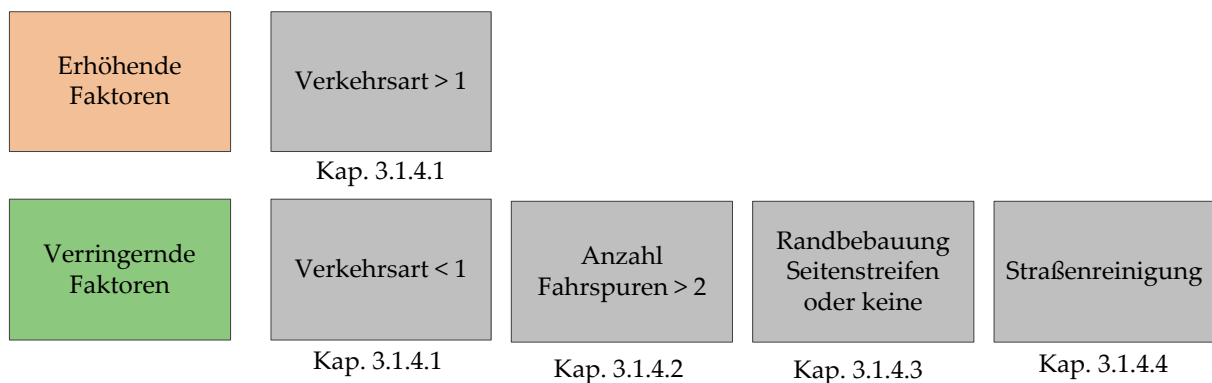


Bild 3-14: Erhöhende und abmindernde Faktoren zur Ermittlung von niederschlagsabflussrelevanten Feststoffen aus verkehrsbedingtem Abrieb

Bezogen auf die DTV muss das Feststoffaufkommen durch Abrieb auf die Fahrbahnbreite, ausgedrückt als Anzahl der Fahrspuren, bezogen werden. Dafür wird ebenfalls ein Faktor eingeführt.

Eine Erhöhung des Feststoffanfalls dagegen kann durch die vorliegende Verkehrsart verursacht werden. Auch hier werden Faktoren vorgeschlagen.



### 3.1.6.1 Verkehrsart

Wesentlich für den gesamten Abrieb ist neben der Verkehrsstärke die **Fahrweise**. Gestörter Verkehr (Stausituation) sowie Ampelkreuzungen mit einer Vielzahl von Brems- und Anfahrvorgängen sind ursächlich für eine Erhöhung des Staubbiederschlags [ASTRA, 2009] oder von Partikel gebundenen Schadstoffen in den Banketten von Straßen [Helmreich, 2012]. Die Erhöhung des Bremsabriebs kann etwa bis zu Faktor 10 liegen [ASTRA, 2009], der Zinkgehalt im Boden in Stop-and-Go- oder Ampelkreuzungssituationen wurde im Bereich um den Faktor 5 höher als bei ungestörtem Verkehr festgestellt [Helmreich, 2012], siehe auch Bild 2-11.

Andererseits wird das Feststoffaufkommen bei sehr ruhigem und flüssigem Verkehr, wie es auf Autobahnen und Schnellstraßen oder auf Straßen mit einer geringen Fahrgeschwindigkeit meistens der Fall ist, geringer als auf sonstigen Straßen sein. Hier wird ein Faktor von 0,5 vorgeschlagen.

Das Feststoffaufkommen bei Parkplätzen muss etwas anders als bei Straßen berechnet werden. Die Parkplatzfrequenz wird analog zu Straßen in DTV ausgedrückt. Während bei Straßen jeder Meter durch die als DTV ausgedrückte Fahrzeuganzahl belastet wird, sind es bei Parkplätzen die Fahrspur, bei größeren Parkplätzen nur die Hauptfahrspur, sowie je Fahrzeug ein Stellplatz inklusive Rangiervorgängen. Vorgeschlagen wird, einen Parkplatz in Felder aufzuteilen, die etwa dem Anschluss an einen Straßeneinlauf entsprechen, und zwar etwa 500 m<sup>2</sup>, in denen 10 PKW-Stellflächen bzw. 2,5 LKW-Stellflächen jeweils inklusive Fahrspuren untergebracht sind. Dem möglichen Rangieren der Fahrzeuge und Brems- und Anfahrvorgängen wird analog zu Straßen mit einem erhöhten Faktor für das Fahrverhalten Rechnung getragen. Damit ergibt sich der Gesamtfaktor zu:

$$f_{\text{Verkehr}} = (f_{\text{Rangieren}} + (n - 1) \cdot f_{\text{Durchfahren}}) / n$$

Vorgeschlagen wird der Faktor 10 für das Rangieren. Dem Durchfahren eines Fahrzeugs dagegen wird der Faktor 1 für normale Verkehrsart zugeordnet.

Der Faktor vereinfacht sich auf:

$$f_{\text{Verkehr}} = (10 + (n-1) \cdot 1) / n = (9 + n) / n$$

Bei einem kleinen Parkplatz, bei dem alle Fahrzeuge einen Stellplatz haben, ergibt sich somit der Faktor für die Verkehrsart 10. Stehen mehr Felder zur Verfügung, verringert sich der Faktor entsprechend.

Zusammengefasst werden folgende **Faktoren für die Verkehrsart** vorgeschlagen:

*Faktor für die Verkehrsart:*

*$f_{\text{Verkehr}} =$  bis zu 5 für Ampelkreuzungen und Stop-and-go-Situationen*

*$f_{\text{Verkehr}} =$  kleiner 1 bei sehr ruhigem Verkehr*

*$f_{\text{Verkehr}} =$  0,5 bei Autobahnen*

*$f_{\text{Verkehr}} = (9 + n) / n$  bei Parkplätzen,  $n$  sind Einheiten à 10 PKW-Stellplätzen*

*oder 2,5 LKW-Parkplätzen jeweils inklusive Fahrspuren, bzw. ca. 500 m<sup>2</sup>*



### 3.1.6.2 Abminderungsfaktor Fahrspuranzahl

Das in Kapitel 3.1.2.1 ermittelte Abriebsaufkommen bezieht sich auf die DTV und einen Quadratmeter Fläche und wurde jeweils auf eine zweispurige Straße bezogen. Seitenstreifen wurden bereits mit einem Abminderungsfaktor berücksichtigt. Das Abriebsaufkommen gilt somit für zweispurige Straßen mit oder ohne Seitenstreifen. Schnellstraßen und Autobahnen bestehen jedoch aus vier oder mehr Spuren und der auf ein Fahrzeug bezogene Abrieb wird durch die größere Niederschlagsmenge verdünnt. Dies zeigt sich in geringerem Feststoffgehalt in Autobahnabflüssen im Vergleich zu Straßenabflüssen (vgl. Kap. 4.2.1) und im geringeren Schadstoffgehalt in den Banketten von Straßen mit einer sehr hohen DTV, die vermutlich über mehr Spuren verfügen, vgl. Bild 2-22. Die **Anzahl der Fahrspuren  $n$**  sollte daher mit einem Faktor berücksichtigt werden, um der Verteilung der Abriebsprodukte auf eine größere Fläche gerecht zu werden. Vorgeschlagen werden  $\frac{1}{2}$  für vierspurige Straßen,  $\frac{1}{3}$  für 6-spurige Straßen,  $\frac{1}{4}$  für 8-spurige Straßen etc. Als Formel für den Faktor ergibt sich  $f = 1/(n/2)$ . Auch das Aufkommen von winterbedingten verkehrsbezogenen Abriebsprodukten erfährt bei größerer Straßenbreite eine größere Verteilung. Da Autobahnen und Schnellstraßen aber wesentlich intensiver gestreut werden, wird hier auf einen Abminderungsfaktor verzichtet.

Die im Vergleich zu reinen Fahrspuren bei Straßen größere Fläche von Parkplätzen durch die zu den Fahrspuren zusätzlichen Stellflächen wird ebenfalls mit einem Faktor ( $f_{sp}$ ) berücksichtigt, entsprechend mehrerer Fahrspuren bei Straßen. Die Flächenverteilung bei z.B. Verbrauchermärkten zwischen Stellflächen und Fahrbahn liegt etwa bei 60% Stellflächen und 40% Fahrflächen. Je nach Parkkomfort verschiebt sich diese Verteilung. In Parkgaragen wird von 27 bis 35 m<sup>2</sup> Flächenbedarf pro Fahrzeug ausgegangen [FES, 1995]. Bei einer angenommenen Fläche von 2,60 m x 5 m = 13 m<sup>2</sup> je Stellplatz bedeuten dies etwa 40 bis 50% Stellfläche an der Gesamtfläche. Bei Autobahnraststätten beträgt das Verhältnis etwa 50% Stell- und 50% Fahrflächen. Der Faktor  $f_{sp}$  wird daher als Mittelwert mit 0,5 vorgeschlagen.

*Abminderungsfaktor für Anzahl der Fahrspuren =  $1/(n/2)$*

*$f_{sp} = 0,5$  für 4 Spuren*

*$f_{sp} = 0,33$  für 6 Spuren, etc.*

*Abminderungsfaktor bei Parkplätzen*

*$f_{sp} = 0,5$*

### 3.1.6.3 Abminderungsfaktor Randbebauung

Durch **Windverfrachtung und Turbulenzen** werden insbesondere die Feianteile des Straßenstaubs verweht, so dass sich das Feststoff- und insbesondere PM63-Aufkommen auf Verkehrsflächen verringert. Eine Reduzierung ist dabei umso geringer, je höher die Randbebauung ist. Auch Bordsteine halten schon einen geringen Anteil an Straßenstaub zurück. Sind befestigte Seitenstreifen vorhanden, so werden Feststoffe teilweise dorthin verweht und würden für den Niederschlagsabfluss zur Verfügung stehen.

Auf Autobahnen wird der Effekt der Verluste in die Umgebung aufgrund der hohen Geschwindigkeiten noch verstärkt. [Hürlimann et al., 2011] gehen von 70 bis 80% Verlusten an Emissionen aus dem Straßenverkehr durch Verwehungen und Spritzwasser bei Außerortsstraßen mit nur schmalen Randstreifen und bis 90% bei Autobahnen aus.

Vermutlich ist der Anteil an feinen Feststoffen bei diesen Verlusten, insbesondere bei Verwehungen, höher als an groben Feststoffen. Ausgehend von einem PM63-Anteil von 30% im Straßenstaub wird abgeschätzt, dass bei insgesamt 25% verwehten Feststoffen die Hälfte der vorhandenen PM63 verweht wird. Bei einer Verwehung von 50% aller Feststoffe wird angenommen, dass an PM63 noch 5% des ursprünglichen AFS-Gesamtaufkommens auf der Verkehrsfläche vorhanden ist, vgl. Bild 3-15.

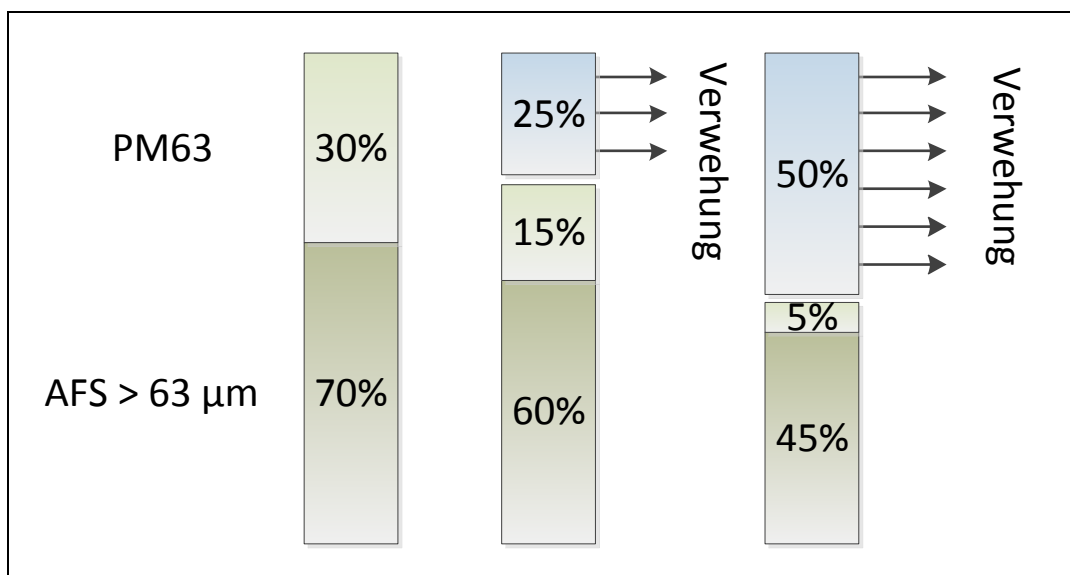


Bild 3-15: Verringerung von Feststoffen auf Straßenoberflächen durch Verwehungen

Bei Autobahnen wird aufgrund der hohen Fahrgeschwindigkeit von möglichen noch größeren Verlusten ausgegangen.

Bei Parkplätzen wird der Faktor für Seitenstreifen bzw. Randbebauung auf 0,9 für AFS<sub>ges</sub> und 0,75 für PM63 festgelegt, da davon ausgegangen wird, dass Verwehungen und Verspritzungen weitgehend auf der Fläche des Parkplatzes bleiben.

Vorgeschlagen werden folgende Abminderungsfaktoren:

*Faktor für die Randbebauung für AFS<sub>ges</sub>:*

$f_{RB} = 1$  bei Lärmschutzwänden/Wänden

$f_{RB} = 0,9$  bei Parkplätzen

$f_{RB} = 0,75$  bei Randsteinen und Seitenstreifen

$f_{RB} = 0,5$  ohne Befestigung

$f_{RB} = 0,4$  bei Autobahnen

*Faktor für die Randbebauung für PM63:*

$f_{RB} = 0,9$  bei Lärmschutzwänden/Wänden

$f_{RB} = 0,75$  bei Parkplätzen

$f_{RB} = 0,5$  bei Randsteinen und Seitenstreifen

$f_{RB} = 0,17$  ohne Befestigung und bei Autobahnen

#### 3.1.6.4 Abminderungsfaktor Straßenreinigung

Auch durch **Straßenreinigungen** werden Feststoffe, insbesondere die groben Anteile, tatsächlich entfernt, vgl. Kap. 2.3.2. Je nach Art der Straßenreinigung werden feine Fraktionen < 63 µm zu 20 bis 75 % entfernt, vgl. Tabelle 2-4. Dies setzt allerdings eine regelmäßige Straßenreinigung voraus. In einigen Studien wurde keine Verminderung des Feststoffgehaltes in Oberflächenabflüsse durch die Straßenreinigung [Tiefenthaler et al., 2001] oder sogar erst die Verfügbarmachung des Feinanteils [Vaze und Chiew, 2002] festgestellt. [Lambert, 2010] fand im Kehrgut der monatlichen Kehrung eines Gewerbehofs in Augsburg 35% der Gesamtfeststoffe, aber nur 6% des PM63 der Deposition auf der Fläche.

Daher wird im Folgenden nur von einer kleinen Verringerung des PM63 ausgegangen. Da grobe Feststoffe durch Straßenkehrungen effektiver entfernt werden können, wird hier von einer größeren Abminderung ausgegangen. **Für tägliche Straßenreinigungen** wird ein **Abminderungsfaktor** von **0,8 für PM63** und **0,6 für AFS<sub>ges</sub>** vorgeschlagen, für **wöchentliche Reinigungen** **0,9 für PM63** und **0,75 für AFS<sub>ges</sub>**. Zu beachten in einem größeren Einzugsgebiet sind zusätzlich noch die Flächenanteile, auf denen Straßenkehrungen stattfinden.

*Faktor für die Straßenreinigung:*

*AFS<sub>ges</sub>*

$f_{SR} = 0,6$  für tägliche Straßenreinigung

$f_{SR} = 0,8$  für wöchentliche Straßenreinigung

*PM63*

$f_{SR} = 0,8$  für tägliche Straßenreinigung

$f_{SR} = 0,9$  für wöchentliche Straßenreinigung

### 3.1.6.5 Gegenseitige Beeinflussung der Faktoren

Die Faktoren sind nicht immer unabhängig voneinander. Bei zunehmender Breite der Straße und Erhöhung der Anzahl der Fahrspuren z.B. werden insbesondere weniger grobe Feststoffe verweht, der Faktor für die Randbebauung würde sich verändern. Werden dagegen Feststoffe verweht, stehen sie nicht für eine Straßenreinigung oder die Retention im Kanalnetz Verfügung zur. Der Faktor für die Straßenreinigung müsste damit abhängig vom Faktor für die Randbebauung einen weiteren Faktor zur Abminderung erhalten. Darauf wird hier verzichtet. Im Einzelfall empfiehlt es sich, die Faktoren entsprechend anzupassen oder bei der Interpretation von Ergebnissen diese Zusammenhänge zu berücksichtigen.

### 3.1.7 Feststoffaufkommen auf Dachflächen

Das AFS- und PM<sub>63</sub>-Aufkommen aus dem **Staubniederschlag inklusive Pollen** wird als Grundbelastung in gleicher Höhe wie dasjenige auf Verkehrsflächen angesetzt.

Hier wird jedoch bei hoher Lage der Dächer ein **reduzierender Faktor**  $f_H$  eingeführt, da angenommen wird, dass die Staubbelastung geringer ist als bei z.B. einstöckigen Häusern (vgl. Kap. 4.2.2: München, Akademie, 26 m hoch, Paris-Marais, Firsthöhe bis 35 m). Auch [Lamprea und Ruban, 2008] fanden mehr Feststoffe durch Staubbelastung in einem bulk-Sammler (in etwa 1,5 m Höhe) als in im gleichen Gebiet gemessenen Dachabflüssen (Faktor 1,2 bis > 3). Vorgeschlagen wird ausgehend von einem Faktor von 1,0 ein Abzug von 0,25 je 10 m, beginnend bei einer **Dachhöhe** von 10 m. Damit ergibt sich folgende Staffelung:  $f_H = 0,75$  bis 20m,  $f_H = 0,5$  bis 30 m, etc.

*Faktor zur Abminderung der Staubbelastung in Abhängigkeit von der Dachhöhe*

$f_H = 1$  bis 10 m,

$f_H = 0,75$  von 10 bis 20 m

$f_H = 0,5$  von 20 bis 30 m etc.

Dachflächenabflüsse können zusätzlich durch **Feststoffe aus dem Dachabrieb** belastet werden. In Bild 3-16 sind die Abflüsse zweier Regenereignisse verschiedener Modelldächer am selben Standort in Bayreuth dargestellt [Förster, 1990]. Der größte Unterschied zwischen den Materialien betrug bei Ereignis 1 30 mg/l und bei Ereignis 2 12 mg/l. (Das Kiesdach wird nicht betrachtet, da hier ein Stoffrückhalt stattfindet.)

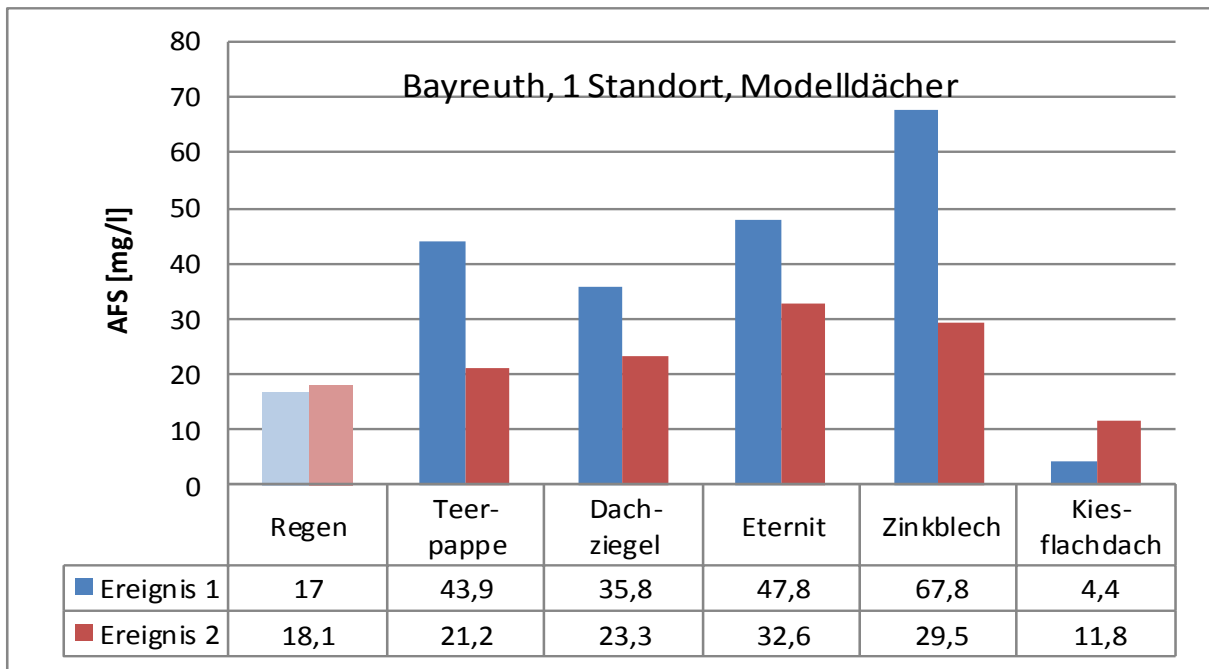


Bild 3-16: AFS in Abflüssen von Dächern mit unterschiedlichen Materialien (Bayreuth) [Förster, 1990]

Der Unterschied in den Abflüssen von zwei Dächern mit unterschiedlichen Materialien (galvanisiertes Eisen, Betonziegel) im selben Einzugsgebiet in Australien betrug etwa 50 mg/l [Thomas und Greene, 1993]. Auch [Zobrist et al., 2000] ermittelten einen ähnlichen Unterschied (46 mg/l) an zwei Dächern in einem Vorort in Zürich, der Feststoffgehalt aus einem Ziegeldachabfluss betrug 64 mg/l, aus einem polyesterbeschichtetem Dachabfluss 18 mg/l, siehe auch Kap. 4.2.2. Der Feststoffmaximalwert eines Bitumendachabflusses in Nantes betrug 38 mg/l im Vergleich zu Abflüssen eines Ziegeldachs (10 mg/l), eines Zinkblechdachs (23 mg/l) und eines Schieferdachs (20 mg/l) [Lamprea und Ruban, 2008]. Der Unterschied betrug somit zwischen 10 und ca. 30 mg/l. Der Dachabrieb scheint nicht nur materialabhängig zu sein sondern auch abhängig vom Dachalter, von der Wetterseite oder von weiteren Faktoren. Eine Quantifizierung in Abhängigkeit vom Material kann somit nicht durchgeführt werden.

Für weitere Berechnungen wird als plausible Größenordnung 20 mg/l bzw. unter der Annahme normaler hydrologischer Bedingungen ( $N = 800 \text{ mm}$ ,  $\psi = 0,9$ ) 144 kg/(ha·a) als normaler Dachabrieb, 10 mg/l bzw. 72 kg/(ha·a) als geringer Dachabrieb und 40 mg/l bzw. 288 kg/(ha·a) als hoher Dachabrieb mit einem Feinanteil von je 50% angenommen. Nicht alle Dächer liefern Feststoffbeiträge aus dem Dachabrieb. In erster Näherung wird angenommen, dass in einem größeren Einzugsgebiet 80% aller Dächer betroffen sind. Insgesamt wären weitere Kenntnisse über den Abrieb abhängig von den eingesetzten Materialien und dem Anteil der jeweiligen Dachmaterialien erforderlich. Die Werte stellen erste Annahmen dar und sollten noch weiter abgesichert werden.

Dachabrieb  $AFS_{ges}$ :

72 kg/(ha·a) geringer Abrieb (z.B. Kupfer, polyesterbeschichtete Materialien)

144 kg/(ha·a) normaler Abrieb (z.B. Dachziegel)

288 kg/(ha·a) hoher Abrieb (z.B. Teerpappe, Betondachsteine)

Anteil $_{PM63,Dachabrieb}$ : 50%

## 3.2 Berechnung der Gesamtfeststoff- und PM63-Deposition

In den folgenden Kapiteln werden die Erkenntnisse aus dem vorangegangenen Kapitel zu jeweils einer Formel für das Feststoffaufkommen auf Verkehrsflächen und auf Dächern zusammengefasst.

### 3.2.1 Verkehrsflächen

Die Berechnung des Gesamtfeststoffaufkommens ( $AFS_{ges}$ ) auf befestigten Verkehrsflächen, das für einen Niederschlagabfluss zur Verfügung steht, ergibt sich nach Formel 3.1. Sehr grobe Anteile wie z.B. Fahrbahnabrieb mit einer Korngröße von > 1.000  $\mu\text{m}$ , die nicht mittransportiert werden, sind hier nicht enthalten. Die Formel gilt für kleine Einzugsgebiete ohne Anteile einer möglichen Retention im Straßeneinlauf oder Kanalnetz, siehe hierzu Kapitel 3.3.4.

$$\begin{aligned} \text{Feststoffdeposition } AFS_{ges} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{ha} \cdot \text{a}} \right] = & \quad (3.1) \\ & \left( \left( SN \left[ \frac{\text{kg}}{\text{ha} \cdot \text{a}} \right] + SN_{\text{Pollen}} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{ha} \cdot \text{a}} \right] * f_{\text{JF}} * f_{\text{veg}} \right) \right. \\ & + \left( AFS_{\text{PKW}} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{DTV} * \text{ha} * \text{a}} \right] * \text{DTV}_{\text{PKW}} + AFS_{\text{LKW}} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{DTV} * \text{ha} * \text{a}} \right] * \text{DTV}_{\text{LKW}} \right. \\ & + \left. AFS_{\text{Winter}} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{DTV} * \text{ha} * \text{a}} \right] * \text{DTV} * f_{\text{JWinter}} \right) * f_{\text{Verkehr}} * f_{\text{Sp}} \\ & + \left. GB_{\text{Winter}} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{ha} * \text{a}} \right] * f_{\text{JWinter}} + AFS_{\text{Erosion,Bau,LW}} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{ha} * \text{a}} \right] * \text{Fläche} * f_{\text{Zeit}} \right) * f_{\text{RB}} \\ & * f_{\text{SR}} \end{aligned}$$

Darin sind:

- SN: Feststoffe aus Staubbiederschlag ohne Pollen  
38 kg/(ha·a) für ländliche Gebiete  
71 kg/(ha·a) für städtische Gebiete  
343 kg/(ha·a) für Emissionsstandorte

- SN<sub>Pollen</sub>: Feststoffe aus Pollen  
400 kg/(ha·a); im Extremfall bis zu 750 kg/(ha·a)
- f<sub>J</sub>: Jahreszeitfaktor (Frühling): 4/12 Monaten  $f_J = 1/3$   
bei Bestimmung während der Vegetationszeit  $f_J = 1$
- f<sub>Veg</sub>: Vegetationsfaktor: 0 bis 1; Vorschlag 1/3
- AFS<sub>PKW</sub>: Abriebsprodukte durch Verkehr (PKW): 0,1 kg/(ha·a·DTV)
- AFS<sub>LKW</sub>: Abriebsprodukte durch Verkehr (LKW): 0,5 kg/(ha·a·DTV)
- DTV<sub>PKW</sub>: durchschnittlich tägliche Verkehrsbelastung durch PKW
- DTV<sub>LKW</sub>: durchschnittlich tägliche Verkehrsbelastung durch LKW
- GB<sub>Winter</sub>: Grundbelastung aus Fahrbahnzerstörung im Winter durch Frost und evtl. Streusalzeinsatz:  
500 kg/(ha·a) für Frostindexzone I  
1.000 kg/(ha·a) für Frostindexzone II  
1.500 kg/(ha·a) für Frostindexzone III
- AFS<sub>Winter</sub>: DTV-spezifischer Fahrbahnabrieb im Winter: 0,03 kg/(ha·a·DTV)
- DTV: durchschnittlich tägliche Verkehrsbelastung
- f<sub>JW</sub>: Jahreszeitfaktor: je nach Frostperioden  
Vorschlag 3 Monate im Jahr: 0,25
- f<sub>Verkehr</sub>: Faktor für die Verkehrsart  
Autobahnen: 0,5  
normal: 1, bei ruhigem Verkehr oder geringen Geschwindigkeiten auch kleiner 1  
Ampelkreuzung oder Stop-and-Go-Verkehr: bis zu 5,  
Parkplätze:  $(9 + n)/n$ ; n: Einheiten à 10 PKW-Stellplätzen oder 2,5 LKW-Stellplätzen jeweils inklusive Fahrspuren bzw. ca. 500 m<sup>2</sup>
- f<sub>Sp</sub>: Faktor für Anzahl der Fahrspuren =  $1/(n/2)$   
4 Spuren: 0,5  
6 Spuren: 0,33 etc.  
bei Parkplätzen: 0,5
- AFS<sub>Erosion,Bau,LW</sub>: Feststoffaufkommen aus Bodenerosion, Bautätigkeiten oder Landwirtschaft  
Bodenerosion: 2.500 kg/(ha·a) AFS<sub>ges</sub>  
Bautätigkeiten, Landwirtschaft: bis über 10.000 kg/(ha·a) AFS<sub>ges</sub>
- Fläche: Flächenanteil, auf denen Bodenerosion, Bautätigkeiten oder Landwirtschaft stattfindet [%/100% von der Gesamtfläche]
- f<sub>Zeit</sub>: Zeitfaktor, in der besondere Belastungen aus Erosion, Bautätigkeiten oder Landwirtschaft auftreten



|                   |                                     |      |
|-------------------|-------------------------------------|------|
| f <sub>RB</sub> : | Faktor für Randbebauung:            |      |
|                   | keine und ohne Seitenstreifen:      | 0,5  |
|                   | niedrige Randsteine/Seitenstreifen: | 0,75 |
|                   | Parkplätze :                        | 0,9  |
|                   | Wände/Lärmschutzwände:              | 1,0  |
| f <sub>SR</sub> : | Faktor für Straßenreinigung:        |      |
|                   | 0,6 bei täglicher Reinigung,        |      |
|                   | 0,8 bei wöchentlicher Reinigung     |      |

Als Zahlenbeispiel dient die in Kap. 5.1 dargestellte Referenzverkehrsfläche, eine städtische Straße mit 5.000 DTV, davon 10% LKW-Verkehr, unter mittleren Bedingungen, in Frostindexzone 2, keine Einträge über Bodenerosion oder Landwirtschaft und bei wöchentlicher Straßenkehrung.

$$\begin{aligned}
 \text{Feststoffdeposition AFS}_{\text{ges}} \text{ Straße } \left[ \frac{\text{kg}}{\text{ha} \cdot \text{a}} \right] &= \\
 & \left( \left( 71 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{ha} \cdot \text{a}} \right] + 400 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{ha} \cdot \text{a}} \right] * 0,33 * 0,33 \right) \right. \\
 & + \left( 0,1 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{DTV} \cdot \text{ha} \cdot \text{a}} \right] * 4.500 \text{ DTV} + 0,5 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{DTV} \cdot \text{ha} \cdot \text{a}} \right] * 500 \text{ DTV} \right. \\
 & \left. \left. + 0,03 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{DTV} \cdot \text{ha} \cdot \text{a}} \right] * 5.000 \text{ D} * 0,25 \right) * 1 * 1 + 1.000 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{ha} \cdot \text{a}} \right] * 0,25 + 0 \right) \\
 & * 0,75 * 0,75 \\
 & = \text{rd. } 620 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{ha} \cdot \text{a}} \right]
 \end{aligned}$$

Es lassen sich rd. 620 kg/(ha·a) mittleres Feststoffaufkommen berechnen.

Die **Berechnung des PM63-Aufkommens** auf befestigten Verkehrsflächen ergibt sich analog zu Formel 3.1. Hier sind je nach Aufkommensart Faktoren für den Anteil an PM63 zu berücksichtigen. Diese sind in Tabelle 3-10 zusammengestellt.

Tabelle 3-10: PM63-Anteil an der Deposition auf Verkehrsflächen

|  | PM63-Anteil<br>[%] |
|--|--------------------|
| Staubniederschlag  | 80                 |
| Staubniederschlag durch Pollen                           | 80                 |
| Verkehrsbedingter Abrieb                                 | 30                 |
| Zusätzlicher verkehrsbedingter Abrieb im Winter          | 20                 |
| Winterbedingter Fahrbahnabrieb, Flächen mit Salzstreuung | 40                 |
| Bodenerosion   | variabel, z.B. 33  |
| Einträge durch Bautätigkeiten                            | variabel, z.B. 33  |
| Einträge durch die Landwirtschaft                        | variabel, z.B. 33  |

Für das Berechnen des PM63-Aufkommens sind darüber hinaus andere Faktoren für die Randbebauung und die Straßenreinigung zu verwenden:

|                   |                                     |      |
|-------------------|-------------------------------------|------|
| f <sub>RB</sub> : | Faktor für Randbebauung:            |      |
|                   | keine und ohne Seitenstreifen:      | 0,17 |
|                   | niedrige Randsteine/Seitenstreifen: | 0,5  |
|                   | Parkplätze:                         | 0,75 |
|                   | Wände/Lärmschutzwände:              | 0,9  |
| f <sub>SR</sub> : | Faktor für Straßenreinigung:        |      |
|                   | bei täglicher Reinigung:            | 0,8  |
|                   | bei wöchentlicher Reinigung:        | 0,9  |

### 3.2.2 Dachflächen

Die Gesamtformel für die Berechnung des Feststoffaufkommens in Dachabflüssen ergibt sich nach Formel 3.2:

$$\text{Feststoffdeposition AFS}_{\text{ges}} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{ha}\cdot\text{a}} \right] = \left( \text{SN} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{ha}\cdot\text{a}} \right] + \text{SN}_{\text{Pollen}} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{ha}\cdot\text{a}} \right] * f_{\text{JF}} * f_{\text{Veg}} \right) * f_{\text{H}} + \text{AFS}_{\text{Dachabrieb}} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{ha}\cdot\text{a}} \right] * f_{\text{D}} \quad (3.2)$$

Darin sind:

- SN: Feststoffe aus Staubniederschlag ohne Pollen  
38 kg/(ha·a) für ländliche Gebiete  
71 kg/(ha·a) für städtische Gebiete  
343 kg/(ha·a) für Emissionsstandorte
- SN<sub>Pollen</sub>: Feststoffe aus Pollen  
400 kg/(ha·a); im Extremfall bis zu 750 kg/(ha·a)
- f<sub>JF</sub>: Jahreszeitfaktor (Frühling): 4/12 Monaten f<sub>J</sub> = 1/3  
bei Bestimmung während der Vegetationszeit f<sub>J</sub> = 1
- f<sub>Veg</sub>: Vegetationsfaktor: 0 bis 1; Vorschlag 1/3
- f<sub>H</sub>: Faktor für Dachhöhe  
= 1 für Dächer 10 m hoch  
= 0,75 für Dächer 20 m hoch  
= 0,5 für Dächer 30 m hoch  
= 0,25 für Dächer 40 m hoch  
= 0 für Dächer ab 50 m hoch
- AFS<sub>Dachabrieb</sub>: 72 kg/(ha·a) geringer Abrieb  
144 kg/(ha·a) normaler Abrieb  
288 kg/(ha·a) hoher Abrieb
- f<sub>D</sub>: Anteil der Dächer mit Dachabrieb; Vorschlag: 0,8

Die Berechnung des PM<sub>63</sub>-Aufkommens auf Dachflächen ergibt sich analog zu Formel 3.2. Hier sind je nach Aufkommensart Faktoren für den Anteil an PM<sub>63</sub> zu berücksichtigen. Diese sind:

Anteil<sub>PM63</sub>: Anteil Feststoffe < 63 µm im Staubniederschlag und Pollen: 80%  
→ 0,8

Anteil<sub>PM63,Dachabrieb</sub>: Anteil Feststoffe < 63 µm im Dachabrieb 50% → 0,5

Als Zahlenbeispiel für die Berechnung des PM63 wird auf das in Kap. 4.2.2 beschriebene Referenzdach verwiesen, das im städtischen Bereich liegt und mittleren Bedingungen ausgesetzt ist.

$$\begin{aligned} \text{Feststoffdeposition PM63 Dachflächen} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{ha} \cdot \text{a}} \right] &= \\ \left( 71 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{ha} \cdot \text{a}} \right] + 400 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{ha} \cdot \text{a}} \right] * 0,33 * 0,33 \right) * 1 * 0,7 + 144 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{ha} \cdot \text{a}} \right] * 0,8 * 0,5 \\ &= \text{rd. } 150 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{ha} \cdot \text{a}} \right] \end{aligned}$$

Es ergeben sich rd. 150 kg/(ha·a) PM63 für die Referenzdachfläche.

### 3.2.3 Trenngebiete mit unterschiedlichen Flächentypen

In größeren Trenngebieten werden die oben beschriebenen Gebiete zusammengefasst und meist nach einer Behandlung in ein Gewässer eingeleitet.

Für die Abschätzung der jährlichen flächenspezifischen Feststofffracht in [kg/(ha·a)] des gesamten Gebietes sind durchlässige Flächenanteile befestigter Flächen zu berücksichtigen (Versickerungsanteil des Abflussbeiwertes). Asphaltierte oder betonierte Verkehrsflächen und Dächer werden im weiteren Verlauf der Arbeit als vollständig undurchlässig angenommen. Befestigte Freiflächen oder Parkflächen sind jedoch oft teildurchlässig. Hier wird pauschal in Anlehnung an Tabelle 2-3 ein durchlässiger Anteil von 25% angenommen, sofern keine weiteren Erläuterungen erfolgen.

Die Berechnung des Feststoffaufkommens ergibt sich mit Hilfe der Formeln 3.1 und 3.2 getrennt für das Feststoffaufkommen in Straßen, sonstigen befestigten Flächen sowie Dachflächen und unter Berücksichtigung der jeweiligen undurchlässigen Flächenanteile folgendermaßen:

$$\begin{aligned} \text{AFS bzw. PM63}_{\text{ges}} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{ha} \cdot \text{a}} \right] &= \tag{3.3} \\ & \text{AFS (PM63)}_{\text{Dach}} * \text{Dachanteil} \\ & + \text{AFS (PM63)}_{\text{Straße}} * \text{Straßenanteil} \\ & + \text{AFS (PM63)}_{\text{Freifläche}} * \text{befestigte Freiflächenanteil} * 0,75 \text{ (oder anderer Faktor)} \\ & + \text{AFS (PM63)}_{\text{Sonstiges}} * \text{Flächenanteil}_{\text{Sonstiges}} \end{aligned}$$

Anteile aus der Bodenerosion, die über befestigte Flächen in den Straßeneinlauf gelangen können, sind hier bereits erfasst. Unbefestigte Flächen, deren Abfluss direkt in den Straßeneinlauf gelangen kann, müssen gesondert ermittelt werden, allerdings ohne die Faktoren für Randbebauung, Fahrspuren, Straßenreinigung etc.

### 3.3 Berechnung der Feststoffkonzentration im Niederschlagsabfluss

In diesem Kapitel werden die Formeln 3.1 bis 3.3 erweitert, so dass Feststoffkonzentrationen in Verkehrsflächen-, Dach- und Trenngebietsabflüssen berechnet werden können.

#### 3.3.1 Benetzungs-, Mulden- und Verdunstungsverlust

In Kap. 2.3.1 sind bereits Grundlagen zur Abflussbildung beschrieben worden. Die dort dargestellten Abflussbeiwerte (z.B. für asphaltierte Straßen und Dächer  $\psi = 1$ , für Parkplätze  $\psi = 0,75$ ) dienen der Bemessung von Anlagenteilen der Regenbehandlung und sind daher relativ hoch.

Für die Abschätzung einer Feststoffkonzentration im Niederschlagsabfluss in [mg/l] sind jedoch Benetzungs-, Mulden- und Verdunstungsverluste maßgeblich, die rechnerisch zu einer höheren Feststoffkonzentration führen.

Im Folgenden werden einige Daten und Angaben dargestellt, aus denen sich ein realistischer Teilabflussbeiwert für Benetzungs-, Mulden- und Verdunstungsverluste abschätzen lässt.

Für intensiven Regen mit einer Dauer von 1 bis 2 Stunden (die weniger häufig als einmal pro Jahr auftreten) berechnete [Illgen, 2000] anhand von Niederschlag-Abfluss-Simulationen mittlere Abflussbeiwerte für befestigten Flächen ohne Versickerungsanteil zwischen 0,78 und 0,93, also Verluste in der Höhe von 7% bis 22%.

[Aryal et al., 2005] ermittelten an einer 8,4 ha großen Fläche an einer Autobahn in der Schweiz 0,7 mm Verluste je Ereignis. Im betrachteten Zeitraum (Herbst, vier Monate) fielen 285 mm Regen in 56 Regenereignissen. Daraus ergibt sich ein Verlust von 39,2 mm bzw. 13,8 %. Bezogen auf ein ganzes Jahr müssten die Verluste aufgrund einer größeren mittleren Verdunstungsrate etwas höher sein.

Mit der innerhalb von zwei Jahren beobachteten jährlichen Regenanzahl von 174 während einer Messkampagne in einer Straße in Karlsruhe [Xanthopoulos und Hahn, 1993], unter der Annahme eines jährlichen mittleren Niederschlags von 770 mm (Karlsruhe) und eines mittleren Benetzungs- und Muldenverlustes von 1,2 mm je Regenereignis lassen sich 27% an Verlusten berechnen.

In der von der Stadt Berlin veröffentlichten Wasserbilanz ergibt sich der Abfluss einzelner Flächen aus den Anteilen Niederschläge, Versickerung und Verdunstung (inkl. Beregnungs- und Muldenverluste). Die Verdunstung, wie sie im Mittel tatsächlich an Standorten und in Gebieten auftritt, wurde aus den wichtigsten Einflussgrößen Niederschlag und Wärmeangebot sowie den mittleren Speichereigenschaften der verdunstenden Flächen nach einer Gleichung nach Bagrov berechnet [Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, Berlin, o.J.a]. Danach betragen die Verluste von Einzelflächen mit einem Versiegelungsgrad zwischen 90 und 100% in der Stadt Berlin (mittlerer jährlicher Niederschlag = 570 mm) im Jahr 2005 ca. 20% für

Verkehrsflächen und für versiegelte Flächen mit Wohnbebauung ca. 15% [Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, Berlin, o.J.b].

[Boller et al., 2005b] und [Rudin und Kaufmann, 2006] gehen bei ihrer Wasserbilanz für das Einzugsgebiet einer versiegelten Straße von 20% für Benetzungs-, Mulden- und Verdunstungsverluste aus.

*Für die Abschätzung einer **Feststoffkonzentration im Niederschlagsabfluss** in [mg/l] sind Benetzungs-, Mulden- und Verdunstungsverluste zu berücksichtigen, die von einer Vielzahl von Randbedingungen abhängig und somit einzugsgebietspezifisch sind. Sie sind für Verkehrsflächenabflüsse (ca. 20%) i.d.R. höher als für Dachabflüsse (ca. 10% bis 15%).*

*Für die Abschätzung des Niederschlagsabflusses werden **pauschal 20% Benetzungs-, Mulden- und Verdunstungsverluste für undurchlässige Verkehrsflächen und den undurchlässigen Teil befestigter Freiflächen sowie 10% für Dachflächen** angenommen.*

### 3.3.2 Niederschlag

Der angenommene Niederschlag, der als Jahreswert in [l/m<sup>2</sup>·a] bzw. in [mm/a] zur Berechnung der Feststoffkonzentration verwendet werden muss, kann sehr variabel sein und sollte je nach tatsächlichen Gegebenheiten verwendet werden. Er liegt derzeit für Deutschland im Flächenmittel im linearem Trend bei 800 l/(m<sup>2</sup>·a) [Schönwiese und Tremel, 2011]. Liegen Feststoffdepositionsdaten nur für z.B. Monate oder Quartale vor, so ist der jeweilige Niederschlag entsprechend auf einen Jahresniederschlag in [l/(m<sup>2</sup>·a)] oder [mm/a] hochzurechnen.

*Der Niederschlag kann sehr variabel sein und sollte je nach tatsächlichen Gegebenheiten verwendet werden. Er liegt derzeit für Deutschland im Flächenmittel bei 800 l/(m<sup>2</sup>·a). Liegen Feststoffdepositionsdaten nur für z.B. Monate oder Quartale vor, so ist der jeweilige Niederschlag entsprechend auf den jährlichen Niederschlag hochzurechnen.*

### 3.3.3 Feststoffkonzentration in Verkehrsflächen- und Dachabflüssen

Die AFS<sub>ges</sub>- bzw. PM63-Konzentration in Niederschlagsabflüssen lässt sich schließlich mit der Feststoffdeposition aus Formel (3.1) für Verkehrsflächen und aus Formel (3.2) für Dachflächen berechnen:

$$\text{Feststoff- bzw. PM63-Konzentration [mg/l]} = \frac{\text{Feststoffdeposition AFS}_{\text{ges}} \text{ bzw. PM63 } \left[ \frac{\text{kg}}{\text{ha} \cdot \text{a}} \right]}{h_N \left[ \frac{\text{mm}}{\text{a}} \right] * \psi} \cdot 100 \quad (3.4)$$

Darin sind:

Feststoffdeposition AFS<sub>ges</sub> bzw. PM63 nach Formel 3.1 bzw. 3.2 [kg/ha·a]

N: Niederschlag, im Mittel in Deutschland 800 l/(m<sup>2</sup>·a)

ψ: Abflussbeiwert (Benetzungs-, Mulden und Verdunstungsverlust)  
0,8 für Verkehrsflächen und den undurchlässigen Teil von  
Parkplatzflächen und befestigten Freiflächen  
0,9 für Dachflächen

100: Umrechnung von kg in mg und ha in m<sup>2</sup>



### 3.3.4 Rückhalt im Straßeneinlauf und Kanalsystem

In den Straßeneinläufen und im Kanalsystem können Feststoffe zurückgehalten und eliminiert werden, siehe auch Kap. 2.3.2 und Kap. 2.3.4.

Überwiegend grobe Feststoffe können je nach Bauweise des Straßeneinlaufes dort zurückgehalten werden, ein **Rückhalt der Feianteile im Straßeneinlauf** wird aufgrund der geringen Absetzgeschwindigkeit der Partikel  $\leq 63 \mu\text{m}$  als unbedeutend eingestuft [Stein, 2008], [Fuchs et al., 2010a].

Bei größeren Einzugsgebieten kommt die **Retention in der Kanalisation** hinzu.

[Fuchs et al., 2010a] ermittelten eine mögliche **Reduzierung des PM63 im Straßeneinlauf- und Kanalspeicher** von 500 auf 400 kg/(ha·a), vgl. Bild 2-29. Dies entspricht einem Rückhalt von 20% oder einer Abminderung auf 80%. Der Rückhalt der gesamten Feststoffe ist abhängig von der Größe des Einzugsgebietes, er kann bis zu 90% betragen. Dies erfordert aber gut gewartete Systeme, aus denen Feststoffe gezielt durch Kanalspülungen oder in Sandfängen entfernt werden [Fuchs, 2013]. Für Einzugsgebiete von wenigen ha Größe wird für  $\text{AFS}_{\text{ges}}$  eine Reduktion um 40%, also auf 60%, angenommen.

Dies gilt jedoch nur für Flächen, auf denen keine Straßenreinigung stattfindet. Ist die Straßenreinigung auf Verkehrsflächen sehr effektiv, so wird die weitere Reduktion naturgemäß umso geringer. Zur Verdeutlichung sei der Extremfall dargestellt: Durch die Straßenreinigung sind alle groben Feststoffe entfernt, eine weitere Reduktion im Kanalnetz ist daher nicht mehr möglich. Die Retention im Kanalnetz muss daher zusammen mit den Effekten der Straßenreinigung gesehen werden.

Für die Retention von Feststoffen aus Dachflächenabflüssen wird im Vergleich zu Straßenabflüssen eine geringere Reduktion für  $\text{AFS}_{\text{ges}}$  vorgeschlagen, da in Dachabflüssen tendenziell mehr feine und weniger leichter zurückzuhaltende grobe Feststoffe enthalten sind.

Es ergeben sich folgende Faktoren:

| <i>Retentionsfaktoren (Retention im Gully- und Kanalsystem)</i>        |                        |   |
|--|------------------------|---|
| <i><math>f_{\text{Ret}}</math> ohne Straßenreinigung:</i>              | <i>für PM63 = 0,8;</i> | <i>für <math>\text{AFS}_{\text{ges}}</math> = 0,6</i> |
| <i><math>f_{\text{Ret}}</math> bei wöchentlicher Straßenreinigung:</i> | <i>für PM63 = 0,9;</i> | <i>für <math>\text{AFS}_{\text{ges}}</math> = 0,8</i> |
| <i><math>f_{\text{Ret}}</math> bei täglicher Straßenreinigung:</i>     | <i>für PM63 = 1,0;</i> | <i>für <math>\text{AFS}_{\text{ges}}</math> = 1,0</i> |
| <i><math>f_{\text{Ret}}</math> für Dachabflüsse:</i>                   | <i>für PM63 = 0,8;</i> | <i>für <math>\text{AFS}_{\text{ges}}</math> = 0,7</i> |

Die Berechnung der Feststoffkonzentration wird schließlich mittels Formel 3.3 durchgeführt, hier sind die unterschiedlichen Abflussbeiwerte für Verkehrs- und sonstige Flächen sowie für Dachflächen gemäß Formel 3.4 zu berücksichtigen.

## 4 AFS-Konzentration in Niederschlagsabflüssen - Darstellung vorhandener Messprogramme

Vor der Verifikation der entwickelten Gleichungen zur Berechnung von  $AFS_{ges}$  und PM63 in Niederschlagsabflüssen im Kapitel 5, werden zunächst die verwendeten Messprogramme und Literaturdaten zu Verkehrs- und Dachflächen sowie Trenngebietsabflüssen in diesem Kapitel dargestellt. Soweit vorhanden, werden zusätzlich zu den Messergebnissen die Art der Probengewinnung und Auswertung sowie die vorliegenden Randbedingungen und Besonderheiten beschrieben.

Die Bestimmung von Feststoffen in Niederschlagsabflüssen kann sehr unterschiedlich durchgeführt werden. [Rossi, 1998] schätzt, dass sich die Unsicherheiten aufgrund von Unterschieden der Probennahme im Entwässerungsnetz, der Probenaufbereitung und der Laboranalyse in einer Größenordnung von  $\pm 30\%$  bewegen. Daher wird zunächst auf mögliche Unterschiede oder auch Fehlerquellen zur Ermittlung von AFS eingegangen. Die Kenntnis darüber kann hilfreich sein, die Aussagekraft oder Güte eines Messprogrammes beurteilen zu können.

### 4.1 Bestimmung von Feststoffen

#### 4.1.1 Probennahme und –aufbereitung

Die **Probendichte** bei der Durchführung von Messprogrammen in Niederschlagsabflüssen ist, wie schon in Kapitel 3 ausführlich beschrieben, ein wichtiges Maß für deren Güte. Zur Illustration sind in Bild 4-1 die Ergebnisse einer Untersuchung dargestellt, in der in sieben Schweizer Siedlungsgebieten im Oberflächenabfluss von 127 Niederschlagsereignissen  $AFS_{ges}$ -Konzentrationen in einem Variationsbereich von 12 bis 372 mg/l gemessen wurden. Im Mittel lag diese bei 68 mg/l [Rossi et al., 2004]. Dies zeigt, wie variabel Einzelergebnisse und wie groß die Bedeutung der Beprobung möglichst vieler Ereignisse sein können.

#### Die Dokumentation

- der hydrologischen Gegebenheiten wie Niederschläge, Niederschlagsabfluss, Anzahl der vorangegangenen Trockentage,
- der Staubniederschläge im Messgebiet,
- jahreszeitlich bedingte Beobachtungen wie verstärkter Pollenflug,
- die Verkehrsbelastung der Straßen
- Straßenreinigung oder
- besondere Aktivitäten im Einzugsgebiet

kann eine wichtige Interpretationshilfe für die gewonnenen Ergebnisse sein, gerade wenn nur wenige Niederschlagsereignisse ausgewertet werden konnten.

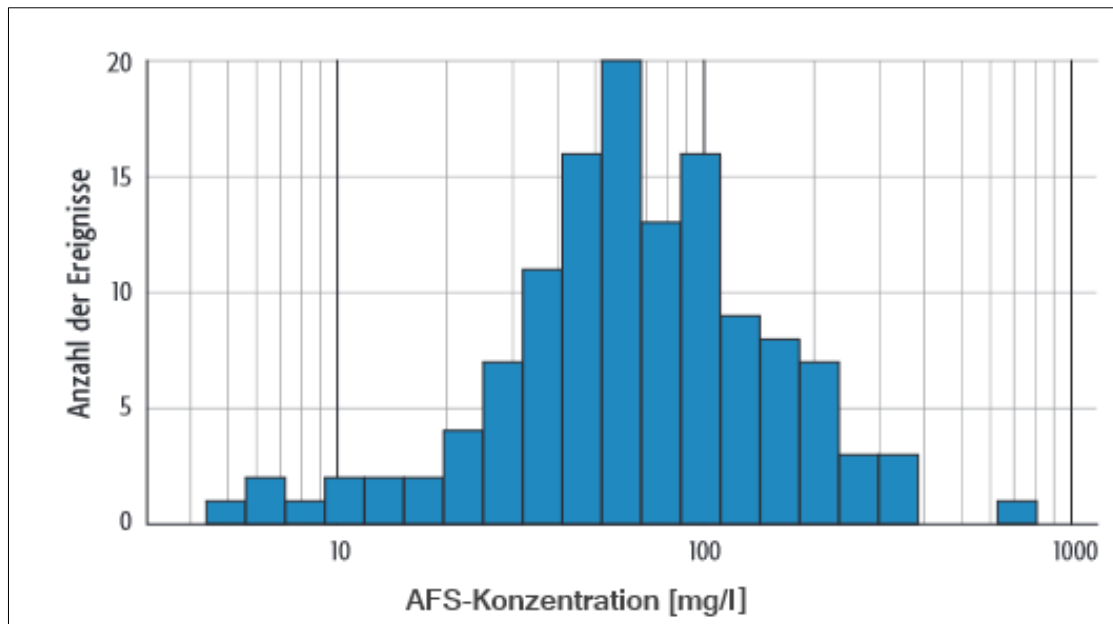


Bild 4-1: Verteilung der mittleren AFS-Konzentrationen im Oberflächenabfluss von 127 Regenereignissen in 7 Schweizer Siedlungsgebiete – Trennsystem (verändert nach [Rossi et al., 2004])

Der Art der **Probennahme** bei der Bestimmung von Inhaltsstoffen in Niederschlagsabflüssen kommt eine weitere große Bedeutung zu, da Niederschlagsabflüsse selten gleichförmig in Konzentration und Menge anfallen (vgl. Kap. 2.3.2). Im besten Fall wird der gesamte Niederschlagsabfluss eines Ereignisses aufgefangen und beprobt. Dies ist jedoch nur bei sehr kleinen Flächen möglich. Kann ein Niederschlagsereignis nicht vollständig aufgefangen werden, so sind zeit- oder besser mengenproportionale Probenahmen aus dem Zulaufstrom möglich. Die zeitproportionale Probenahme birgt weitere Fehlerquellen, da damit die Ungleichförmigkeit der Niederschlagsabflüsse nicht abgebildet werden kann.

Bei der mengenproportionalen Probenahme ist die Bildung eines abflussgewichteten Mittelwertes möglich, der folgendermaßen berechnet wird:

$$\text{Mittelwert}_{\text{abflussgewichtet}} = \frac{\sum Q_i \cdot C_i}{\sum Q_i}$$

Der Durchfluss  $Q_i$  während der Probennahme einer Teilmenge  $i$  ist zu bestimmen. Die Summe der Produkte der Durchflüsse  $Q_i$  und der jeweiligen Konzentration  $C_i$  ist durch die Gesamtdurchflussmenge zu teilen. In englischsprachigen Veröffentlichungen wird dieses Ergebnis als „event mean concentration“ (EMC) bezeichnet [Sharma et al., 2012], [Kayhanian et al., 2012].

In Deutschland wurden in letzter Zeit gute Erfahrungen damit gemacht, Regenabflüsse vollständig oder als Bypass in einem „Feststoffsammler“ aufzufangen und z.B. zu Monatsproben zusammenzuführen. Bei der Bypasslösung wird nach einem vorher festgelegten sinnvollen Durchfluss ein gewisses Probenvolumen aus dem Hauptstrom abgezweigt und in den Sammler geleitet [Grotehusmann et al., 2013].

Bei der Durchführung von Feststoffbestimmungen und der Interpretation von Messergebnissen ist neben der Probennahme die **Probenaufbereitung** ein wesentlicher Punkt. Eine übliche Vorgehensweise ist das Mischen von Einzelproben nach Ende des Regenereignisses in einem größeren Gefäß. Nach einer Homogenisierung des Inhalts werden Teilportionen aus der Gesamtprobe (Aliquote) entnommen und analysiert. Oft findet allerdings bereits während des Abfüllens wieder eine Trennung von suspendierten und sedimentierbaren Feststoffen statt.

In den USA wird daher auch zwischen TSS (total suspended solids) und SS (sediment solids) unterschieden [Horwath und Bannermann, 2009]. Während bei der Bestimmung des SS die Gesamtprobe filtriert und ausgewertet wird, wird bei der Bestimmung des TSS ein Aliquot entnommen und analysiert. Dies hat zur Folge, dass grobe, sedimentierte Feststoffe nicht mit erfasst werden und der Gehalt des TSS niedriger als der des SS ist.

Bei der Analyse einer Feststoffprobe in zwei Schritten aus einem „Feststoffsammler“ nach [Grotehusmann et al., 2009] oder [Grotehusmann et al., 2013] werden zusätzlich zu der Bestimmung des AFS aus dem Überstand in [mg/l] die sedimentierten Feststoffe aus dem Feststoffsammler als Trockenrückstand (TR, ebenfalls in [mg/l]) gewonnen und bestimmt. Im TR sind allerdings in geringem Maße gelöste Stoffe mitgehalten. Beide Anteile werden entsprechend des jeweiligen Volumens gewertet und als volumengewichteter Wert auf die Gesamtwassermenge bezogen.

#### 4.1.2 Analytik AFS

Das mögliche Korngrößenspektrum bei der Bestimmung der AFS ist offen, da nach den vorhandenen Normen die Porengröße zu verwendender Filter nicht festgelegt ist, vgl. Tabelle 4-1.

Tabelle 4-1: Filtermaterial und Porenweite zur Bestimmung von Feststoffen in unterschiedlichen Normen

| Bezeichnung   | Land        | Norm   | Filtermaterial | Porenweite    |
|---------------|-------------|--|----------------|---------------|
| <b>AFS</b>    | Deutschland | DIN EN 872   | Glasfaser      | 0,3 bis 3 µm  |
| <b>AFS</b>    | Deutschland | DIN 38409,<br>Teil 2                                   | Papier         | ca. 2 – 25 µm |
|               |             |  | Membran        | 0,45 µm       |
|               |             |  | Glasfaser      | 0,3 bis 3 µm  |
| <b>TSS/SS</b> | USA         | staatenspezifisch,<br>z.B. Michaud,<br>1994; ESS, 1993 | Glasfaser      | 0,3 bis 3 µm  |
| <b>GUS</b>    | Schweiz     | EDI, Kap. 7  | Membran        | 0,45 µm       |

Nach DIN EN 872 [DIN, 2005] wird die Wasserprobe in einem Vakuum- oder Druckfiltrationsgerät über einen Glasfaserfilter filtriert, der Filter wird anschließend bei  $105 \pm 2$  °C getrocknet und die auf dem Filter zurückgehaltene Masse ausgewogen. Als Bestimmungsgrenze wird 2 mg/l angegeben. Die Porenweite des zu verwendenden Glasfaserfilters (Glasfaserfilter existieren in den Porenweiten von 0,3 bis 3  $\mu\text{m}$ ) wird in der DIN EN 872 offen gelassen, so dass das ermittelte Korngrößenspektrum bei einer Angabe des AFS oft unbekannt ist. Dazu wird in DIN EN 872 angemerkt, dass es keine Korrelation und keinen Umrechnungsfaktor zwischen mit verschiedenen Filtern erhaltenen Ergebnissen gibt.

Die neben der DIN EN 872 existierende deutsche Norm von 1987, DIN 38 409, Teil 2 [DIN, 1987], gibt alternativ

- Papierfilter (ohne Nennung von Porenweiten)
- Membranfilter (Porenweite 0,45  $\mu\text{m}$ )
- Glasfaserfilter (Porenweite 0,3 bis 3  $\mu\text{m}$ )

zur Bestimmung des Parameters AFS an.

Papierfilter werden häufig mit den Porenweiten von 2  $\mu\text{m}$  („Blauband“), 4 – 12  $\mu\text{m}$  („Weißband“) oder 7 bzw. 12 – 25  $\mu\text{m}$  („Schwarzband“) verwendet. Die grobporigen Filter werden überwiegend für Schmutzwässer oder Schlämme mit hohen Konzentrationen verwendet. Für Niederschlagswässer, die oftmals nur geringe Konzentrationen von wenigen mg/l aufweisen, werden überwiegend Glasfaser-, Membran- oder Papierfilter mit geringeren Porenweiten verwendet.

In der Schweiz werden AFS als gesamte ungelöste Stoffe (GUS) bezeichnet und über einen Membranfilter der Porenweite 0,45  $\mu\text{m}$  filtriert [EDI, 1983].

In den USA werden zur Bestimmung des TSS in bundesstaatabhängigen Vorschriften oft Glasfaserfilter vorgeschlagen (Porenweite 0,3 bis 3  $\mu\text{m}$ ) [ESS, 1993], [Michaud, 1994].

Das mögliche Spektrum an Porenweiten bei der Bestimmung von AFS im Niederschlagsabfluss liegt somit bei 0,3  $\mu\text{m}$  bis maximal 25  $\mu\text{m}$ , häufig bei 0,45  $\mu\text{m}$ . Je nach Wahl des Porenfilters kann somit der ermittelte AFS-Gehalt schwanken und eine Vergleichbarkeit von Messdaten erschweren.

### 4.1.3 Analytik PM63

Eine weitere Fehlerquelle bei der Bestimmung des Feinanteils einer Probe (z.B. PM63) stellt neben der Wahl eines Filters mit einer Porengröße von  $> 0,45$   $\mu\text{m}$  das Nichthomogenisieren der Probe vor Filtration dar. Gerade feine Feststoffe aus Verkehrsflächenabflüssen neigen dazu, sich innerhalb kurzer Zeit (Stunden) zu größeren Agglomeraten zu verbinden, die dann im 63- $\mu\text{m}$ -Sieb zurückgehalten werden und zu PM63-Minderbefunden führen. [Schmitt, 2013] quantifizierte den Minderbefund in einem Niederschlagsereignis aus einem Trenngebietsabfluss zu mehr als 50%

(AFS<sub>ges</sub>: 72 mg/l; PM63 ohne Homogenisierung: 9,4 mg/l; PM63 nach Homogenisierung: 20 mg/l).

#### 4.1.4 Probenauswertung

Je nach Aussage einer Untersuchung können verschiedene Möglichkeiten der Datenauswertung sinnvoll sein.

Um den jährlichen Mittelwert von Niederschlagsabflüssen zu bestimmen, ist es zunächst wichtig, den abflussgewichteten Mittelwert jedes einzelnen Niederschlagsereignisses zu bestimmen. Die Berechnung des arithmetischen oder geometrischen<sup>10</sup> Mittelwertes aus Teilproben kann je nach Verlauf des Regenereignisses zu Abweichungen führen. Zur Illustration sind in Bild 4-2 zusätzlich zum frachtgewogenen Mittelwert die arithmetischen Mittelwerte sowie die Mediane der Verlaufspröben von neun erfassten Dachabflüssen einer in Graz durchgeführten Messkampagne [Kobencic, 2002] dargestellt. Je nach Regenverlauf sind die frachtgewogenen Mittelwerte oder die arithmetischen Mittelwerte etwas höher. Die Mediane sind bis auf eine Ausnahme niedriger, was zeigt, dass erhöhte Einzelwerte im Regenverlauf die Gesamtfracht beeinflussen und bestätigt, dass der Median für eine Beurteilung der Jahresfracht nicht geeignet ist.

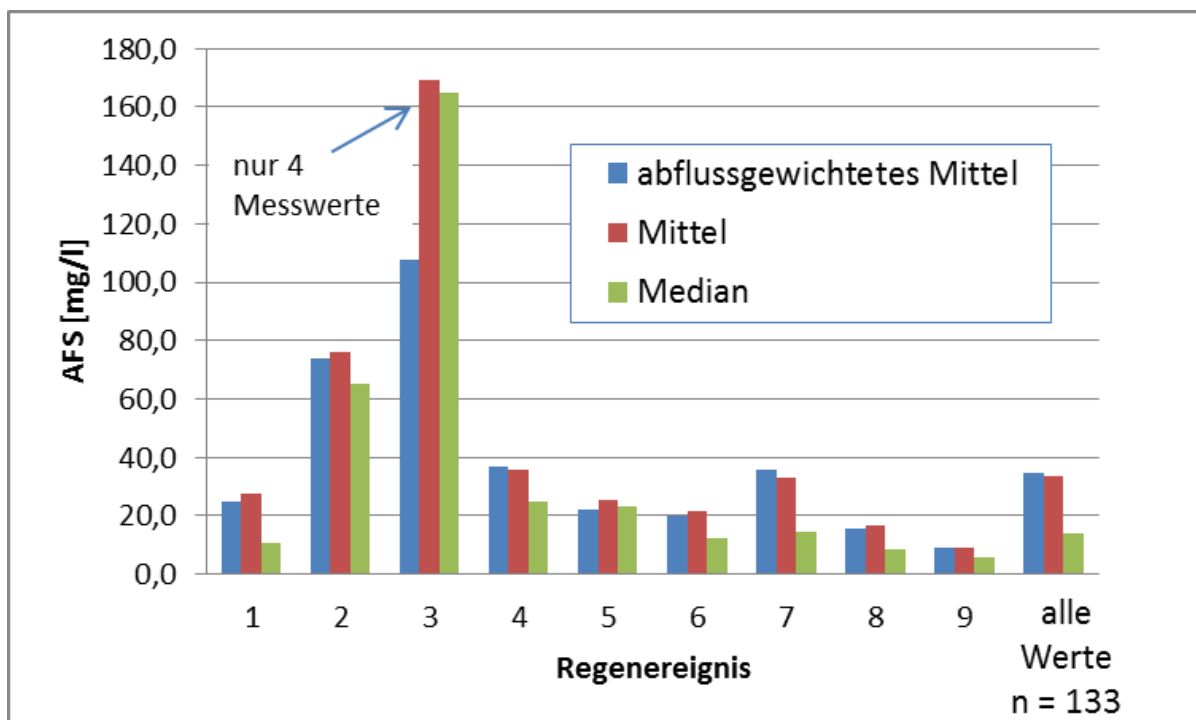


Bild 4-2: Gegenüberstellung von abflussgewichtetem Mittelwert, arithmetischem Mittelwert und Median des AFS<sub>ges</sub> im Abfluss eines Daches in Graz, Werte aus [Kobencic, 2002]

<sup>10</sup> Das geometrische Mittel wird berechnet, indem aus dem Produkt von n Zahlen die n-te Wurzel gezogen wird. Das geometrische Mittel ist nie größer als das arithmetische Mittel und kann nur bei positiven Zahlen, bei denen keine Null vorkommt, bestimmt werden.

Im zweiten Schritt der Probenauswertung ist das jeweilige Gesamtvolumen jedes einzelnen Niederschlagsereignisses heranzuziehen, um damit den abflussgewichteten Mittelwert der Messkampagne zu bilden. Arithmetische Mittelwerte oder Mediane sind zur Angabe eines Jahresmittelwertes nicht geeignet. Sie können ähnlich wie bei der Auswertung eines einzelnen Niederschlagsereignisses stark vom abflussgewichteten Mittelwert abweichen. [Grotehusmann et al., 2010] ermittelten z.B. in einer Messreihe mit nur wenigen Proben ( $n = 5$ ) in einem Trenngebiet 38 mg/l als Median, 46 mg/l als arithmetisches Mittel und 28 mg/l als abflussgewichtete Konzentration. In einer ausführlicheren Studie ( $n = 25$ ) werteten [Grotehusmann et al., 2009] 42 mg/l als Median, 72 mg/l als arithmetisches Mittel sowie 95 mg/l als abflussgewichtetes Mittel aus.

*Die Bestimmung eines AFS- oder PM63-Jahresmittelwertes aus Niederschlagsabflüssen hängt von der sorgfältigen Planung und Durchführung des Messprogrammes ab. Insbesondere können **Fehler bei der Probennahme, der Probenaufbereitung und der Analyse** gemacht werden, die sich im schlechtesten Fall aufsummieren können.*

*Wichtig sind die **zuflussmengenproportionale Probennahme**, das **Erfassen aller Feststoffe** bzw. Benennen der entfernten obersten Kornfraktion, die **Filtration über einen Filter mit einer Porenweite von 0,45  $\mu\text{m}$**  und das **Homogenisieren der Probe vor Bestimmung des PM63**. Der **Dokumentation** der hydrologischen Gegebenheiten bei der Probennahme und gebiets- und jahreszeitlicher Besonderheiten kommt eine weitere Bedeutung und Hilfestellung bei der Interpretation von Messergebnissen zu.*

*Schließlich ist die **Probenauswertung** ein wichtiger Bestandteil zur Ermittlung von jahresbezogenen Mittelwerten. Hier sind sowohl bei den einzelnen Regenereignissen als auch bei der Berechnung des Jahresmittelwertes aus sämtlichen Niederschlagsereignissen **abflussgewichtete Messwerte** heranzuziehen.*



## 4.2 Messprogramme

Die ausgewerteten Messprogramme werden getrennt nach Verkehrsflächen-, Dach- sowie Trenngebietsabflüssen in Teilkapiteln dargestellt.

### 4.2.1 Verkehrsflächenabflüsse

Daten zu AFS<sub>gesamt</sub>-konzentrationen in Verkehrsflächenabflüssen liegen seit den 1980er Jahren vielfach vor. Diese liegen zwischen 50 und 400 mg/l, im Maximum bei nahezu 2.000 mg/l und im Schwerpunkt bei 200 mg/l [Welker, 2005], vgl. Bild 4-3.

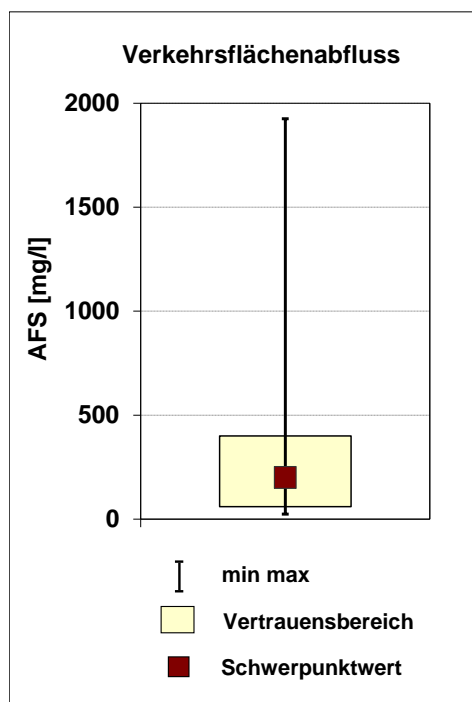


Bild 4-3: AFS<sub>gesamt</sub> in Verkehrsflächenabflüssen, nach [Welker, 2005]

Die großen Schwankungen zwischen den untersuchten Abflüssen lassen sich durch die unterschiedlichen Randbedingungen wie DTV, Fahrverhalten, Winterdienst, Randbebauung, Anteil unbefestigter Flächen, Größe der Einzugsgebietsfläche und Regenintensität und Regendauer erklären, die die Belastung der Verkehrsflächenabflüsse stark beeinflussen. Zusätzlich spielt der Anteil der erfassten Niederschlagsereignisse eine Rolle. Hinzu kommen Unterschieden der Probenahme, der Probenaufbereitung, der Laboranalyse und der Auswertung von Messreihen, vgl. Kapitel 4.1.

Veröffentlichte Daten werden in den folgenden Kapiteln nach den Kategorien „Straßen“, „Autobahnen“ und „Parkplätze“ getrennt beschrieben. Sofern angegeben, werden die Randbedingungen, Messmethoden und Auswertemethoden mit dargestellt.

#### 4.2.1.1 Straßenabflüsse

Ausgewertete Messkampagnen an Straßen sind in Tabelle 4-2 chronologisch geordnet dargestellt.

Tabelle 4-2: AFS<sub>ges</sub> in [mg/l] aus unterschiedlichen Messprogrammen an Straßen

| Beschreibung   | AFS <sub>ges</sub> [mg/l] <sup>1)</sup>  | Jahr der Untersuchung | Quelle                      |
|--|--|-----------------------|-----------------------------|
| D, Karlsruhe Waldstadt, Wohngebiet, Straßeneinlauf, stark belaubt, keine Randbebauung, 3.200 DTV, n = 87; 2 Jahre abflussgewichtetes Mittel, Inklusive Laub und groben Feststoffen   | <b>564</b><br>(davon 10 bis 40 % PM <sub>63</sub> , 40 bis 50% grob > 600 µm)    | 1988 - 1990           | Xanthopoulos und Hahn, 1993 |
| D, Bayreuth, Kreuzung mit 25.000 DTV (4-spurig) und 9.000 DTV (2-spurig). A <sub>u</sub> = 130 m <sup>2</sup> , abflussgewichteter Mittelwert aus n = 3 im Sommer  | <b>239</b><br>(164 bis 306)  | 1990                  | Kern et al., 1992           |
| USA, Madison, Mittelwert aus je 3 bis 6 Standorten und n = 1 bis 3, Mai bis Juli; geometrische Mittelwerte<br><u>Wohngebiet</u> , 35% Baumanteil<br>Sammelstraßen, 2.830 bis 7.000 DTV<br>Zufahrtsstraßen DTV 100 bis 400<br>Wohngebietsstraßen<br><u>Gewerbegebiet</u><br>Hauptstraße, 20.000 DTV<br><u>Industriegebiet</u> , Baumanteil < 1%<br>Straßen, 500 bis 2.150 DTV<br>Hauptstraßen, 19.800 DTV | <b>326</b><br><b>662</b><br><b>173</b><br><b>232</b><br><b>763</b><br><b>690</b> | 1991                  | Bannerman et al., 1993      |
| USA, Los Angeles, Messungen während Regenzeit, normal: N = 262 mm in 5 Monaten, im Probejahr doppelt so viel Niederschlag, n = 14, arithmetischer Mittelwert   | 2 Wohngebiete <b>33</b><br>Geschäftsstraße <b>39</b>                             | 11/1997 bis 3/1998    | Lau et al., 2001            |
| CH, Burgdorf, Kirchbergstraße, 17.000 DTV, 17% Schwerlastverkehr, 2 Jahre, arithmetischer Mittelwert, Zulauf Bankett, keine Randbebauung   | <b>149</b><br>(Monatswerte: 80 bis 290)  | 2002 bis 2004         | Boller et al., 2005a und b  |

<sup>1)</sup> Zahl in Klammern: Konzentrationsbereich der Einzelwerte

Fortsetzung Tabelle 4-1: AFS<sub>ges</sub> in [mg/l] aus unterschiedlichen Messprogrammen an Straßen

| Beschreibung  | AFS <sub>ges</sub> [mg/l] <sup>1)</sup>             | Jahr der Untersuchung | Quelle                   |
|---|---|-----------------------|--------------------------|
| D, Augsburg, Derchinger Straße, keine Randbebauung, 7.000 DTV, 9-jährige Messkampagne, abflussgewichtetes Mittel, AFS < 1mm   | <b>98,4</b><br>(Jahresmittelwerte:<br>56,5 bis 464) | 1996 bis 2005         | Nadler und Meißner, 2008 |
| Australien, Bracken Ridge, Vorort von Brisbane, 14.000 Einwohner, A = 1,74 ha, meist Straßen, n = 21, meist im australischen Sommer (Nov bis Feb), viel Niederschläge, abflussgewichteter Mittelwert                      | <b>30</b><br>(10 bis 480)                           | 3/2003 bis 9/2006     | Hatt et al., 2009        |
| D, München, Landshuter Allee, 57.000 DTV, n = 24, 1 Jahr, A <sub>u</sub> = 300 m <sup>2</sup> , Asphalt, Höchstgeschwindigkeit 60 km/h, 2 Fahrspuren, ein Beschleunigungsstreifen, 1 Standspur; arithmetischer Mittelwert | <b>405</b><br>Median: 261<br>(6 bis 2.440)          | 2006 bis 2007         | Hilliges et al., 2007    |
| D, Augsburg, Derchinger Straße, 7.000 DTV, gleiche Messstelle wie oben, abflussgewichtete Quartalsmittelwerte.  | Quartalswerte:<br>(163 bis 2.559)                   | 2009 bis 2010         | Hauraton, 2012           |
| China, Shenzhen, Trennkanal, mehrere Straßen, n = 15, 1 Jahr, abflussgewichteter Mittelwert   | <b>552</b><br>(111 bis 2.028)                       | 2007 bis 2008         | Luo et al., 2012         |

<sup>1)</sup> Zahl in Klammern: Konzentrationsbereich der Einzelwerte

Eine umfangreiche Messkampagne wurde 1988 bis 1990 in **Karlsruhe-Waldstadt** in einem reichlich bewaldeten Wohngebiet mit A<sub>u</sub> = 1,79 ha, davon 0,47 ha Verkehrsfläche durchgeführt [Xantopoulos und Hahn, 1993]. Es wurden mehrere Messstellen beprobt, deren Anschlussgröße vermutlich denen normaler Straßeneinläufe entspricht. Die am intensivsten beprobte Messstelle (zwei Jahre, n = 87) lag an einer Hauptstraße mit einer Belastung von 3.200 DTV. Der abflussgewichtete Mittelwert lag relativ hoch bei 564 mg/l AFS. Enthalten waren hier die Anteile im Grobfang sowie im Straßeneinlauf. Der Feinanteil betrug zwischen 10% und 40% PM<sub>6.3</sub>. Die Staubbelastung lag bei 70 mg/m<sup>2</sup>·d.

[Kern et al., 1992] untersuchten drei Niederschlagsereignisse im Sommer im Kreuzungsbereich einer vierspurigen Straße mit 25.000 DTV und einer zweispurigen Straße mit 9.000 DTV in **Bayreuth**. An den beprobten Trockengully sind 130 m<sup>2</sup> Fläche angeschlossen. Der Straßenabfluss lief zunächst durch ein Sieb mit einer Ma-

schenweite von 2 mm, bevor er in dem Sammelbehälter aufgefangen wurde. Die AFS-Konzentrationen < 2 mm betragen je Niederschlagsereignis 202, 306 bzw. 164 mg/l. Der abflussgewichtete Mittelwert aus den drei Ereignissen betrug 239 mg/l. In dem Zeitraum der Messungen (Mess- und Trockentage in der Summe 12 Tage) regnete es 8,8 mm.

[Bannermann et al., 1993] führten eine Messkampagne an unterschiedlichen Straßentypen während zwei Monaten in **Madison in den USA** durch. Aus je drei bis sechs Standorten je Straßentyp und ein bis drei Regenereignissen wurde jeweils der geometrische Mittelwert dargestellt. Die Aussagekraft enthält somit nur Stichprobencharakter. Trotzdem wird diese Studie dargestellt, da die Örtlichkeiten der Probenahme sehr gut beschrieben sind. Innerhalb des Messzeitraumes (63 Tage) regnete es 79,1 mm.

Zwei Straßen in Wohngebieten sowie eine weitere in einem Geschäftsviertel wurden in **Los Angeles** von [Lau et al, 2001] in der Regenzeit (ca. 5 Monate) 1997 bis 1998 beprobt. Der Probensammler wurde bei großen Regenereignissen mittels Bypass umfahren. Die Anzahl der Regenereignisse betrug 14, bei denen jeweils nur ein bis 3 Proben pro Ereignis genommen wurden. Dargestellt sind die arithmetischen Mittelwerte der Ereignisse. DTV sind nicht bekannt. Von November bis März beträgt der Niederschlag im langjährigen Mittel 262 mm, im Jahr der Untersuchungen war der Niederschlag aufgrund des Ninjas doppelt so hoch wie im langjährigen Mittel, so dass die Konzentrationen relativ niedrig waren. Der AFS<sub>ges</sub>-Mittelwert der Wohnstraßen betrug etwa 33 mg/l, der der Geschäftsstraße 39 mg/l.

In einem **Schweizer Projekt** wurden Schadstoffe im Straßenabwasser einer stark befahrenen Straße sowie der Zulauf zum Bankett der gleichen Straße untersucht [Boller et al., 2005 a und b]. Die Straße verbindet den Autobahnanschluss Kirchberg mit der Stadt **Burgdorf** und wird mit 17.000 DTV belastet. Das Straßenabwasser des ersten Projektes wurde in einem Tank gesammelt und dann monatlich beprobt. Einige Feststoffe setzten sich in diesem Tank ab, so dass der Mittelwert über die gesamte Zeit mit 100 mg/l geringer ausfiel als in dem Parallelprojekt, bei dem die Straße auf einer Länge von etwa 1,5 m vor Zulauf zum Bankett beprobt wurde. Das Ergebnis von Monatssammelproben betrug hier als arithmetischer Mittelwert 149 mg/l und wurde von den Autoren als realistischer eingeschätzt. Die verwendete Filterporenweite betrug 0,45 µm.

An der **Derchinger Straße in Augsburg** wurden in einem 28 m langen Versuchsfeld in einer 9-jährigen Messkampagne jeweils die Quartalsmittelwerte (AFS<sub>ges</sub> < 1 mm) gemessen. Die Straße weist zwei Spuren mit einer Breite von 7,5 m auf. An die Fahrbahn grenzt ein 1,3 m breites betoniertes Bankett an. Somit ist das Einzugsgebiet etwa 250 m<sup>2</sup> groß. Die Verkehrsbelastung beträgt etwa 7.000 DTV, davon 15 bis 20% LKW-Verkehr. Die Straßendecke besteht aus Asphalt. Der Vegetationseinfluss durch die neu gepflanzte Baumallee wurde als gering eingeschätzt. Allerdings befinden sich in unmittelbarer Nähe landwirtschaftliche Nutzflächen, eine Beeinflussung des Feststoffgehalts im Straßenabfluss durch Austrag von Oberboden wurde vermutet.

Der abflussgewichtete Mittelwert der gesamten Messkampagne betrug 98 mg/l mit großen Schwankungen im Jahresmittel von 56,6 bis 464 mg/l [Nadler und Meißner, 2008].

Die für eine dezentrale Behandlungsanlage als Prüffeld eingesetzte gleiche Straße ergab in den Quartalen 2/2009 bis 2/2010 noch höhere Werte im abflussgewichteten Mittelwert von 163 bis maximal 2.559 mg/l im Frühling-/Sommerquartal 2009 [Hauraton, 2012].

Eine Untersuchung aus **Australien** [Hatt et al., 2009] ergab einen abflussgewichteten Mittelwert an AFS von 30 mg/l (10 bis 480 mg/l) bei 21 Regenereignissen in einem Einzugsgebiet von 1,74 ha in **Bracken Ridge**, einem **Vorort von Brisbane** mit etwa 14.000 Einwohnern, an der überwiegend Straßen angeschlossen sind. Die meisten Niederschlagsereignisse wurden im australischen Sommer (November bis Februar, T = 26 bis 28°C, N = ca. 110 mm/Monat) beprobt, daher dürfte sich der niedrige Wert erklären.

[Hilliges et al., 2008] testeten eine dreistufige Pilotanlage an der **Landshuter Allee in München** mit einer Belastung von 57.000 DTV. Die Straße besteht aus zwei Fahrspuren, einem Beschleunigungsstreifen sowie einer Standspur. Die Seite der Probenahme schließt ohne Bordstein an eine Freifläche an, an der anderen Seite befindet sich ein Bordstein. Die Höchstgeschwindigkeit an der Stelle beträgt 60 km/h. An die Anlage waren 300 m<sup>2</sup> asphaltierte Verkehrsfläche angeschlossen. Am Straßenrand befinden sich Grasflächen sowie Büsche und Bäume. Innerhalb eines Jahres wurden 24 Ereignisse beprobt. Der arithmetische Mittelwert betrug 405 mg/l, der Median 261 mg/l, der Bereich aller Messwerte lag zwischen 6 und 2.440 mg/l AFS<sub>ges</sub>. Fünf Regenereignisse waren durch Streusalz beeinflusst.

Ein Trenngebietsauslass in der 12-Mio.-Einwohner-Stadt **Shenzhen in China**, in der der Abfluss mehrerer Straßen zusammengeführt wurde, wurde ein Jahr lang intensiv beprobt. Die Gesamtzahl der beprobten Regenereignisse betrug 15. Der abflussgewichtete Mittelwert an AFS war mit 552 mg/l relativ zu den anderen Studien hoch [Luo et al., 2012]. Hier kann nur vermutet werden, dass dies auch durch die in chinesischen Großstädten vorhandene hohe Luftbelastung verursacht wird – zum Vergleich: der Grenzwert für Feinstaub bis 10 µm im Tagesmittel liegt in Deutschland bei 50 µg/m<sup>3</sup>, in Beijing wurden bis zu 993 µg/m<sup>3</sup> gemessen [Tügel, 2013].

*Straßenabflüsse weisen eine AFS<sub>ges</sub>-Konzentration von im (Jahres-)mittel 30 bis nahezu 700 mg/l auf.*

*Einflussfaktoren sind die Staubdeposition, der Verkehr, zeitlich begrenzte Einträge aus der Landwirtschaft, bauliche Gegebenheiten aber auch das Niederschlagsgeschehen.*

*PM<sub>63</sub>-Werte wurden in den ausgewerteten Studien nicht gemessen.*

#### 4.2.1.2 Autobahnabflüsse

Messprogramme an Autobahnen sind in Tabelle 4-3 chronologisch geordnet zusammengefasst.

[Klein, 1982] beprobte den aus mehreren Straßeneinläufen im Kanal gesammelten Straßenabfluss von drei Autobahnen mit ähnlicher Verkehrsbelastung während mehrerer Monate. Im Einzugsgebiet der **Autobahn A8/B10** befinden sich größere Anteile unbefestigter Flächen mit Grasbewuchs (60% der Gesamtflächen, Abflussbeiwert ca. 0,35), zudem fließt das Regenwasser zunächst über grasbewachsene Seitenmulden über Böschungen in die Einlaufschächte. Das Straßenwasser ist somit durch Bodenerosion beeinflusst, was auch den höheren AFS-Gehalt im Vergleich zu den anderen Autobahnen trotz geringerer Verkehrsbelastung und zweimonatlicher Straßenreinigung erklärt, siehe auch Kap. 2.3.2. Die an die Trennkanalisation der **A6** angeschlossenen Flächen bestehen ebenfalls zu einem jedoch geringeren Anteil aus unbefestigten Flächen (14%, Abflussbeiwert 0,72). Auch hier lag der AFS-Gehalt höher als an der **A 81** trotz wöchentlicher Straßenreinigung. Die Flächen der **A 81** sind vollständig befestigt (Abflussbeiwert 0,92) so dass nicht von Erosionseinträgen auszugehen ist. Der AFS-Gehalt lag hier auch am niedrigsten, obwohl keine Straßenreinigung stattfand.

[Lygren et al., 1984] beprobten ausführlich den Staub, Schnee sowie Straßenabfluss entlang einer **Autobahn nahe Oslo in Norwegen** mit 8.000 DTV während des Winterhalbjahres. Der AFS-Gehalt mit 683 mg/l (arithmetisches Mittel) war hier vergleichsweise hoch, was mit dem Abrieb aus Winterreifen und Spikes sowie der Salzstreuung zu erklären ist. Messungen der Feinanteile (über die Sinkgeschwindigkeit < 8,5 cm/min) ergaben Anteile von 18,5 % bis 92 %, im Mittel 62 %.

Der Mittelwert von vier **Autobahnabflüssen in den USA** im Überlandbereich ergaben Feststoffgehalte in der Höhe von 42 mg/l. Der Mittelwert von Untersuchungen an acht städtischen Autobahnen ergab 234 mg/l [Shelley et al. 1987]. Leider waren die einzelnen Mittelwerte nicht dargestellt, sondern die Mediane aus jeweils sieben bis 139 Regenereignissen, die aufgrund der großen Streuung von Werten aus Straßenabflüssen meistens niedriger als Mittelwerte sind. Ein weiterer Grund für die geringen Konzentrationen in den Straßenabflüssen von Überlandautobahnen sind vermutlich die geringe Höchstgeschwindigkeit und die Fahrweise in den USA, die weniger Abrieb hervorruft. Auch wird der Anteil der verwehten Feststoffe hier wesentlich größer sein als in den städtischen Autobahnen. Bei den städtischen Autobahnen kann nur vermutet werden, dass die DTV im Vergleich zu den Überlandautobahnen höher waren und Lärmschutzwände oder Leitplanken Verwehungen verhindern.

Ein größeres Einzugsgebiet einer **Überlandautobahn in England** ( $A_b = 55.000 \text{ m}^2$ ,  $A_{nb} = 30.000 \text{ m}^2$ ) mit 38.000 DTV wurde ein Jahr lang beprobt [Hewitt und Rashed, 1991]. In 20 Regenereignissen wurden im Mittel 54 mg/l AFS gefunden (2 bis 192 mg/l). Die Autobahn verfügt an der beprobten Stelle mit einer Länge von 1,6 km über 6 Spuren.

Tabelle 4-3: AFS<sub>ges</sub> in [mg/l] aus unterschiedlichen Messprogrammen an Autobahnen

| Beschreibung  | AFS <sub>ges</sub><br>[mg/l] <sup>1)</sup>      | Jahr der<br>Un-<br>tersuchung | Quelle                     |
|---|---|-------------------------------|----------------------------|
| D, A 81 Pleidelsheim, Hochborde, Fahrbahn Zementbeton, 41.000 DTV, LKW-Anteil 19%, 6-spurig, keine Straßenreinigung, abflussgewichteter Mittelwert  | <b>137</b>                                      | 2 bis 9/1978                  | Klein, 1982                |
| D, A 6 Heilbronn-Obereisesheim, 14% unbefestigte Flächen, Hochborde, Fahrbahn Asphaltbeton, 6-spurig, 47.000 DTV, LKW-Anteil 22 %, wöchentliche Straßenreinigung, abflussgewichteter Mittelwert                       | <b>181</b>                                      | 2 bis 7/<br>1979              | Klein, 1982                |
| D, A8/B10 Ulm West, 60% unbefestigte Fläche, Straßeneinläufe über Böschungen, Asphaltbeton, LKW- Anteil 17,5 bzw. 14%, 40.600 bzw. 11.500 DTV, 4-spurig, wöchentliche Straßenreinigung, abflussgewichteter Mittelwert | <b>252</b>                                      | 5/1980 bis<br>3/1981          | Klein, 1982                |
| N ,E6 bei Oslo, 8.000 DTV, n = 20, Winter; arithmetischer Mittelwert  | <b>683</b><br>(162 bis 2.420)                   | 9/1980 bis<br>5/1981          | Lygren et al.,<br>1984     |
| USA Arithemischer Mittelwert des Medians aus Messprogrammen an acht städtischen Autobahnen,   | <b>234</b><br><b>(Mediane)</b><br>(161 bis 410) |                               | Shelley et al.<br>1987     |
| USA, arithmetischer Mittelwert des Medians aus Messprogrammen an vier Überlandautobahnen,   | <b>42 (Mediane)</b><br>(9 bis 90)               |                               | Shelley et al.<br>1987     |
| GB, Überlandautobahn M6 in Burton-in-Kendal, , 38.000 DTV, A <sub>b</sub> = 55.000 m <sup>2</sup> , A <sub>nb</sub> = 30.000 m <sup>2</sup> , 2-3 Spuren, l = 1,6 km, 1 Jahr, n = 20                                  | <b>54</b><br>(2 bis 192)                        | 1986                          | Hewitt und<br>Rashed, 1991 |
| USA, Oakland, Kalifornien, Stadtautobahn, > 30.000 DTV  | <b>142</b>                                      |                               | Driscoll et al.,<br>1990   |
| USA, Oakland, Kalifornien, Überlandautobahn, < 30.000 DTV   | <b>41</b>                                       |                               | Driscoll et al.,<br>1990   |
| NL, A7 bei Amsterdam, vierspurig, Leitplancken zwischen den Spuren, 53.000 DTV, undurchlässiger Asphalt, guter Straßenzustand, wöchentliche Mischprobe  | 194 (Median)<br>(153 bis 354)                   | 7/1994 bis<br>9/1995          | Berbee et al.,<br>1999     |
| NL, A9 bei Amsterdam, vierspurig, Leitplancken zwischen den Spuren, 83.000 DTV, durchlässiger Asphalt, guter Straßenzustand, wöchentliche Mischprobe  | 17 (Median)<br>(2 bis 70)                       | 7/1994 bis<br>9/1995          | Berbee et al.,<br>1999     |

<sup>1)</sup> Zahl in Klammern: Konzentrationsbereich der Einzelwerte



Fortsetzung Tabelle 4-3: AFS<sub>ges</sub> in [mg/l] aus unterschiedlichen Messprogrammen an Autobahnen

| Beschreibung   | AFS <sub>ges</sub><br>[mg/l] <sup>1)</sup> | Jahr der<br>Un-<br>tersuchung | Quelle   |
|--|--|-------------------------------|--|
| USA, Interstate 75 Cincinnati, vierspurig, Seitenstreifen, 300 m <sup>2</sup> große Fläche, 135.000 PKW, 15.000 LKW, N = 1400 mm, n = 13, zuflussgewichteter Mittelwert aus beiden Studien   | <b>93,5</b><br>(29 bis 258,5)              | 4/1995 bis<br>6/1997          | Glenn et al.,<br>2002; Sansa-<br>lone und<br>Buchberger,<br>1996 |
| F, A 11 bei Nantes, A = 3.200 m <sup>2</sup> , l = 275 m, DTV 24.000, 4-spurig, n = 50, 1 Jahr, N = 656 mm, Abfluss: 608 mm, arithmetischer Mittelwert   | <b>71</b><br>47 (Median)<br>16 bis 267     | 3/1995 bis<br>2/1996          | Legret,<br>Pagotto, 1999   |
| USA, 27 Messstellen an Highways nahe Seattle, Mittelwert aus allen Studien   | <b>119</b><br>3 bis 295                    | 1995 bis<br>2007              | Herrera, 2007  |
| A, A1/A4/Zufahrt, Winterthur, Schweiz, 8,4 ha, im Mittel ca. 50.000 DTV, n = 4   | 120 bis 150<br>(abgelesen)                 | 9 bis<br>12/2000              | Aryal et al.,<br>2005  |
| A, A1, 3 Messstellen, 8-spurig, 60.000 DTV, ein Jahr, arithmetischer Mittelwert  | <b>60</b><br>(0 bis 460)                   | 12/2001 bis<br>4/2003         | Geiger-Kaiser<br>und Jäger,<br>2005                              |
| CH, A1, Mattstetten, 74.000 DTV, n = 11, Probennahme nach Ölabscheider   | <b>53</b> (nach<br>Abscheider)             | 7 bis<br>11/2007              | Kaufmann,<br>2008a   |
| D, Autobahn A 555 bei Bonn (5,4 % LKW, 6-spurig) und A 61 nahe Meckenheimer Kreuz (19,8 % LKW, 4-spurig), je ca. 70.000 DTV; n = 20, arithmetischer Mittelwert beider Autobahnen im Messzeitraum   | <b>202</b>                                 | 2 bis<br>12/2009              | Bast, 2010,<br>Bast, 2011  |
| D, Autobahn A6, Sinsheim, 85.600 DTV, 6-spurig, geringer Baumbestand, A <sub>u</sub> = 27,5 m <sup>2</sup> , inkl. Feststoffe aus einer Sammelrinne; abflussgewichteter Mittelwert   | <b>385</b><br><b>PM63: 177</b>             | 4/2011 bis<br>3/2012          | Grotehusmann<br>et al., 2013                                     |
| D, Autobahn A 7, Großburgwedel, 66.200 DTV, 6-spurig, Betonfahrbahn mit Standstreifen, einseitige Lärmschutzwand, geringer Baumbestand, A <sub>u</sub> = 28 m <sup>2</sup> , inkl. Feststoffe aus einer Sammelrinne, abflussgewichteter Mittelwert | <b>500</b><br><b>PM63: 62</b>              | 4/2011 bis<br>3/2012          | Grotehusmann<br>et al., 2013                                     |
| D, Autobahn A37, Kirchhorst, 45.000 DTV, 4-spurig, Asphaltfahrbahn mit Standstreifen, geschlossene Baumvegetation, A <sub>u</sub> = 27,3 m <sup>2</sup> , inkl. Feststoffe aus einer Sammelrinne, abflussgewichteter Mittelwert                    | <b>309</b><br><b>PM63: 100</b>             | 4/2011 bis<br>3/2012          | Grotehusmann<br>et al., 2013                                     |

<sup>1)</sup> Zahl in Klammern: Konzentrationsbereich der Einzelwerte

[Driscoll et al., 1990] beprobten den AFS im Verkehrsflächenabfluss an einer **Stadt-autobahn** (> 30.000 DTV) und im Vergleich dazu an einer **Überlandautobahn** (< 30.000 DTV) in **Oakland, Kalifornien**. Der AFS-Mittelwert des Niederschlagsabflusses von der städtischen Autobahn betrug 142 mg/l, der von der Überlandautobahn 41 mg/l. Die gemessene Belastung ist bei beiden Autobahnen vergleichsweise gering, eventuell liegt die Begründung im nicht erforderlichen Streusalzeinsatz im kalifornischen Winter. Zusätzlich zur geringeren DTV auf der Überlandautobahn führen eine vermutlich geringere Staubdeposition sowie Verfrachtungen durch Wind und Spritzwasser zu geringeren AFS-Belastungen.

In der Untersuchung von [Berbee et al., 1999] wurden die Unterschiede des Straßenabflusses zweier Autobahnabschnitte bei **Amsterdam, Niederlande**, in Abhängigkeit von der Art des Asphaltbelags (durchlässig, 83.000 DTV und undurchlässig, 53.000 DTV) ermittelt. In einer mehr als einjährigen Messkampagne wurden die Abflussproben (1 m x 0,15 m große Ablaufrinne fixiert an der Böschungsschulter der Fahrbahn) von jeweils einer Woche untersucht. Angegeben sind die Mediane der Messergebnisse (194 mg/l beim undurchlässigen Asphalt, 17 mg/l beim durchlässigen Asphalt).

Zur Belastung der **Interstate 75 in Cincinnati, USA**, wurden zwei Studien von [Glenn et al., 2002] und [Sansalone und Buchberger, 1996] veröffentlicht. Die Interstate 75 weist an der beprobten Stelle vier Spuren in jede Richtung und je zwei Seitenstreifen auf. Sie führt mitten durch die Stadt und wird mit 135.000 DTV (PKW) und 15.000 DTV (LKW) belastet. Der durchschnittliche jährliche Niederschlag in Cincinnati beträgt  $N = 1.400$  mm/a. Zur Beprobung wurde ein 15 m mal 20 m großes Teilstück verwendet. Die Gesamtzahl der Ereignisse im Zeitraum von zwei Messjahren betrug  $n = 13$ . Der abflussgewichtete Mittelwert daraus betrug 93,5 mg/l AFS<sub>ges</sub>, wobei die Spannweite von 29 bis 258 mg/l reichte.

Ein Autobahnabschnitt der **A 11 bei Nantes** mit einer Gesamtfläche von 3.200 m<sup>2</sup> und einer Länge von 275 m wurde ein Jahr lang von [Legret und Pagotto, 1999] untersucht. Die Verkehrsbelastung betrug 24.000 DTV, mit etwa 7% Schwerlastverkehr. Der AFS<sub>ges</sub>-Mittelwert lag bei 71 mg/l, der Median bei 47 mg/l und die Spannweite der Ergebnisse reichte von 16 bis 267 mg/l. 82,4 % der Feststoffe wiesen einen Korndurchmesser von unter 200 µm auf. Interessant in dieser Studie ist außerdem die Untersuchung der einzelnen Emittenten, wie Abriebsprodukte, Staubdeposition und Enteisungssalze in kg/km·Jahr. Es regnete 656 mm innerhalb des Messzeitraums, von denen 608 mm (92,7%) zum Abfluss beitrugen.

In einem Übersichtsbericht wurden die Ergebnisse aus zwischen den Jahren 1995 und 2007 durchgeführten 11 Studien an **27 Örtlichkeiten (Highways) im Staat Washington, USA**, dargestellt [Herrera, 2007], die zwischen 3 und 295 mg/l, im Mittel 119 mg/l, ergaben. Leider wurden die Randbedingungen der einzelnen Messprogramme und die Auswertemethoden nicht dargestellt.

[Aryal et al., 2005] untersuchten ein Einzugsgebiet von 8,4 ha in **Winterthur, Schweiz**, von September bis Dezember 2000. Das Einzugsgebiet besteht aus zwei

Autobahnabschnitten sowie einer Zufahrt mit im Mittel etwa 50.000 DTV. Die Verkehrsflächenabflüsse werden einer zentralen Behandlungsanlage zugeführt und wurden dort beprobt. Der Fokus der Messungen lag auf dem Verlauf der Feststoffkonzentrationen (gesamt und AFS < 45 µm) während vier Regenereignissen. Die in der Tabelle dargestellten Mittelwerte sind aus dargestellten Diagrammen abgeschätzt.

An drei Messstellen an der **A1 in Österreich** mit etwa 60.000 DTV wurden die Straßenabflüsse über ein Jahr lang beprobt [Geiger-Kaiser und Jäger, 2005]. Die Spannweite aller Einzelproben reichte von 0 bis maximal 460 mg/l AFS. Die Mittelwerte der drei Messstellen lagen zwischen etwa 15 und 250 mg/l. Der arithmetische Mittelwert aller Proben und Messstellen lag bei 60 mg/l. Auch hier wurden ausgeprägte Spitzen in den Wintermonaten aufgrund von Streusalzeinsatz festgestellt.

Im Zuge von Versuchen für die Reinigung von Straßenabwasser an der Autobahn **A1 bei Mattstetten, Schweiz**, (74.000 DTV) wurden elf Niederschlagsereignisse zwischen Juli und November 2007 beprobt [Kaufmann, 2008a]. Die Probennahmestelle befand sich hinter einem Ölabscheider, so dass gut sedimentierbare Stoffe in dem Mittelwert von 53 mg/l nicht enthalten sind.

Die BAST untersuchte mehrere Jahre lang (Februar 2005 bis Dezember 2009) die Stoffausbreitung an drei Autobahnen mittels Staubniederschlagsmessungen sowie Messungen der Konzentrationen im Straßenabflusswasser [Bast, 2010], [Bast, 2011]. Es wurden drei Autobahnen ausgewählt, die jeweils etwa mit 70.000 DTV belastet waren. Die Autobahnen unterschieden sich hinsichtlich der Windausrichtung, der Anzahl der Fahrspuren, der baulichen Randbedingungen (nur Standstreifen oder Lärmschutzwand), des LKW-Anteils sowie des Verkehrsverhaltens (Aus- und Einfahrt von Parkplatz). Straßenabflusswasser wurde von Februar bis Dezember 2009 an den **Autobahnen A 555 bei Bonn** (5,4 % LKW) und **A 61 nahe Meckenheimer Kreuz** (19,8 % LKW) gesammelt und beprobt. Der Mittelwert daraus betrug 202 mg/l AFS. Der AFS wurde mittels eines Papierfilters mit 4 bis 7 µm Porenweite gemessen. Der Staubniederschlag wurde an verschiedenen Stellen und Höhen gemessen, zum einen in Bodennähe, zum anderen in 1,5 m Höhe, jeweils 1 bis maximal 150 m vom Fahrbahnrand entfernt. Der Mittelwert der Staubniederschlagsmessungen an oben genannten Autobahnen in 1 m Entfernung und 1,5 m Höhe betrug 732 g/(m<sup>2</sup>·d). Die A 61 verläuft an der Messstelle 4-spurig. Es befinden sich dort eine Ein- und Ausfahrt zu einem Parkplatz. Die Autobahn A 555 verläuft sechsspurig. Beide Autobahnen verfügen über Standstreifen.

Vom 4. Quartal 2011 bis zum 3. Quartal 2012 beprobten [Groteshusmann et al., 2013] intensiv die Abflüsse von drei Autobahnen in Niedersachsen bzw. Baden-Württemberg. Der Abflussbeiwert wurde mit  $\psi = 0,9$  angegeben.

Der erste Standort war in **Sinsheim-Steinfurt an der A6** mit 85.600 DTV. Die 6-spurige Asphaltfahrbahn wurde erst 2007 erneuert. Die Autobahn an der Stelle verfügt über Seitenstreifen. In unmittelbarer Nähe ist keine Baumvegetation vorhanden. Eine Autobahnfläche von einer Ausdehnung von 27,5 m<sup>2</sup> wurde beprobt. Die Nieder-

schläge im Untersuchungszeitraum vom 4. Quartal 2011 bis zum 3. Quartal 2012 betragen 535 mm. 80,5 % des gesamten Abflusses wurde beprobt. Der abflussgewichtete Mittelwert der Proben betrug 385 mg/l AFS und 177 mg/l PM63.

Die **A7** mit 66.200 DTV wurde in der Nähe von **Großburgwedel** auf einer Fläche von 28 m<sup>2</sup> beprobt. Die Fahrbahn ist sechsspurig mit Seitenstreifen und besteht aus Beton. An der gegenüberliegenden Seite der Messstelle befindet sich eine Lärmschutzwand. Jenseits der Lärmschutzwand befinden sich einige Bäume. Im Messzeitraum fielen 471 mm Niederschläge. 61% der gesamten Abflüsse wurde erfasst. Als abflussgewichteter Mittelwert ergaben sich 500 mg/l AFS und 62 mg/l PM63.

Der dritte Standort befand sich **nahe Hannover bei Kirchhorst** an der **A37**. Die Autobahn ist mit 45.000 DTV belastet. Die Autobahn ist vierspurig mit Seitenstreifen ausgebaut. Die Oberfläche besteht aus Asphalt, 27,2 m<sup>2</sup> wurden beprobt. Die Baumvegetation in unmittelbarer Nähe ist nahezu geschlossen. Es fielen 454 mm Niederschlag im einjährigen Messzeitraum, vom Niederschlagsabfluss wurden 72,3 % beprobt. Der abflussgewichtete Mittelwert der Proben betrug 309 mg/l AFS und 100 mg/l PM63.

Das Straßenwasser der drei Autobahnen wurde im freien Gefälle in einen Sammelbehälter mit einem Volumen von 885 l geleitet und daraus Mischproben aus maximal 30 Tagen gewonnen. Die Beprobung fand getrennt nach Überstandswasser und Sediment statt. Die Proben wurden eingefroren und anschließend zu Quartalsproben wieder zusammengemischt. Der PM63 wurde nach Zerkleinerung der aufgetauten Probe mittels Dispergierer ermittelt. Ein möglicher Überlauf aus Überfüllung wurde in einem nachgeschalteten Regenfass mengenmäßig erfasst, aber nicht analysiert. In der geschlossenen Sammelrinne wurde eine starke Vorsedimentation festgestellt und ab Quartal 1/12 mitbeprobt. Da das Hauptziel der Untersuchungen sich auf organische Schadstoffe bezog, wurden Sand, Kies, grobe Vegetationsreste und Straßenmüll nicht mitbeprobt. Aus diesem Grund wird im Schlussbericht auch nur der feine Anteil aus der Sammelrinne zur Berechnung des AFS-Gehaltes berücksichtigt. In den in der Tabelle 4-3 angegebenen Werten (berechnet aus Feststofffracht und Probenvolumen) sind auch die groben Anteile mit berücksichtigt.

*Autobahnabflüsse weisen trotz höherer Verkehrsbelastung ähnliche AFS<sub>ges</sub>-Konzentrationen wie Straßenabflüsse von im (Jahres-)mittel 40 bis nahezu 700 mg/l auf.*

*Eine im Vergleich zu Stadt-oder Landstraßen ruhigere Fahrweise, der höhere Anteil an Verwehen und Verspritzen und die größere Straßenfläche je DTV können Begründungen dafür sein.*

*PM63-Werte wurden in drei Studien mit 62 bis 177 mg/l im Jahresmittel gemessen.*

### 4.2.1.3 Parkplatzabflüsse

Parkplätze unterliegen der Besonderheit des weitgehend ruhenden Verkehrs. Die Kurzbeschreibung sowie Ergebnisse von Messprogrammen sind chronologisch in Tabelle 4-4 dargestellt.

Tabelle 4-4: AFS<sub>ges</sub> in [mg/l] aus unterschiedlichen Messprogrammen an Parkplätzen

| Beschreibung   | AFS <sub>ges</sub> [mg/l] <sup>1)</sup>  | Jahr der Untersuchung                | Quelle                        |
|--|--|--------------------------------------|-------------------------------|
| USA, Madison, geometrische Mittelwerte; Messkampagne Mai bis Juli<br>Gewerbegebiet, 1 Standort, n= 1<br>Industriegebiet, 3 Standorte, n = 3  | <b>58</b><br><b>312</b>  | 1991                                 | Bannermann et al., 1993       |
| USA, Long Beach, Kalifornien, Gewerbegebiet, 150 Stellplätze, Asphalt, 100 DTV, simulierte Regenereignisse, 3 Monate im Sommer, 24 Messstationen, 155 Proben                                 | <b>36</b><br>(9 bis 83)  | 2000                                 | Tiefenthaler et al., 2001     |
| USA, Cookeville, Tennessee<br>PP 1: 635 Stellplätze, 2,4 ha, DTV 76, n = 7;<br>PP 2: 105 Stellplätze. 0,1 ha, DTV 28, n = 6, abflussgewichtete Mittelwerte                                   | <b>PP 1: 64</b><br>(15 bis 124)<br><b>PP 2: 42</b><br>(2 bis 91)                           | 2 bis 7/2001, überwiegend im Februar | Neary et al., 2002            |
| D, 2 stark frequentierte Parkplätze (Tank- und Rastanlagen) in Niedersachsen, n = ca. 40, ein Jahr lang, gesamte Parkplatzfläche, die über Kanal gefasst wird, abflussgewichteter Mittelwert | Garbsen Nord:<br>LKW: <b>112</b><br>PKW: <b>65</b><br>Allertal West:<br>LKW/PKW: <b>92</b> | 2001                                 | Grotehusmann u. Kasting, 2002 |
| USA, South Carolina, Uniparkplatz; 1.250 m <sup>2</sup> , 23 Stellplätze, n = 20, abflussgewichteter Mittelwert  | <b>86</b><br>(0 bis 331)   | 10/2006 bis 7/2007                   | McQueen, 2008                 |
| USA, South Carolina, Uniparkplatz; 6.400 m <sup>2</sup> , 189 Stellplätzen, n = 16, abflussgewichteter Mittelwert  | <b>44</b><br>(0 bis 199)   | 10/2006 bis 7/2007                   | McQueen, 2008                 |
| Australien, Melbourne, Parkdeck Clayton-Universität, 4.500 m <sup>2</sup> , n = 17, abflussgewichteter Mittelwert  | <b>76</b>  | 1 bis 11/2007                        | Hatt et al., 2009             |
| Korea, Asphaltparkplatz, A = 10.700 m <sup>2</sup> , n = 22 in zwei Jahren, abflussgewichteter Mittelwert, Werte abgelesen   | <b>50</b><br>(ca. 30 bis 80)   | 6/2006 bis 10/2008                   | Maniquiz et al., 2010         |
| A, Innsbruck, Supermarktparkplatz, arithmetischer Mittelwert, Sammelproben von je 1 Woche, n = 7, April bis August, teilweise Überlaufen der Sammelgefäße                                    | <b>68</b><br>(7 bis 210)   | 2010                                 | Engelhard et al., 2012        |

<sup>1)</sup> Zahl in Klammern: Konzentrationsbereich der Einzelwerte

In der in Kap. 4.2.1.1 beschriebenen Messkampagne von [Bannermann et al., 1993] in **Madison, USA**, wurden auch **Parkplätze in Gewerbe- und Industriegebieten** beprobt. Im Gewerbegebiet wurde ein Parkplatz einmal beprobt, im Industriegebiet drei Parkplätze während je drei Regenereignissen.

[Tiefenthaler et al., 2001] untersuchten die Niederschlagsabflüsse eines **Parkplatzes in Long Beach, Kalifornien**, mit 150 Stellplätzen und einer Verkehrsbelastung von 100 DTV ausführlich anhand von simulierten Regenereignissen. Die Regenintensität und Dauer, die Dauer der Trockenperioden, die Reinigungsintensität wurden variiert und es wurde an hoch- und niedrigfrequentierten Plätzen gemessen. Der Gesamtmittelwert aller 155 Proben betrug 36 mg/l AFS<sub>ges</sub> (Filterporenweite 1,2 µm), wobei die Bestimmung des Mittelwertes nicht näher erläutert wurde. Die einzelnen Proben schwankten zwischen 9 und 83 mg/l.

Zwei **Parkplätze in Cookeville, Tennessee, USA**, wurden von Februar bis Juli 2001 beprobt [Neary, et al, 2002]. Der größere Parkplatz umfasst 2,4 ha, hat 635 Stellplätze und wird durchschnittlich mit 76 Fahrzeugen frequentiert. Der kleinere Parkplatz hat 0,1 ha mit 105 Parkplätzen und einer Fahrzeugfrequenz von 28 DTV. Der Mittelwert des größeren Parkplatzes betrug 64 mg/l in 7 Niederschlagsereignissen, die von denen 4 im Februar und 3 im Juni/Juli beprobt wurden, im Mittelwert des kleineren Parkplatzes wurden 41,5 mg/l in sechs Niederschlagsereignissen (vier im Februar und 2 im Juni) gefunden. Die Jahresniederschläge in Tennessee liegen mit etwa 1200 mm/a höher als das langjährige Mittel in Deutschland, im Februar im Durchschnitt bei 97 mm und im Juni bei 90 mm. Die Frostperiode reicht von Dezember bis Februar.

Die Beschaffenheit der Oberflächenabflüsse von **Parkflächen an zwei Autobahn-Tank- und Rastanlagen in Niedersachsen** wurde ein gesamtes Jahr lang von [Grotehusmann und Kasting, 2002] beprobt. Die Abflüsse der gesamten Parkflächen werden in Kanälen gesammelt und einer Behandlung zugeführt. Im Parkplatz der Raststätte Garbsen Nord konnten die LKW- und PKW-Parkplätze getrennt erfasst werden. Die Anzahl der erfassten Regenereignisse betrug n = 40 bis 43. Dargestellt ist der abflussgewichtete Mittelwert. Auffällig ist, dass von den 44 LKW-Stellplätzen mit 112 mg/l fast doppelt so viel Feststoffe in die Niederschlagsabflüsse gelangen als von den PKW-Parkplätzen mit 65 mg/l. Im Parkplatz Allertal West werden LKW- und PKW-Stellflächen zusammen geführt. Der abflussgewichtete Mittelwert dort betrug 92 mg/l.

[McQueen, 2008] beprobte **zwei Parkplätze in South Carolina** jeweils 10 Monate lang von Oktober bis Juli und fand im abflussgewichteten Mittel 86 bzw. 44 mg/l. Die Spannweiten der Ergebnisse waren sehr weit von null bis über 300 bzw. 200 mg/l.

Der Parkplatzabfluss eines **Parkdecks mit 4.500 m<sup>2</sup> an der Clayton-Universität in Melbourne** wurde von Januar bis November 2007 in 17 Niederschlagsereignissen beprobt. Der AFS-Mittelwert betrug 76 mg/l [Hatt et al., 2009]. Die mittlere jährliche Niederschlagshöhe in Melbourne beträgt 655 mm/a.

Ein in **Korea** gelegener **asphaltierter Parkplatz** (10.700 m<sup>2</sup>) wurde zwei Jahre lang beprobt. In 22 Niederschlagsereignissen wurden im abflussgewichteten Mittelwert 50 mg/l AFS<sub>ges</sub> gefunden. Der geringe Wert wurde mit den klimatischen Bedingungen begründet [Maniquiz, 2010].

In einer **österreichischen** Studie wurde die Leistungsfähigkeit der Muldenversickerung von **Parkplätzen** untersucht. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden während der Sommermonate einige Zulaufproben untersucht. Die Proben wurden wöchentlich gesammelt und als Mischprobe analysiert, so dass ein Überlaufen der Sammelgefäße möglich war, was tendenziell zu höheren Zulaufwerten, im Mittel von 68 mg/l, führte [Engelhard et al., 2012].

*Parkplatzabflüsse sind aufgrund der geringeren DTV meistens gering, mit unter 90 mg/l AFS (36 bis 86 mg/l) belastet.*

*Ausnahmen stellen LKW-Parkplätze dar, die geringfügig höher belastet sind (112 mg/l).*

#### 4.2.2 Dachabflüsse

Im Folgenden werden einige gut dokumentierte Messreihen in Dachabflüssen chronologisch dargestellt, vgl. Tabelle 4-5.

In Bild 4-4 sind die Ergebnisse einer sehr gut dokumentierten Messkampagne an 15 sehr unterschiedlichen Dächern (Wohnhäuser, Garagen, Industriebauten, Gewächshäuser) in **Hamburg** dargestellt. Insgesamt wurden acht Regenereignisse beprobt, drei im April, zwei im Mai, eines im Juli und zwei im Oktober. Über die monatlichen durchschnittlichen Niederschläge lässt sich daraus ein durchschnittlicher Jahresniederschlag von 670 mm/a hochrechnen.

Es ist zu erkennen, dass die wenig belasteten Dächer eine mittlere AFS<sub>ges</sub>-Konzentration von etwa 20 mg/l aufweisen. Bei sechs Dächern war ein einziges Ereignis Ende April dafür verantwortlich, dass der Mittelwert extrem anstieg, erkennbar auch am viel niedrigeren Median. Die Durchsicht der Daten ergab, dass gleichzeitig die organische Belastung (Glühverlust, BSB<sub>5</sub>) sowie Gesamt-N und -P erhöht waren. Daher wird vermutet, dass es sich um eine Belastung durch Pollen handelte. Die DTV scheint den AFS-Gehalt im Dachabfluss nicht wesentlich zu beeinflussen, auch bei Dächern in unmittelbarer Nähe zu stark belasteten Straßen lagen die meisten Mittelwerte bei etwas über 20 bis 40 mg/l. Bei den Dächern, deren Mittelwerte über 40 bis etwa 70 mg/l (ohne durch Extremereignis beeinflusste Abflüsse) betragen, konnten Belastungsquellen wie eine Affinerie oder ein Kraftwerk in der Nähe identifiziert werden.



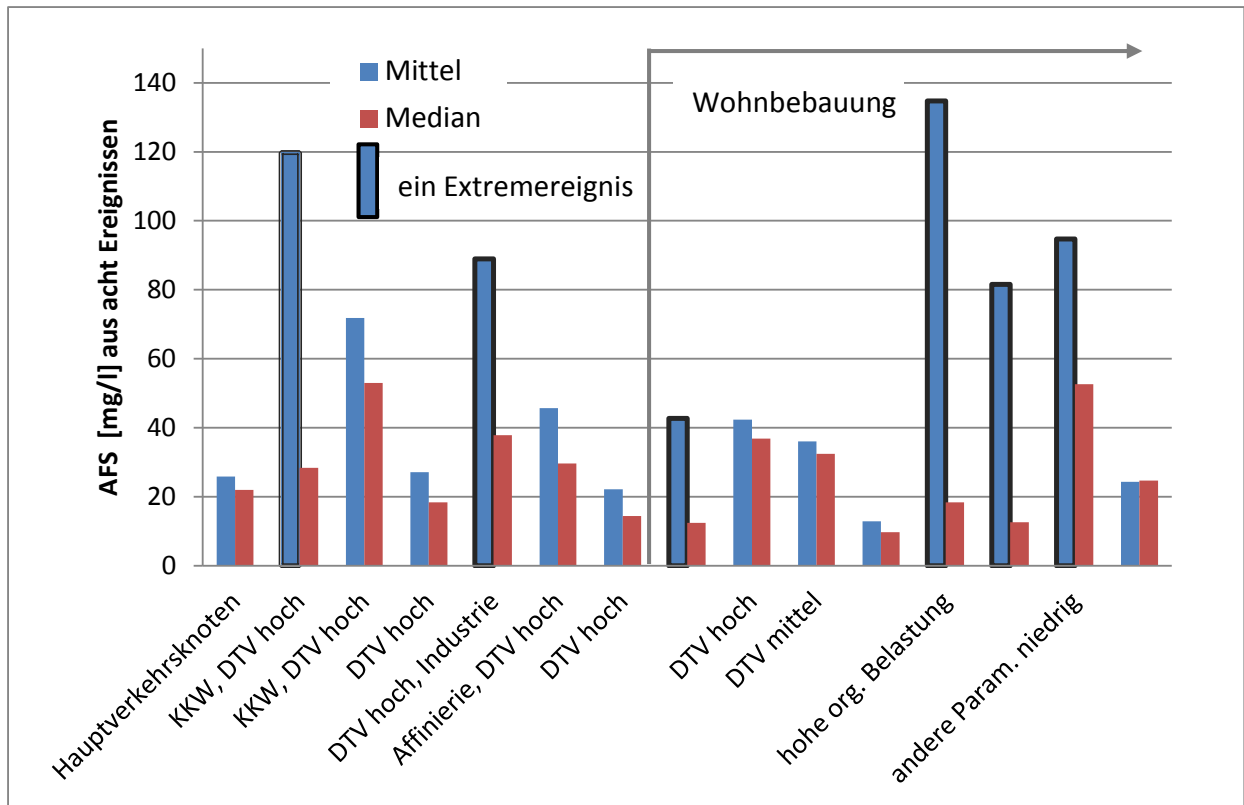


Bild 4-4: AFS<sub>ges</sub> in Dachabflüssen in Hamburg; n = 8, 1 Jahr, ein Extremereignis am 6.4.1987 (Pollen?), Werte aus [Büchner und Opfermann, 1989]  
KKW: Kohlekraftwerk

Tabelle 4-5: AFS<sub>ges</sub> in [mg/l] aus unterschiedlichen Messprogrammen an Dachabflüssen

| Beschreibung  | AFS <sub>ges</sub> [mg/l] <sup>1)</sup>                                 | Jahr der Untersuchung | Quelle                      |
|---|---|-----------------------|-----------------------------|
| D, Hamburg, 15 unterschiedliche Dächer mit unterschiedlichen Belastungen und Kenngrößen, 1 Jahr, n = 8, N = 670 mm/a (hochgerechnet aus Niederschlägen im Untersuchungszeitraum), arithmetischer Mittelwert | <b>60</b><br>(17 bis 173 Mittelwert Dach)<br>(2,8 bis 948 Einzelproben) | 4/1987 bis 4/1988     | Büchner und Opfermann, 1989 |
| Australien, 2 Dächer in industriell genutztem Gebiet, n = 8, N = 590 mm   | Galvanisiertes Eisendach: <b>33</b><br>Betonziegel: <b>82</b>           | 4/1991 bis 8/1991     | Thomas und Greene, 1993     |
| USA, Madison, 9 Dächer in 3 verschiedenen Gebieten, n = 1 bis 3, geometrischer Mittelwerte  | <b>30</b><br>(15 bis 41)  | 5/1991 bis 7/1991     | Bannermann et al., 1993     |

<sup>1)</sup> Zahl in Klammern: Konzentrationsbereich der Einzelwerte

Fortsetzung Tabelle 4-5: AFS<sub>ges</sub> in [mg/l] aus unterschiedlichen Messprogrammen an Dachabflüssen

| Beschreibung   | AFS <sub>ges</sub> [mg/l] <sup>1)</sup>   | Jahr der Untersuchung                 | Quelle   |
|--|---|---------------------------------------|--|
| D, Bayreuth, arithmetischer Mittelwert von 3 Studien an jeweils mehreren Dächern (4/5/10) mit unterschiedlichen Materialien (ohne Kiesdächer), verschiedene Standorte, n = 2/11/15 | <b>31</b><br>(0,3 bis 103)  | 1988,<br>1990/91,<br>1992 bis<br>1994 | Förster, 1990;<br>Förster und<br>Hermann, 1996;<br>Förster, 1998 |
| CH, Zürich, Vorort, n = 14, überwiegend im Sommer  | Ziegel: <b>64</b><br>Polyester: <b>18</b>   | 1994/1995                             | Zobrist et al.,<br>2000  |
| Paris, Stadtteil Marais. 11 Dächer mit unterschiedlichen Materialien (Zink, Schiefer, Dachziegel) und Dachrinnen, n = ca. 30   | 17 (Median)   | 10 Monate,<br>1994                    | Gromaire et al.,<br>2001   |
| F, Paris, Stadtteil Marais. 4 Dächer mit unterschiedlichen Materialien (Zink, Schiefer, Dachziegel) n = 16   | 29 (Median)<br>(3 bis 304)  | 7/1996 bis<br>5/1997                  | Gromaire-Mertz<br>et al., 1999                                   |
| A, Graz, Dach im Stadtzentrum, Aluminiumblech, Dachhöhe ca. 8 m, n = 9, 3 Monate, N = 195 mm, abflussgewichteter Mittelwert  | <b>35</b><br>(10 bis 106)   | 5/2002 bis<br>7/2002                  | Kobencic, 2002   |
| D, Garching bei München, Zinkdach an der TU, n = 15, N = 252 mm während der Probennahmezeit, arithmetischer Mittelwert   | <b>19</b><br>(2 bis 47)   | 6/2002 bis<br>8/2002                  | Athanasiadis,<br>2005  |
| D, München, Akademie, Kupferdach, Dachhöhe = 26 m, vier Probennahmestellen, 3 Monate   | <b>3</b>  | 3/2004 bis<br>5/2004                  | Athanasiadis et<br>al., 2006                                     |
| F, Nantes, 4 Dächer mit unterschiedlichen Materialien (Bitumen, Dachziegel, Zinkblech, Schiefer), wöchentliche Probensammlung  | <b>5</b> (Mittelwert<br>der Mediane)<br>(1 bis 38)  | 8/2007 bis<br>12/2007                 | Lamprea und<br>Ruban, 2008                                       |
| D, Darmstadt-Eberstadt, Dach in ländlicher Umgebung, 2 Monate im Sommer, abflussgewichteter Mittelwert, n = 24, pollenbeeinflusst  | pollenbelastet:<br><b>52</b> (5 bis 282)<br>PM63: <b>23</b> (2 bis<br>113)<br>ohne Pollen:<br><b>12,8</b> (6 bis 21)<br>PM63: <b>0,8</b> (0,7<br>bis 1) | 4 bis 5/2012                          | Kreiling, 2012   |

<sup>1)</sup> Zahl in Klammern: Konzentrationsbereich der Einzelwerte

[Thomas und Greene, 1993] untersuchten zwei Dachabflüsse (n = 8) in einem Industriegebiet in **Australien**, vermutlich in der Nähe von Armidale, New England, von April bis August 1991. Im galvanisierten Eisendach wurden im Mittel 33 mg/l gefunden, in einem Betonziegeldach 82 mg/l.

In **Madison, USA**, wurden insgesamt 9 Dächer in 3 verschiedenen Siedlungsgebieten (Wohngebiet, Industriegebiet) in einem bis drei Regenereignissen zwischen Mai und Juli 1991 beprobt [Bannermann et al., 1993]. Das Ergebnis von 29,7 mg/l stellt somit einen Querschnitt verschiedener Dachtypen und aus verschiedenen Herkunftsgebieten dar.

In den 90er Jahren wurden in **Bayreuth** zahlreiche Studien durchgeführt, u.a. von [Förster, 1990]; [Förster und Hermann, 1996]; [Förster, 1998]. Neben dem Einfluss verschiedener Dachmaterialien (Ziegel, Teerpappe, Zinkblech, Eternit, Betonsteine) und Standorte wurden der Einfluss der Jahreszeit, Spülstoßeffekte, der Einfluss der Dauer der Trockenperiode und weitere Faktoren untersucht. Der nach Anzahl der Regenereignisse (2 bis 15) und Dächer gewichtete Mittelwert aus allen drei Studien betrug 30,6 mg/l AFS<sub>ges</sub>. Kiesdächer wurden nicht berücksichtigt.

In dem **Züricher Vorort Tüffenwies** wurden drei Dächer zwei Jahre lang vorwiegend im Sommer in 14 Regenereignissen beprobt [Zobrist et al., 2000]. Die Dächer wiesen unterschiedliche Materialien auf, Dachziegel, Polyesterbeschichtung sowie Kiesbelag. Die Filtration der Proben erfolgte über einen 0,45 µm-Filter. Im Niederschlagsabfluss des Ziegeldaches wurden im Mittel 64 mg/l, im polyesterbeschichteten Dach 18 mg/l an Feststoffen gemessen. Im Kiesdach fand eine Retention der Inhaltsstoffe statt, hier betrug der Mittelwert nur 3 mg/l.

In einer umfassenden Studie im **Stadtteil Marais in Paris** mit 42 ha wurden 11 Dächer 10 Monate lang im Jahr 1994 umfassend (n = ca. 30) beprobt. Die Dächer (Zink, Dachziegel, Schiefer) und Dachrinnen (Zink, Kupfer, Blei) hatten unterschiedliche Materialien. Es wurde kein großer Unterschied in der Feststoffbelastung der Dächer festgestellt. Der Median aller Proben lag bei 17 mg/l [Gromaire et al., 2001]. Eine weitere Studie im gleichen Stadtgebiet an vier Dächern im Jahr 1996/97 mit n = 16 ergab einen Median von 29 mg/l mit einem Bereich von 3 bis 304 mg/l [Gromaire-Mertz et al., 1999].

Eine von Mai bis Juli 2002 (h<sub>N</sub> = 195 mm) durchgeführte Messkampagne an einem Aluminiumblechdach in der Stadtmitte von **Graz** (Universität) [Kobencic, 2002] ergab einen abflussgewichteten Mittelwert aus allen Werten von ca. 35 mg/l. Neun Regenereignisse wurden erfasst.

In der Kleinstadt **Garching** nördlich von München wurde ein Zinkdach an der TU (die wiederum außerhalb von Garching liegt) drei Monate lang in 15 Regenereignissen beprobt [Athanasiadis, 2005]. Der Niederschlag während der Zeit betrug 252 mm. Der AFS-Mittelwert (arithmetisch) betrug 19 mg/l, die einzelnen Ereignisse lagen zwischen 2 und 47 mg/l.

Der arithmetische Mittelwert des Dachabflusses eines Kupferdachs an der Akademie in **München** aus vier Probennahmestellen im Messzeitraum März bis Mai 2004 betrug zwischen 1,1 und 4,2 mg/l AFS<sub>ges</sub> [Athanasiadis et al., 2006]. Begründet wurde der geringe Wert mit der hohen Lage des Dachs in 26 m Höhe.

In **Nantes** wurden vier Dächer mit unterschiedlichen Dachmaterialien (Bitumen, Dachziegel, Zinkblech und Schiefer) von August bis Dezember 2007 beprobt [Lamprea und Ruban, 2008]. Es wurden wöchentlich Sammelproben analysiert. Die Feststoffkonzentrationen lagen zwischen 1 und 38 mg/l. Die von Juli bis September 2007 gemessene Feststoffbelastung in bulk-Gefäßen zur Staubbiederschlagsmessung (1,5 m über dem Boden) lag mit 23 bis 47 mg/l etwas höher. Die Mediane im Dachabfluss lagen zwischen 3 und 7,7 mg/l, wobei das Bitumenflachdach die größte Konzentration aufwies.

[Kreiling, 2012] fand im pollenbelasteten Dachabfluss im ländlichen **Darmstadt-Eberstadt** während einer zweimonatigen Messkampagne (n = 24) im abflussgewichteten Mittel 52 mg/l AFS<sub>ges</sub> und 23 mg/l PM<sub>63</sub>. Die Schwankungen in den Einzelproben war abhängig von der vorangegangenen Trockenperiode und Windverhältnissen enorm, die Spannweite des AFS<sub>ges</sub> reichte von 5 bis 282 mg/l, der Median lag bei 29 mg/l, der 90%-Wert bei 120 mg/l. Beim PM<sub>63</sub> lag der Bereich von 1 bis 113 mg/l, der Median lag bei 7,5 mg/l, der 90%-Wert bei 32 mg/l. Drei Proben wurden aufgrund der Färbung als nicht pollenbelastet identifiziert, hier lag der AFS<sub>ges</sub> bei 6 bis 21 mg/l und der PM<sub>63</sub> bei etwa 1 mg/l. Der Niederschlag betrug 92 mm in zwei Monaten.

In Bild 4-5 sind die AFS<sub>ges</sub>-Ergebnisse der beschriebenen Messkampagnen in verschiedenen Städten dargestellt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die meisten Dachabflüsse mittlere AFS<sub>ges</sub>-Gehalte zwischen etwa 20 und 40 mg/l aufweisen. Besonders hohe oder niedrige Werte lassen sich folgendermaßen begründen:

- In Hamburg beeinflusst ein Ereignis von insgesamt acht mit vermutlich Pollenbelastung und vorangehender längerer Trockenperiode das Ergebnis. Die höher belasteten Abflüsse stammen von Dächern in von Industrie belasteter Umgebung.
- Die Feststoffkonzentration im Dachabfluss der Akademie in München ist niedrig, da das Dach mit 26 m sehr hoch liegt und kaum mit Staub und Pollen belastet wird. Dachabrieb ist aufgrund des vorhandenen Materials (Kupfer) nicht vorhanden.
- Der Dachabfluss in Darmstadt-Eberstadt war pollenbelastet. Die Proben wiesen eine Gelbfärbung auf und die organische Belastung war hoch, siehe auch Bild 3-8. Nicht mit Pollen belastet Proben enthielten nur 6 bis 21 mg/l AFS<sub>ges</sub>.

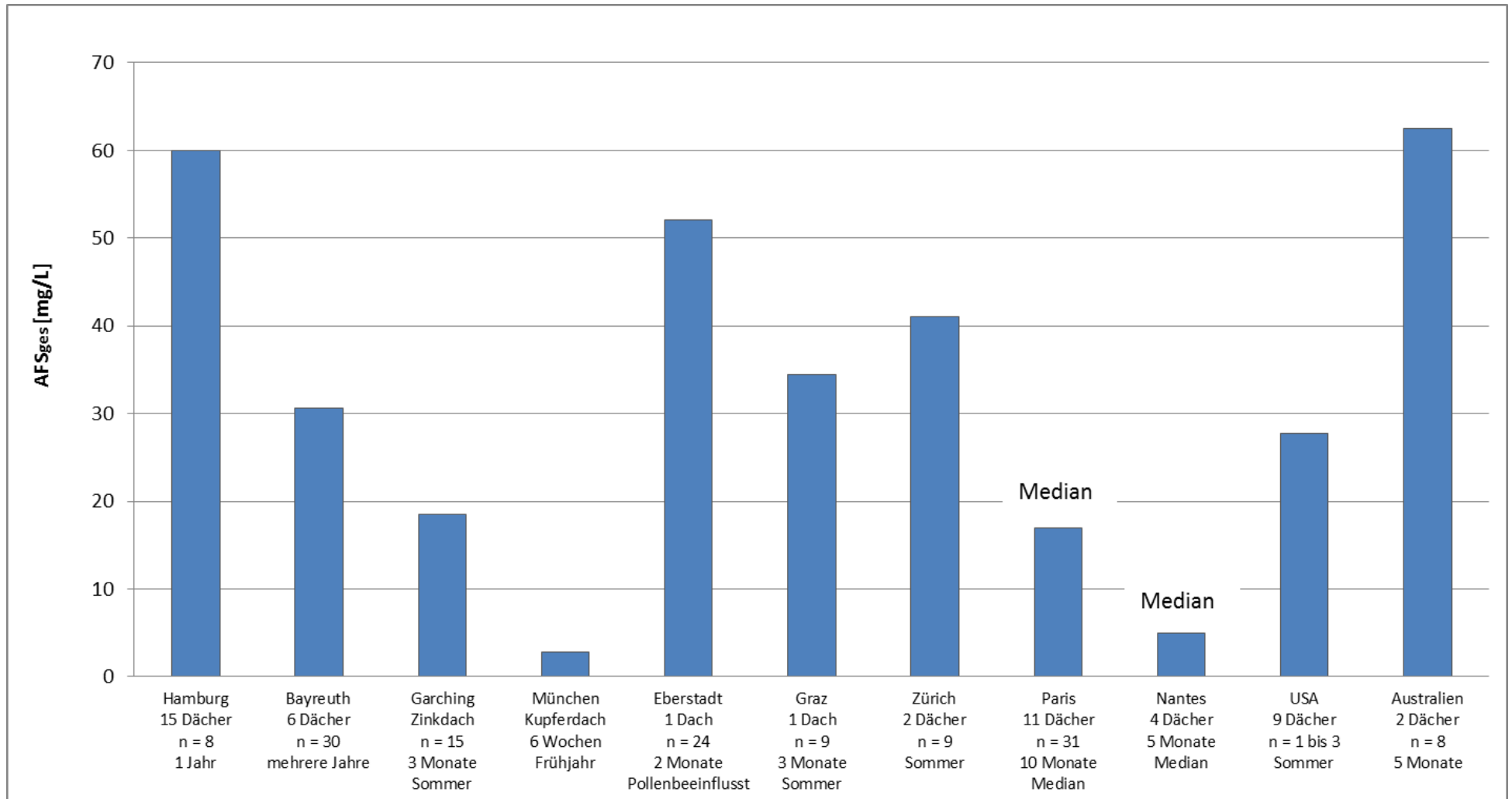


Bild 4-5: AFS<sub>ges</sub> in Dachabflüssen verschiedener Städte, aus [Dierschke und Welker, 2013]  
 Hamburg: [Büchner und Opfermann, 1989], Bayreuth: [Förster, 1990]; [Förster und Herrmann, 1996], [Förster, 1998], Garching: [Athanasiadis, 2005], Eberstadt: [Kreiling, 2012]; Graz: [Kobencic, 2002], Zürich: [Zobrist et al., 2000], Paris: [Gromaire et al., 2001], Nantes: [Lamprea und Ruban, 2008]; USA: [Bannermann et al., 1993]; Australien: [Thomas und Green, 1993]

- In Paris und Nantes wurden nur Mediane angegeben, der Mittelwert dürfte erfahrungsgemäß höher liegen, wie weiter oben bereits beschrieben wurde.
- Die Straßen in Paris werden täglich gespült, so dass die Staubbelastung reduziert wird. Die Dächer liegen vermutlich ähnlich hoch wie in München, im Marais sind fünf bis sechs Stockwerke üblich, so dass die Staub- und Pollenbelastung niedrig ist. In Bild 4-6 ist eine typische Straße im Marais abgebildet. In einer zwei Jahre später durchgeführten Studie in Paris-Marais an vier Dächern wurde ein Median mit 29 mg/l ermittelt [Gromaire-Mertz et al., 1999].



Bild 4-6: Typische Straße im Marais, Paris

- Die hohen Feststoffkonzentrationen der Studie aus Australien lassen sich mit der industriellen Nutzung im Einzugsgebiet und dem verstärktem Abrieb von Betondachziegeln erklären.

*Wenig belastete Dächer weisen einen AFS<sub>ges</sub>-Dachabfluss von 20 bis ca. 30 mg/l auf.*

*Pollen, Staubdepositionen aus Industrie und Verbrennungsprozessen (Kraftwerke) sowie Dachabrieb können den Feststoffgehalt erhöhen bis etwa 60 mg/l im Jahresmittel.*

*Je höher ein Dach liegt, desto weniger wird es mit Feststoffen aus dem Staubbiederschlag belastet.*

*Der Anteil an PM<sub>63</sub> in Dachabflüssen ist noch offen, hier liegt nur eine einzige Untersuchung während der pollenbelasteten Zeit vor. Der PM<sub>63</sub>-Anteil im Dachabfluss lag hier bei 44% [Kreiling, 2012]. Da Staubbiederschläge oft der Haupteintragspfad von AFS in Dachabflüssen sind, und deren Anteil an PM<sub>63</sub> auf etwa 80% geschätzt wird, liegt der **PM<sub>63</sub>-Anteil im Dachabfluss vermutlich im Bereich von 45 bis 80%**.*

### 4.2.3 Trenngebietsabflüsse

Trenngebietsabflüsse sind abhängig von der Größe, Nutzung und den Anteilen einzelnen Flächenarten (Verkehrsflächen, Dächer etc.) sehr unterschiedlich mit Feststoffen belastet.

[Fuchs et al., 2010b] werteten zahlreiche Messdaten zu AFS-Konzentrationen im Regenabfluss unterschiedlicher Einzugsgebiete auf der Basis von Untersuchungen von [Brombach und Fuchs, 2002] aus, siehe Bild 4-7. Danach bewegen sich die ermittelten AFS<sub>ges</sub>-Konzentrationen von etwa 15 bis über 2.000 mg/l.

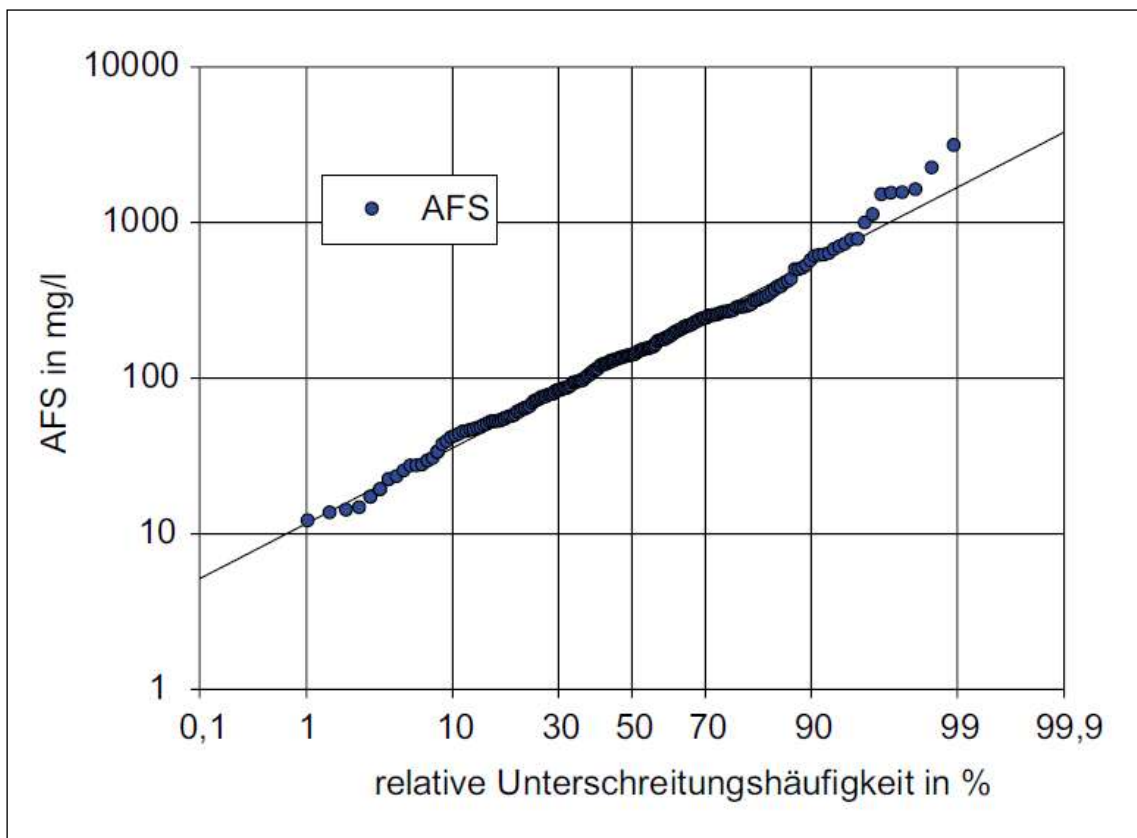


Bild 4-7: Messdaten zu AFS<sub>ges</sub>-Konzentrationen im Regenfluss, [Fuchs et al, 2010b]; erweitert auf der Grundlage der Daten von [Brombach und Fuchs, 2002]

[Eyckmanns-Wolters et al., 2012] stellten in Untersuchungen aus Einzugsgebieten in **Berlin und Baden-Württemberg** fest, dass die Konzentrationen an PM<sub>63</sub> in einem engen Bereich von 60 bis 100 mg/l liegen, wohingegen grobes Material in einer Konzentration zwischen 0 und 10.000 mg/l schwanken kann. Sehr hohe Feststoffkonzentrationen treten vor allem in kleinen Einzugsgebieten auf, wie sie z.B. Straßenabschnitte darstellen, in denen Retentionsprozesse von untergeordneter Bedeutung sind. Die Feinfraktion ist meistens hochbelastet und schwer absetzbar, die Grobfraktion dagegen wenig belastet und leicht absetzbar. Ausnahmen stellen Gebiete mit hohem Vegetationsbestand dar, hier können organische Grobfraktionen auftreten, die schwer absetzbar sind und sich durch Abbau- und Zersetzungs Vorgänge im Verlauf der Zeit in Feinanteile umwandeln können.



Weitere Messprogramme sind in Tabelle 4-6 zusammengefasst und werden nachfolgend beschrieben.

Tabelle 4-6: AFS<sub>ges</sub> in [mg/l] aus unterschiedlichen Messprogrammen in Trenngebieten

| Beschreibung   | AFS <sub>ges</sub> [mg/l] <sup>1)</sup>  | Jahr der Untersuchungs   | Quelle                    |
|--|--|--|---------------------------|
| D, Karlsruhe, Trenngebiet, A <sub>E</sub> = 180 ha, A <sub>b</sub> = 67,5 ha, davon 34% Verkehrsflächen, 66% Dach- und Hofflächen;<br>Arithmetischer Mittelwert von 188 Stichproben aus n = 20 | <b>52</b><br>(5 – 321)   | 1992 - 1993  | Pfeifer, 1998             |
| CH, Lausanne und Genf, insgesamt 5 Trenngebiete, (Gewerbe- und Wohngebiete), ein Jahr, n = ca. 20, A <sub>u</sub> = 1,7 bis 5,7 ha, $\psi$ = 0,24 bis 0,45, abflussgewichteter Mittelwert      | <b>64/ 88/ 67/ 182/ 100</b>  | 1994 - 1995  | Rossi et al., 1997        |
| D, Hamburg, Mischgebiet, Straßen (Halenreie), Parkplätze (Marktplatz), Dachflächen, A <sub>u</sub> = 2,5 ha, $\psi$ = 0,6, n = 19, arithmetischer Mittelwert                                   | <b>136</b><br>(20 – 501)   | 1996 - 1999  | Fitschen, 2000            |
| D, Trenngebiet Bordesholm, A <sub>u</sub> = 12 ha, Wohngebiet, stark befahrene Straße, Gewerbegebiet, n = 5, Probenahme nach Sandfang  | 31 (Median nach Sandfang)  | 6 bis 9/1999   | Schulz, 2001              |
| CH, 127 Regenereignisse in 7 Schweizer Siedlungsgebieten, Auswertung aus drei Veröffentlichungen   | <b>68</b><br>(12 bis 372)  | 1996/2001/2003<br>(Daten wurden in o.g. Jahren veröffentlicht) | Rossi et al., 2004b       |
| D, Berlin, Adlershof, Trenngebiet mit neuen Asphaltstraßen und jungem Baumbestand, A <sub>u</sub> = 80 ha n = 25, abflussgewichtete Probenahme, wöchentliche Straßenreinigung                  | abflussgewichteter: <b>94,5</b><br>arithm. MW: <b>72</b><br>Median: <b>42</b><br>(9 bis 380) | 2006 und 2008  | Grotehusmann et al., 2009 |
| China, Xiamen, 2,5 Mio. Einwohner, 3,26 ha großes Mischgebiet aus Straßen, Dächern, Grünflächen, subtropisches Klima, n = 10   | <b>22</b><br>(5 bis 51)  | 2008 bis 2009  | Huang et al., 2011        |

<sup>1)</sup> Zahl in Klammern: Konzentrationsbereich der Einzelwerte

Fortsetzung Tabelle 4-6: AFS<sub>ges</sub> in [mg/l] aus unterschiedlichen Messprogrammen in Trenngebieten

| Beschreibung  | AFS <sub>ges</sub> [mg/l] <sup>1)</sup>                            | Jahr der Untersuchung | Quelle   |
|---|--|-----------------------|--|
| D, Berlin, Halensee, A <sub>u</sub> = 22,8 ha, $\psi = 0,6$ , Anschluss von Straßen und Autobahnteilstück, n = 5, Probennahme Juli bis Dezember, h <sub>N</sub> = 544 mm/a              | abflussgewichtet : <b>28</b><br>arithm. MW: <b>46</b><br>(21 – 87) | 2009                  | Grotehusmann et al., 2010                        |
| D, Hamburg, Mischgebiet, Straßen (Halenreie, 15.000 DTV), Parkplätze (Marktplatz), Dachflächen, A <sub>u</sub> = 2,5 ha, $\psi = 0,6$ , n = 8, arithmetischer Mittelwert ohne Ausreißer | <b>51,8</b><br>(8 bis 711)   | 2008 bis 2010         | Dobner u. Holthuis 2011<br>Holthuis et al., 2012 |

<sup>1)</sup> Zahl in Klammern: Konzentrationsbereich der Einzelwerte

[Pfeifer, 1998] untersuchte den Stoffrückhalt an einem Regenklärbecken eines Trenngebietes in **Karlsruhe**. Das Trenngebiet umfasst 180 ha, wovon 67,5 ha befestigt sind. Der Verkehrsflächenanteil beträgt 34%, der Dach- und Hofflächenanteil 66%. Die Verkehrsbelastung von zwei Straßen im Einzugsgebiet wurde als hoch bewertet. Der Zulauf wurde etwa ein Jahr lang beprobt. Aus 20 Niederschlagsereignissen wurden 188 zeitgesteuerte Proben (5 bis 321 mg/l) entnommen und daraus der arithmetische Mittelwert (52,1 mg/l) gebildet.

[Rossi et al., 1997] untersuchten ein Jahr lang fünf Trenngebiete in **Lausanne und Genf** mit unterschiedlicher Nutzung (Gewerbegebiet, Wohngebiete). Die Gebiete unterschieden sich außer in der Nutzung und der Lage im Anteil der befestigten Flächen ( $\psi = 0,24$  bis  $0,45$ ). Weitere Nutzungen wie DTV wurden nicht angegeben. Die Anzahl der beprobten Niederschlagsereignisse betrug n = 19 bis 26. Die jährlichen AFS-Konzentrationen betragen zwischen 64 und 182 mg/l, im Mittel 98 mg/l. Der jährliche Niederschlag in Genf und Lausanne beträgt etwa 900 mm.

[Grotehusmann et al., 2009] beprobten den Zulauf eines Retentionsfilterbeckens (RBF) in **Berlin**, Bezirk Treptow-Köpenick, Ortsteil **Adlershof** in den Jahren 2006 und 2008 in insgesamt 25 Regenereignissen. Das Einzugsgebiet besteht aus einem modifizierten Trennsystem, d.h., dass wenig belastete Niederschlagsabflüsse nach einem Sandfang direkt in einen Kanal eingeleitet werden. Die belasteten Abflüsse (A<sub>u</sub> = 45 ha) gelangen in den RBF. Im Endausbau sollen 80 ha A<sub>u</sub> angeschlossen werden. Die angeschlossene Fläche besteht im Wesentlichen aus neu asphaltierten Straßen mit jungem Baumbestand. Es findet eine wöchentliche Straßenreinigung statt. Die Probengewinnung im Jahr 2008 erfolgte in einem Feststoffsammler. Der abflussgewichtete Mittelwert betrug 94,5 mg/l, der arithmetische Mittelwert 72 mg/l und der Median 42 mg/l.

Im **Hamburger Projekt „Pilotanlage Halenreie“** zur Behandlung von Niederschlagsabflüssen wurden in den Jahren 1996 bis 1999 [Fitschen, 2000] und 2008 bis 2010

[Dobner u. Holthuis 2011], [Holthuis et al., 2012] Messungen im Zulauf der Anlage durchgeführt. Das Einzugsgebiet umfasst 4,12 ha mit einem Abflussbeiwert von ca. 0,6. Angeschlossen sind Straßen, darunter eine mit etwa 15.000 DTV belastete Straße, Dachflächen sowie Parkplätze, wovon einer als Marktplatz dient. Die AFS<sub>ges</sub>-Konzentrationen waren sehr schwankend von 20 bis 500 mg/l bzw. 8 bis 711 mg/l. Der arithmetische Mittelwert lag im ersten Untersuchungszeitraum mit 136 mg/l wesentlich höher als im zweiten mit 52 mg/l, wobei hier „Ausreißer“ bei der Berechnung eliminiert und nur acht Niederschlagsereignisse beprobt wurden [Holthuis et al., 2012].

Der Zulauf eines Regenklärbeckens nach dem Sandfang in **Schleswig-Holstein** wurde von Juni bis September 1999 beprobt. Das Trenngebiet umfasst  $A_u = 12$  ha und besteht aus einem Wohngebiet mit stark befahrener Straße, einem Marktplatz, Tankstellen und Gewerbebetrieben. Bodenerosion wird aufgrund der Topografie ausgeschlossen. Der Median aus  $n = 5$  betrug 31 mg/l [Schulz, 2001].

In 127 Regenereignissen aus drei **Schweizer Siedlungsgebieten** (u.a. aus der oben genannten Studie von [Rossi et al., 1997] wurden 12 bis 372 mg/l, im Mittel 68 mg/l AFS<sub>ges</sub> gemessen. Diese Werte sowie die statistische Verteilung dienen als Eingabeparameter für die Modellierung des Transportes aus verschiedenen Entwässerungssystemen und letztlich Risikobewertung für ein Gewässer. Daher sind weitere Angaben zu den Siedlungsgebieten nicht enthalten [Rossi et al. 2004b].

Im Zuge der Inbetriebnahme des RBF **Halensee in Berlin** wurden von Juli bis Dezember 2009 fünf Zulaufproben analysiert [Grotehusmann et al., 2010]. Das Einzugsgebiet umfasst 22,8 ha  $A_u$  bei einem Abflussbeiwert von 0,6. Es sind überwiegend Straßen und ein Autobahnstück angeschlossen. Der Jahresniederschlag wurde mit 544 mm/a angegeben. Der abflussgewichtete Mittelwert betrug 27,8 mg/l, der arithmetische Mittelwert 45,6 mg/l und der Median 38 mg/l.

In einer Untersuchung in **China** wurden in einem 3,3 ha großen Einzugsgebiet innerhalb eines Jahres zehn Proben genommen [Huang et al., 2011]. Das Gebiet liegt in der **2,6 Mio.-Stadt Xiamen** und besteht zu 65% aus Grünflächen, 20% Verkehrsflächen und 15% Dachflächen. Das Klima ist subtropisch mit im Mittel 1.388 mm Niederschlägen jährlich, die zu 80% zwischen April und September fallen. Sieben von zehn Niederschlagsereignissen lagen in dieser Periode, so dass der niedrige Mittelwert von 21,5 mg/l AFS<sub>ges</sub> auf die hohe Verdünnung zurückgeführt werden kann.

*Dier hier dargestellten Trenngebiete wiesen AFS-Mittelwerte von 22 bis 182 mg/l auf. Die jeweiligen Einzelwerte unterlagen großen Schwankungen.*

*Die Anzahl der erfassten Regenereignisse war teilweise sehr gering, im besten Fall  $n = 25$ , teilweise nur  $n = 5$ , so dass die Aussagekraft nicht immer sehr groß war.*

*Die Berliner Studien bestätigten, dass aus den Messwerten gewonnene arithmetische oder abflussgewichtete Mittelwerte stark voneinander abweichen und Mediane immer geringer als Mittelwerte sind.*

## 5 Verifizierung der Berechnungsgleichungen

Die theoretisch ermittelten Formeln werden in den folgenden Kapiteln angewendet und mit Hilfe der in Kapitel 4 beschriebenen gesichteten Studien und Messprogrammen verifiziert. Zusätzlich zu den Beschreibungen in den Studien wurden Satellitenaufnahmen der Örtlichkeiten herangezogen, um z.B. die Anzahl der Fahrspuren, Seitenstreifen, den Vegetationsanteil, mögliche Kreuzungen etc. abschätzen zu können.

### 5.1 Verkehrsflächenabflüsse

Mit Hilfe von Formel 3.1 und 3.4 sowie Tabelle 3-10 können die  $AFS_{ges}$ - und  $PM_{63}$ -Konzentrationen in Verkehrsflächenabflüssen berechnet werden.

Wird der Anteil des Schwerlastverkehrs nicht angegeben, werden 15% LKW-Anteil an Autobahnen und 10% LKW-Anteil an anderen Straßen angenommen. Diese gerundeten Werte werden nach Tabelle 5-1 als durchschnittlich in deutschen Straßennetzen angenommen.

Tabelle 5-1: Durchschnittliche Verkehrsstärken im deutschen Straßennetz, aus [Bast, 2010]

| Straßentyp    | DTV [Fahrzeug/d] | LKW-Anteil [%] |
|---------------|------------------|----------------|
| Autobahnen    | 47.800           | 15,1           |
| Bundesstraßen | 9.270            | 8,4            |
| Landesstraßen | 3.790            | 8,8            |
| Kreisstraßen  | 1.660            | 9,3            |

Da Autobahnen besonderen Bedingungen der Verkehrsbelastung und der baulichen Gegebenheiten unterliegen, werden sie getrennt von den übrigen Straßen betrachtet. Auch Parkplätze werden in einem eigenen Kapitel behandelt.

#### 5.1.1 Straßenabflüsse

Als Referenzstraße für **Sensitivitätsuntersuchungen** wurde eine städtische Straße mit 5.000 DTV (10% LKW-Anteil) und mittleren oder normalen Bedingungen gewählt. Die gewählten Parameter sind in Tabelle 5-2 beschrieben. Die  $AFS_{ges}$ -Deposition wurde zu 620 kg/(ha·a) berechnet, die  $PM_{63}$ -Deposition zu 139 kg/(ha·a). Unter der Annahme eines jährlichen Niederschlags von 800 mm und eines Verlustbeiwertes von 0,8 betragen die Gesamtfeststoffkonzentration 96,9 mg/l und die  $PM_{63}$ -Konzentration 21,7 mg/l.

Tabelle 5-2: Auswahlparameter zur Berechnung des Feststoff- und PM63-Gehaltes in Straßenabflüssen, Referenzstraße

| Anteil  | Einheit       | Eingabe | Vorschläge                   |                                     |                      |
|---|---------------|---------|------------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| <b>Staubniederschlag</b>                                      |               |         | ländlich                     | städtisch                           | Industrie            |
| Wert  | kg/(ha*a)     | 71      | 38                           | 71                                  | 343                  |
| <b>Pollen</b>   |               |         | normal                       | hoch                                |                      |
| Wert  | kg/(ha*a)     | 400     | 400                          | 750                                 |                      |
| <b>Anteil PM63 in SN und Pollen</b>                           |               |         | normal                       | individuell                         |                      |
| Wert  | -             | 0,8     | 0,8                          |                                     |                      |
| <b>Jahreszeitfaktor für Pollen</b>                            |               |         | Jahresmittel                 | Vegetationszeit                     | individuell          |
| Wert  | -             | 0,33    | 0,33                         | 1                                   |                      |
| <b>Vegetationsfaktor</b>                                      |               |         | keine Vegetation             | normal                              | komplett belaubt     |
| Wert  | -             | 0,33    | 0                            | 0,33                                | 1                    |
| <b>Verkehrsbedingter Abrieb</b>                               |               |         | normal                       | individuell                         |                      |
| Wert PKW  | kg/(ha*a)*PKW | 0,1     | 0,1                          |                                     |                      |
| Wert LKW  | kg/(ha*a)*LKW | 0,5     | 0,5                          |                                     |                      |
| <b>Verkehrsbelastung</b>                                      |               |         | normal                       | individuell                         |                      |
| DTV   | Fahrzeuge/d   | 5.000   |                              |                                     |                      |
| <b>Anteil LKW</b>   |               | 0,10    | 0,10                         | 0 bis 0,20                          |                      |
| PKW   | Fahrzeuge/d   | 4.500   |                              |                                     |                      |
| LKW   | Fahrzeuge/d   | 500     |                              |                                     |                      |
| <b>Anteil PM63 Verkehrsabrieb</b>                             |               |         | normal                       | individuell                         |                      |
| Wert  | -             | 0,22    | 0,22                         |                                     |                      |
| <b>GB<sub>Winter</sub></b>                                    |               |         | Frostindexzone I             | Frostindexzone II                   | Frostindexzone III   |
| Wert  | kg/(ha*a)     | 1.000   | 500                          | 1.000                               | 1.500                |
| <b>DTV-bezogener Fahrbahnabrieb, Winter</b>                   |               |         | normal                       | individuell                         |                      |
| Wert  | kg/(ha*a)*DTV | 0,03    | 0,03                         |                                     |                      |
| <b>Anteil PM63 Verkehrsabrieb Winter</b>                      |               |         | bei Salzstreuung             | ohne Streeung                       |                      |
| Wert  | -             | 0,22    | 0,4                          | 0,22                                |                      |
| <b>Jahreszeitfaktor f<sub>JW</sub></b>                        |               |         | normaler Winter              | individuell                         |                      |
| Wert  | -             | 0,25    | 0,25                         |                                     |                      |
| <b>Faktor Verkehrsart f<sub>Kr</sub></b>                      |               |         | Autobahn                     | normal                              | Ampel/Stop-and-Go    |
| Wert  | -             | 1       | 0,5                          | 1                                   | bis 5                |
| <b>Faktor Anzahl Fahrspuren</b>                               |               |         | 2                            | 4                                   | 6                    |
| Wert  | -             | 1       | 1                            | 0,5                                 | 0,33                 |
| <b>Bodenerosion/Landwirtschaft/Bautätigkeiten</b>             |               |         | Bodenerosion                 | Bau/LW                              | Sonstiges            |
| Wert  | kg/(ha*a)     | 2.500   | 2.500                        | bis über 10.000                     | bis über 10.000      |
| <b>Fläche mit Bodenerosion etc.</b>                           |               |         |                              |                                     |                      |
| Wert  | % von ha      | 0       |                              |                                     |                      |
| <b>Zeitfaktor f<sub>Zeit</sub> besondere Belastungen</b>      |               |         |                              |                                     |                      |
| Wert  | -             | 0       |                              |                                     |                      |
| <b>Anteil PM63 besondere Belastungen</b>                      |               |         | normal                       | individuell                         |                      |
| Wert  | -             | 0,33    | 0,33                         |                                     |                      |
| <b>Faktor bei fehlender Randbebauung f<sub>RB</sub></b>       |               |         | keine und ohne Standstreifen | niedrige Randsteine/ Seitenstreifen | Lärmschutzwände etc. |
| Wert AFS <sub>ges</sub>                                       | -             | 0,75    | 0,5                          | 0,75                                | 1                    |
| Wert PM63   | -             | 0,5     | 0,17                         | 0,5                                 | 0,9                  |
| <b>Faktor Straßenreinigung f<sub>SR</sub></b>                 |               |         | täglich                      | wöchentlich                         | keine                |
| Wert AFS <sub>ges</sub>                                       | -             | 0,75    | 0,5                          | 0,75                                | 1                    |
| Wert PM63   | -             | 0,9     | 0,8                          | 0,9                                 | 1                    |
| <b>Faktor Retention im Gully-/Kanalsystem f<sub>Ret</sub></b> |               |         | zentral                      | dezentral                           |                      |
| Wert AFS <sub>ges</sub>                                       | -             | 1       | 0,6                          | 1                                   |                      |
| Wert PM63   | -             | 1       | 0,8                          | 1                                   |                      |
| <b>Benetzungs-, Mulden-, Verdunstungsverlust</b>              |               |         | normal                       | individuell                         |                      |
| Wert  | -             | 0,8     | 0,8                          |                                     |                      |
| <b>h<sub>N</sub></b>  |               |         | Mittelwert D                 | individuell                         |                      |
| Wert  | mm/a          | 800     | 800                          |                                     |                      |

### 5.1.1.1 Sensitivitätsanalyse

Für die Sensitivitätsanalyse der Formel zur Berechnung des Feststoffaufkommens wurden zunächst die Parameter jeweils um 10% erhöht. Die prozentualen Veränderungen im Vergleich zum Referenzfall sind in Bild 5-1 dargestellt.

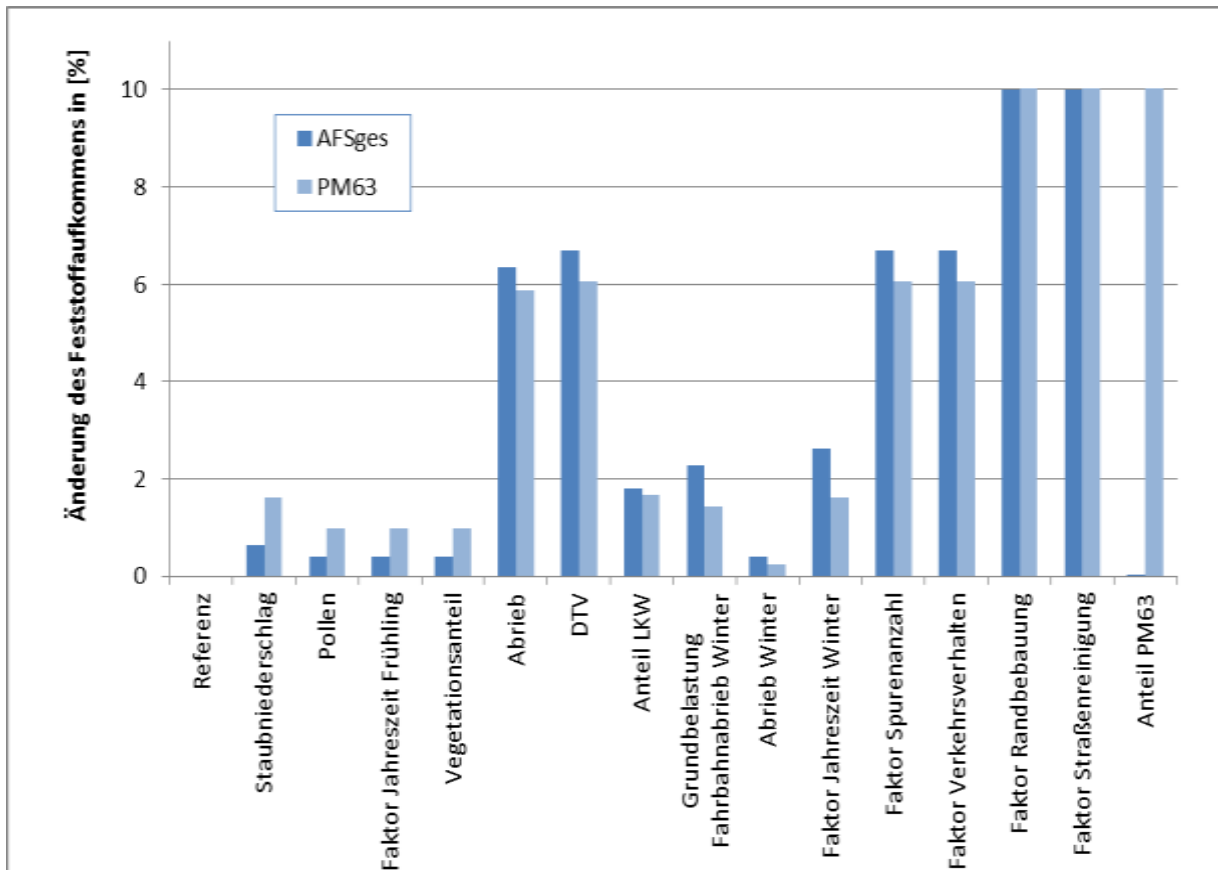


Bild 5-1: Änderung des Feststoffaufkommens auf Straßen bei Erhöhung der Eingabeparameter um 10%.

Es ist zu erkennen, dass - entsprechend des Aufbaus der Formel - die Faktoren eine 10%ige Erhöhung des Feststoffaufkommens bewirken, die sich auf alle anfallenden Anteile beziehen, wie die Faktoren Randbebauung, Straßenreinigung und Anteil PM63. Die Faktoren, die sich nur auf das Feststoffaufkommen durch verkehrliche Aktivitäten beziehen, wirken sich nur um etwa 6% auf eine Feststofferhöhung aus. Die Steigerung der Faktoren zur Berechnung des Feststoffaufkommens durch Frostwirkungen, Pollen, Staubniederschlag und Annahme des LKW-Anteils wirken sich dagegen kaum aus.

Da die möglichen absoluten Spannweiten der Faktoren sehr unterschiedlich sind, werden in einer weiteren Analyse Minimal- und Maximalwerte der einzelnen Faktoren im realistischen Bereich mit den Eingabewerten der Referenzstraße verglichen, siehe Bild 5-2.



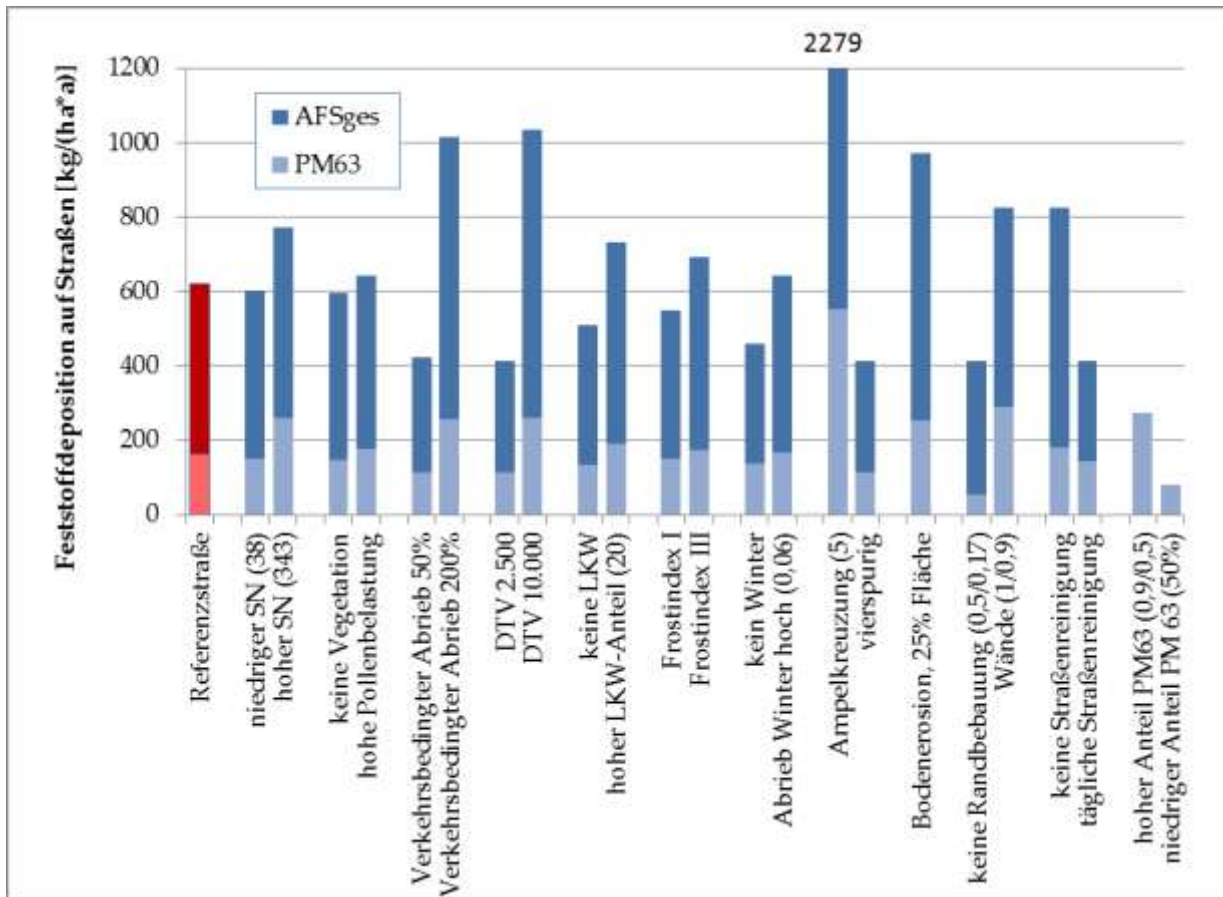


Bild 5-2: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die Berechnung des Feststoffaufkommens auf Straßen, in Klammern die Eingabewerte

Im Folgenden werden die möglichen Auswirkungen absteigend nach ihrem Einfluss beschrieben.

Den mit Abstand größten Einfluss auf das errechnete Feststoffaufkommen hat danach die Verkehrsart (gestörter Verkehr/Ampelkreuzung). Das Feststoffaufkommen  $AFS_{ges}$  und das PM63-Aufkommen können auf mehr als das Dreifache ansteigen.

Die Randbebauung beeinflusst insbesondere das PM63-Aufkommen, es steigt um 80%, wenn Wände ein Verwehen verhindern. Ist keine Randbebauung vorhanden, stehen nur etwa 30% des PM63-Aufkommens für den Niederschlagsabfluss zur Verfügung, die anderen 70% werden in die Umgebung verfrachtet. Hoher Staubniederschlag an Emissionsstandorten kann das PM63-Aufkommen in gleicher Größenordnung beeinflussen.

Sowohl das  $AFS_{ges}$ - als auch das PM63-Aufkommen können maßgeblich durch angeschlossene unbefestigte Flächen, bei denen Bodenerosion stattfindet, erhöht werden.

Großen Einfluss auf das Gesamtfeststoffaufkommen haben auch die Verkehrsdichte und die Annahme des spezifischen Abriebs.

Der Einfluss der angenommenen Straßenbreite (ausgedrückt durch den Faktor für vierspurige Straßen) sowohl auf das Gesamtfeststoff- als auch das PM63-Aufkom-



men liegt bei etwa 30%. Dieser Einfluss würde bei größerer Verkehrstätigkeit noch deutlicher sein.

Randbebauung und Straßenkehrung haben einen mäßigen Einfluss auf den AFS<sub>ges</sub>-Feststoffgehalt ( $\pm 30\%$ ). Der Einfluss der Häufigkeit einer Straßenreinigung auf das PM63-Aufkommen ist noch geringer.

Unter der Annahme, dass kein Wintereinfluss vorhanden ist, wird das Gesamtfeststoffaufkommen in ähnlicher Größenordnung verringert, das PM63-Aufkommen etwas geringer.

Die Wahl des Frostindices und des LKW-Anteils wirken sich dagegen wenig auf das Feststoffaufkommen aus (grobe und feine Anteile), noch geringer ist der Einfluss der Annahme zur Pollenbelastung oder einer geringeren Staubhintergrundbelastung.

Insgesamt erscheinen die gewählten Parameter plausible Ergebnisse zu liefern.

#### 5.1.1.2 Verifizierung

Die **Verifizierung der Formel 3.1 und 3.4 für Straßenabflüsse** wurde mit Hilfe der in Kap. 4.2.1.1 beschriebenen Messkampagnen durchgeführt. Die Auswahl der Parameter wurde anhand der Beschreibungen und mit Hilfe von Satellitenfotos bzw. Fotos aus google-earth getroffen, wie z.B. in Burgdorf, vgl. Bild 5-3.

In diesem Beispiel wurden anhand der Bilder der Vegetationsfaktor herab- und der Faktor für die Randbebauung heraufgesetzt.

Falls nicht anders angegeben, wurde in allen Studien bei der DTV von einem Anteil von 10% an LKW-Verkehr ausgegangen. Als Niederschlag wurde jeweils der langjährige durchschnittliche angenommen. Bei Messkampagnen, die nur im Sommer stattfanden, wurde von einer 10%igen Erhöhung des Niederschlags ausgegangen. Unbefestigte Flächen waren laut der Beschreibungen in keinen untersuchten Einzugsgebieten angeschlossen.

Die Studien aus China und aus Madison, USA, wurden nicht berücksichtigt, da sich herausstellte, dass bei Messkampagnen, die nur wenige Stichproben enthalten sowie Studien ohne eine Angabe der DTV ein Berechnen nicht sinnvoll ist.

Als maßgeblicher Niederschlag wurde, falls angegeben, der im Messzeitraum gefallene Niederschlag hochgerechnet auf den Jahresniederschlag verwendet.



Bild 5-3: Situation in der Kirchbergstrasse, Burgdorf, Quelle: google-earth

Die Eingabeparameter sowie die berechneten und gemessenen Werte für  $AFS_{ges}$  und  $PM_{63}$  sind in Tabelle 5-3 aufgelistet. In Bild 5-4 sind die Ergebnisse dargestellt.

Leider wurden in keiner einzigen Messreihe  $PM_{63}$  gemessen, so dass nur der  $AFS_{ges}$  verglichen werden kann.

Der berechnete Wert lag für alle Studien im gleichen Größenbereich wie der gemessene mit Ausnahme für die Studie aus Karlsruhe. Hier kann im Nachhinein nur vermutet werden, dass der beschriebene große Laubbaumbestand in der Wohngegend Ursache für den großen Unterschied ist oder Einträge von unbefestigten Flächen den Feststoffgehalt erhöhten. Die Unterschiede zwischen gemessenen und berechneten Werten aller anderen Studien liegen zwischen 10 % und maximal 28%.

Tabelle 5-3: Eingabeparameter zur Berechnung des AFS<sub>ges</sub> und des PM63 in Straßenabflüssen

| Anteil  | Einheit       | Vorschläge                   |                                   |                      | Karlsruhe  | Bayreuth | Burgdorf          | Augsburg | Brisbane | München |
|---|---------------|------------------------------|-----------------------------------|----------------------|--|----------|-------------------|----------|----------|---------|
| <b>Staubniederschlag</b>                                      |               | ländlich                     | städtisch                         | Industrie            | Messung  |          |                   |          |          |         |
| Wert  | kg/(ha*a)     | 38                           | 71                                | 343                  | 124  | 71       | 71                | 71       | 71       | 71      |
| <b>Pollen</b>   |               | normal                       | hoch                              |                      |  |          |                   |          |          |         |
| Wert  | kg/(ha*a)     | 400                          | 750                               |                      | 750  | 400      | 400               | 400      | 400      | 400     |
| <b>Anteil PM63 in SN und Pollen</b>                           |               | normal                       | individuell                       |                      |  |          |                   |          |          |         |
| Wert  | -             | 0,8                          |                                   |                      | 0,8  | 0,8      | 0,8               | 0,8      | 0,8      | 0,8     |
| <b>Jahreszeitfaktor für Pollen</b>                            |               | Jahresmittel                 | Vegetationszeit                   | individuell          |  |          |                   |          |          |         |
| Wert  | -             | 0,33                         | 1                                 |                      | 0,33   | 0,33     | 0,33              | 0,33     | 0,33     | 0,33    |
| <b>Vegetationsfaktor</b>                                      |               | keine Vegetation             | normal                            | komplett belaubt     | Entscheidung nach Luftbild   |          |                   |          |          |         |
| Wert  | -             | 0                            | 0,33                              | 1                    | 0,66   | 0,33     | 0,2               | 0,33     | 0,33     | 0,33    |
| <b>Verkehrsbedingter Abrieb</b>                               |               | normal                       | individuell                       |                      |  |          |                   |          |          |         |
| Wert PKW  | kg/(ha*a)*PKW | 0,1                          |                                   |                      | 0,1  | 0,1      | 0,1               | 0,1      | 0,1      | 0,1     |
| Wert LKW  | kg/(ha*a)*LKW | 0,5                          |                                   |                      | 0,5  | 0,5      | 0,5               | 0,5      | 0,5      | 0,5     |
| <b>Verkehrsbelastung</b>                                      |               | normal                       | individuell                       |                      |  |          |                   |          |          |         |
| DTV   | Fahrzeuge/d   |                              |                                   |                      | 3.200  | 34.000   | 17.000            | 7.000    | 2.000    | 57.000  |
| <b>Anteil LKW</b>   |               | 0,10                         | 0 bis 0,20                        |                      | 0,10   | 0,10     | 0,17              | 0,14     | 0,10     | 0,15    |
| PKW   | Fahrzeuge/d   |                              |                                   |                      | 2.880  | 30.600   | 14.110            | 6.000    | 1.800    | 48.450  |
| LKW   | Fahrzeuge/d   |                              |                                   |                      | 320  | 3.400    | 2.890             | 1.000    | 200      | 8.550   |
| <b>Anteil PM63 Verkehrsabrieb</b>                             |               | normal                       | individuell                       |                      |  |          |                   |          |          |         |
| Wert  | -             | 0,3                          |                                   |                      | 0,3  | 0,3      | 0,3               | 0,3      | 0,3      | 0,3     |
| <b>GB<sub>Winter</sub></b>                                    |               | Frostindexzone I             | Frostindexzone II                 | Frostindexzone III   |  |          |                   |          |          |         |
| Wert  | kg/(ha*a)     | 500                          | 1.000                             | 1.500                | 1.000  | 1.000    | 1.500             | 1.500    | 500      | 1.500   |
| <b>DTV-bezogener Fahrbahnabrieb, Winter</b>                   |               | normal                       | individuell                       |                      |  |          |                   |          |          |         |
| Wert  | kg/(ha*a)*DTV | 0,03                         |                                   |                      | 0,03   | 0,03     | 0,03              | 0,03     | 0,03     | 0,03    |
| <b>Anteil PM63 Verkehrsabrieb Winter</b>                      |               | bei Salzstreuung             | ohne Streuung                     |                      |  |          |                   |          |          |         |
| Wert  | -             | 0,4                          | 0,2                               |                      | 0,4  | 0,4      | 0,4               | 0,4      | 0,4      | 0,4     |
| <b>Jahreszeitfaktor f<sub>JW</sub></b>                        |               | normaler Winter              | individuell                       |                      | abhängig von Probenahmezeitraum                                    |          |                   |          |          |         |
| Wert  | -             | 0,25                         |                                   |                      | 0,25   | 0        | 0,25              | 0,25     | 0        | 0,25    |
| <b>Faktor Verkehrsart f<sub>Kr</sub></b>                      |               | Autobahn                     | normal                            | Ampel/Stop-and-Go    | Parkplatz/Kreuzung   |          | langsamer Verkehr |          |          |         |
| Wert  | -             | 0,5                          | 1                                 | bis 5                | 2,5  | 1        | 0,9               | 1        | 1        | 1       |
| <b>Faktor Anzahl Fahrspuren</b>                               |               | 2                            | 4                                 | 6                    |  |          |                   |          |          |         |
| Wert  | -             | 1                            | 0,5                               | 0,33                 | 1  | 0,66     | 1                 | 1        | 1        | 0,33    |
| <b>Faktor bei fehlender Randbebauung f<sub>RB</sub></b>       |               | keine und ohne Standstreifen | niedrige Randsteine/Seitenstreife | Lärmschutzwände etc. | Entscheidung nach Luftbild und Beschreibung                        |          |                   |          |          |         |
| Wert AFS <sub>ges</sub>                                       | -             | 0,5                          | 0,75                              | 1                    | 0,75   | 0,5      | 0,6               | 0,5      | 0,75     | 0,75    |
| Wert PM63   | -             | 0,17                         | 0,5                               | 0,9                  | 0,5  | 0,17     | 0,25              | 0,17     | 0,5      | 0,5     |
| <b>Faktor Straßenreinigung f<sub>SR</sub></b>                 | -             | täglich                      | wöchentlich                       | keine                | wöchentlich, Land- und Schnellstraßen keine                        |          |                   |          |          |         |
| Wert AFS <sub>ges</sub>                                       | -             | 0,5                          | 0,75                              | 1                    | 0,75   | 0,5      | 0,75              | 1        | 0,75     | 1       |
| Wert PM63   | -             | 0,8                          | 0,9                               | 1                    | 0,9  | 0,8      | 0,9               | 1        | 0,5      | 1       |
| <b>Faktor Retention im Gully-/Kanalsystem f<sub>Ret</sub></b> |               | zentral                      | dezentral                         |                      | Sieb 2 mm  |          |                   |          |          |         |
| Wert AFS <sub>ges</sub>                                       | -             | 0,6                          | 1                                 |                      | 1  | 0,85     | 1                 | 1        | 1        | 1       |
| Wert PM63   | -             | 0,8                          | 1                                 |                      | 1  | 1        | 1                 | 1        | 1        | 1       |
| <b>Benetzungs-, Mulden-, Verdunstungsverlust</b>              |               | normal                       | individuell                       |                      |  |          |                   |          |          |         |
| Wert  | -             | 0,8                          |                                   |                      | 0,8  | 0,8      | 0,8               | 0,8      | 0,8      | 0,8     |
| <b>h<sub>N</sub></b>  |               | Mittelwert D                 |                                   |                      | Jahresmittelwert oder hochgerechnet über N im Zeitraum der Messung |          |                   |          |          |         |
| Wert  | mm/a          | 800                          |                                   |                      | 800  | 267      | 1075              | 811      | 1300     | 967     |

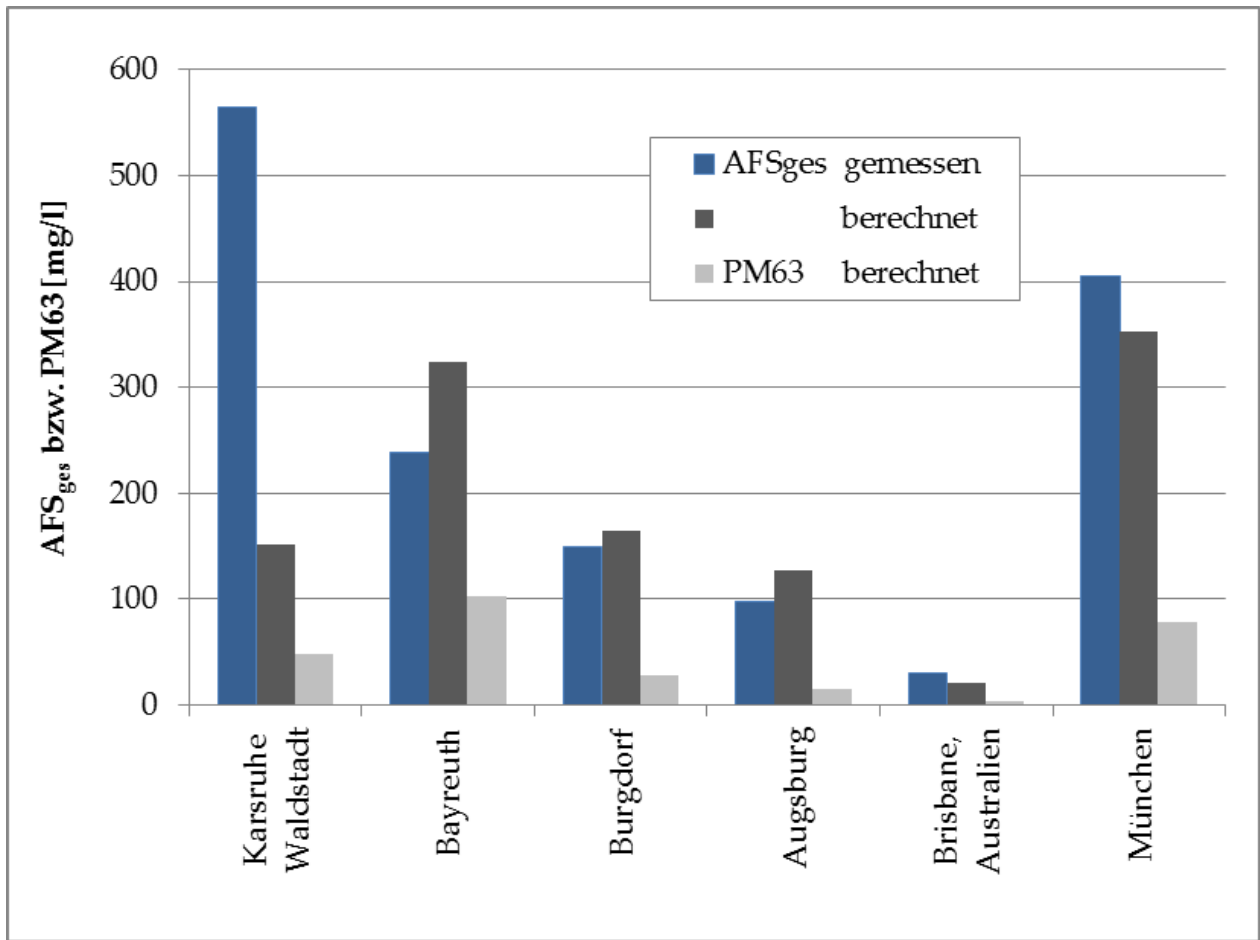


Bild 5-4: Verifizierung zur Berechnung von Straßenabflüssen

Ein systematischer Fehler wird ausgeschlossen, da die Abschätzung teilweise Minderbefunde, teilweise zu hohe Befunde ergibt.

Die Unterschiede zwischen gemessenen und abgeschätzten Werten sind vermutlich auf die Erfassung zu weniger Niederschlagsereignisse oder auf die Qualität der Beschreibung der Randbedingungen zurückzuführen, die zur Berechnung des zu erwartenden Feststoffgehaltes wesentlich sind. Die Randbedingungen gingen teilweise aus den Studien nicht hervor und mussten somit geschätzt werden.

### 5.1.2 Autobahnabflüsse

Für das Feststoffaufkommen, das dem Niederschlagsabfluss auf Autobahnen zur Verfügung steht, wurde eine weitere Sensitivitätsanalyse durchgeführt, da hier im Gegensatz zu normalen Straßenabflüssen die DTV und somit der Abrieb eine überprägende Rolle spielen. Auch unterscheiden sich die Fahrweise, Anzahl der Fahrspuren sowie die Auswirkung von Turbulenzen durch die höhere Fahrgeschwindigkeit von innerstädtischen oder Landstraßen. Eine Straßenreinigung spielt bei Autobahnen dagegen eine geringe Rolle.

Als Referenzstraße wurde eine Autobahn mit 50.000 DTV, 15% davon LKW-Verkehr, und vier Fahrspuren gewählt. Die Eingabeparameter sind in Tabelle 5-4 wiedergegeben. Die Berechnung ergab 983 kg/(ha·a) an AFS<sub>ges</sub>-Deposition, und 114 kg/(ha·a) an PM<sub>63</sub>-Deposition. Unter der Annahme eines jährlichen Niederschlags von 800 mm und eines Verlustbeiwertes von 0,8 betragen die Gesamtfeststoffkonzentration 153,6 mg/l und die PM<sub>63</sub>-Konzentration 17,8 mg/l.

### 5.1.2.1 Sensitivitätsanalyse

Sämtliche Parameter wurden jeweils im Vergleich zu den gewählten Werten der Referenzstraße um 10% erhöht. Die Veränderung des Feststoffaufkommens ist in [%] in Bild 5-5 dargestellt.

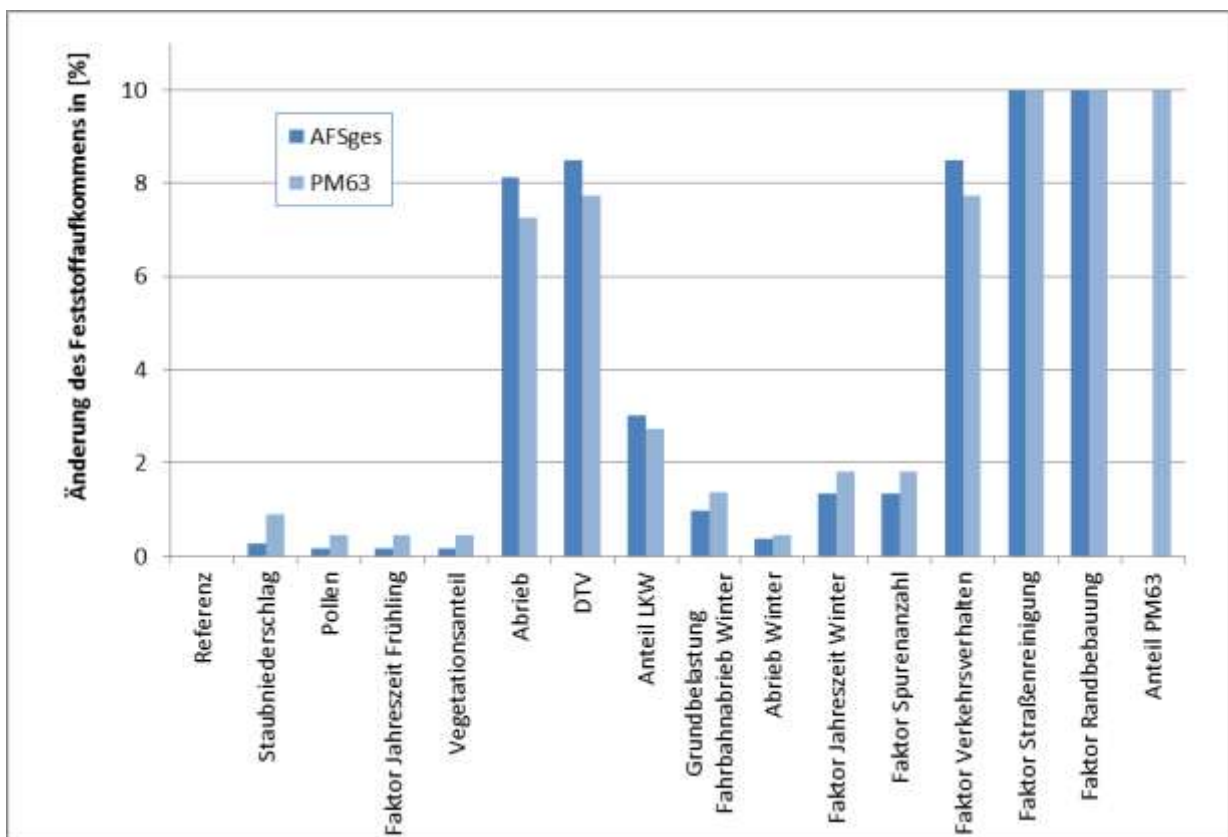


Bild 5-5: Änderung des Feststoffaufkommens auf Autobahnen nach Erhöhung der Eingabeparameter um 10%.

Das „Muster“ der Änderungen entspricht in etwa dem des Feststoffaufkommens auf Straßen, wenngleich sich hier die Änderungen des verkehrsbedingten Feststoffaufkommens stärker und der Einfluss der Änderung der nicht verkehrsbedingten Parameter (Staub, Pollen, teilweise Wintereinfluss) weniger bemerkbar machen, da der Eingabeparameter „DTV“ um das Zehnfache höher ist als bei Straßen.

In einer weiteren Analyse wurden die Minimal- und Maximalwerte der Faktoren im realistischen Bereich mit den Eingabewerten der Referenzstraße verglichen, siehe Bild 5-6.

Tabelle 5-4: Eingabeparameter der Referenzautobahn zur Berechnung von AFS und PM63 in Autobahnabflüssen

| Anteil  | Einheit       | Eingabe | Vorschläge                             |                                     |                                  |
|---|---------------|---------|--|-------------------------------------|----------------------------------|
| <b>Staubniederschlag</b>                                      |               |         | ländlich                               | städtisch                           | Industrie                        |
| Wert  | kg/(ha*a)     | 71      | 38                                     | 71                                  | 343                              |
| <b>Pollen</b>   |               |         | normal                                 | hoch                                |                                  |
| Wert  | kg/(ha*a)     | 400     | 400                                    | 750                                 |                                  |
| <b>Anteil PM63 in SN und Pollen</b>                           |               |         | normal                                 | individuell                         |                                  |
| Wert  | -             | 0,8     | 0,8                                    |                                     |                                  |
| <b>Jahreszeitfaktor für Pollen</b>                            |               |         | Jahresmittel                           | Vegetationszeit                     | individuell                      |
| Wert  | -             | 0,33    | 0,33                                   | 1                                   |                                  |
| <b>Vegetationsfaktor</b>                                      |               |         | keine Vegetation                       | normal                              | komplett belaubt                 |
| Wert  | -             | 0,33    | 0                                      | 0,33                                | 1                                |
| <b>Verkehrsbedingter Abrieb</b>                               |               |         | normal                                 | individuell                         |                                  |
| Wert PKW  | kg/(ha*a)*PKW | 0,1     | 0,1                                    |                                     |                                  |
| Wert LKW  | kg/(ha*a)*LKW | 0,5     | 0,5                                    |                                     |                                  |
| <b>Verkehrsbelastung</b>                                      |               |         | normal                                 | individuell                         |                                  |
| DTV   | Fahrzeuge/d   | 50.000  |  |                                     |                                  |
| <b>Anteil LKW</b>   |               | 0,15    | 0,15                                   | 0,05 bis 0,25                       |                                  |
| PKW   | Fahrzeuge/d   | 42.500  |  |                                     |                                  |
| LKW   | Fahrzeuge/d   | 7.500   |  |                                     |                                  |
| <b>Anteil PM63 Verkehrsabrieb</b>                             |               |         | normal                                 | individuell                         |                                  |
| Wert  | -             | 0,22    | 0,22                                   |                                     |                                  |
| <b>GB<sub>Winter</sub></b>                                    |               |         | Frostindexzone I                       | Frostindexzone II                   | Frostindexzone III               |
| Wert  | kg/(ha*a)     | 1.000   | 500                                    | 1.000                               | 1.500                            |
| <b>DTV-bezogener Fahrbahnabrieb, Winter</b>                   |               |         | normal                                 | individuell                         |                                  |
| Wert  | kg/(ha*a)*DTV | 0,03    | 0,03                                   |                                     |                                  |
| <b>Anteil PM63 Verkehrsabrieb Winter</b>                      |               |         | bei Salzstreuung                       | ohne Streueung                      |                                  |
| Wert  | -             | 0,4     | 0,4                                    | 0,22                                |                                  |
| <b>Jahreszeitfaktor f<sub>JW</sub></b>                        |               |         | normaler Winter                        | individuell                         |                                  |
| Wert  | -             | 0,25    | 0,25                                   |                                     |                                  |
| <b>Faktor Verkehrsart f<sub>Kr</sub></b>                      |               |         | Autobahn                               | gestörter Verkehr                   | Individuell                      |
| Wert  | -             | 0,5     | 0,5                                    | > 1                                 |                                  |
| <b>Faktor Anzahl Fahrspuren</b>                               |               |         | 2                                      | 4                                   | 6                                |
| Wert  | -             | 0,5     | 1                                      | 0,5                                 | 0,33                             |
| <b>Bodenerosion/Landwirtschaft/Bautätigkeiten</b>             |               |         | Bodenerosion                           | Bau/LW                              | Sonstiges                        |
| Wert  | kg/(ha*a)     | 0       | 2.500                                  | bis über 10.000                     | bis über 10.000                  |
| <b>Fläche mit Bodenerosion etc.</b>                           |               |         |  |                                     |                                  |
| Wert  | % von ha      | 0       |  |                                     |                                  |
| <b>Zeitfaktor f<sub>Zeit</sub> besondere Belastungen</b>      |               |         |  |                                     |                                  |
| Wert  | -             | 0       |  |                                     |                                  |
| <b>Anteil PM63 besondere Belastungen</b>                      |               |         | normal                                 | individuell                         |                                  |
| Wert  | -             | 0,33    | 0,33                                   |                                     |                                  |
| <b>Faktor bei fehlender Randbebauung f<sub>RB</sub></b>       |               |         | keine und ohne Standstreifen/ Autobahn | niedrige Randsteine/ Seitenstreifen | Lärmschutzwände etc.             |
| Wert AFS <sub>ges</sub>                                       | -             | 0,4     | 0,4                                    | 0,75                                | 1                                |
| Wert PM63   | -             | 0,17    | 0,17                                   | 0,5                                 | 0,9                              |
| <b>Faktor Straßenreinigung f<sub>SR</sub></b>                 |               |         | täglich                                | wöchentlich                         | keine                            |
| Wert AFS <sub>ges</sub>                                       | -             | 1       | 0,5                                    | 0,75                                | 1                                |
| Wert PM63   | -             | 1       | 0,8                                    | 0,9                                 | 1                                |
| <b>Faktor Retention im Gully-/Kanalsystem f<sub>Ret</sub></b> |               |         | ohne Straßenreinigung                  | wöchentl. Straßenreinigung          | dezentral/tägl. Straßenreinigung |
| Wert AFS <sub>ges</sub>                                       | -             | 1       | 0,6                                    | 0,8                                 | 1                                |
| Wert PM63   | -             | 1       | 0,8                                    | 0,9                                 | 1                                |



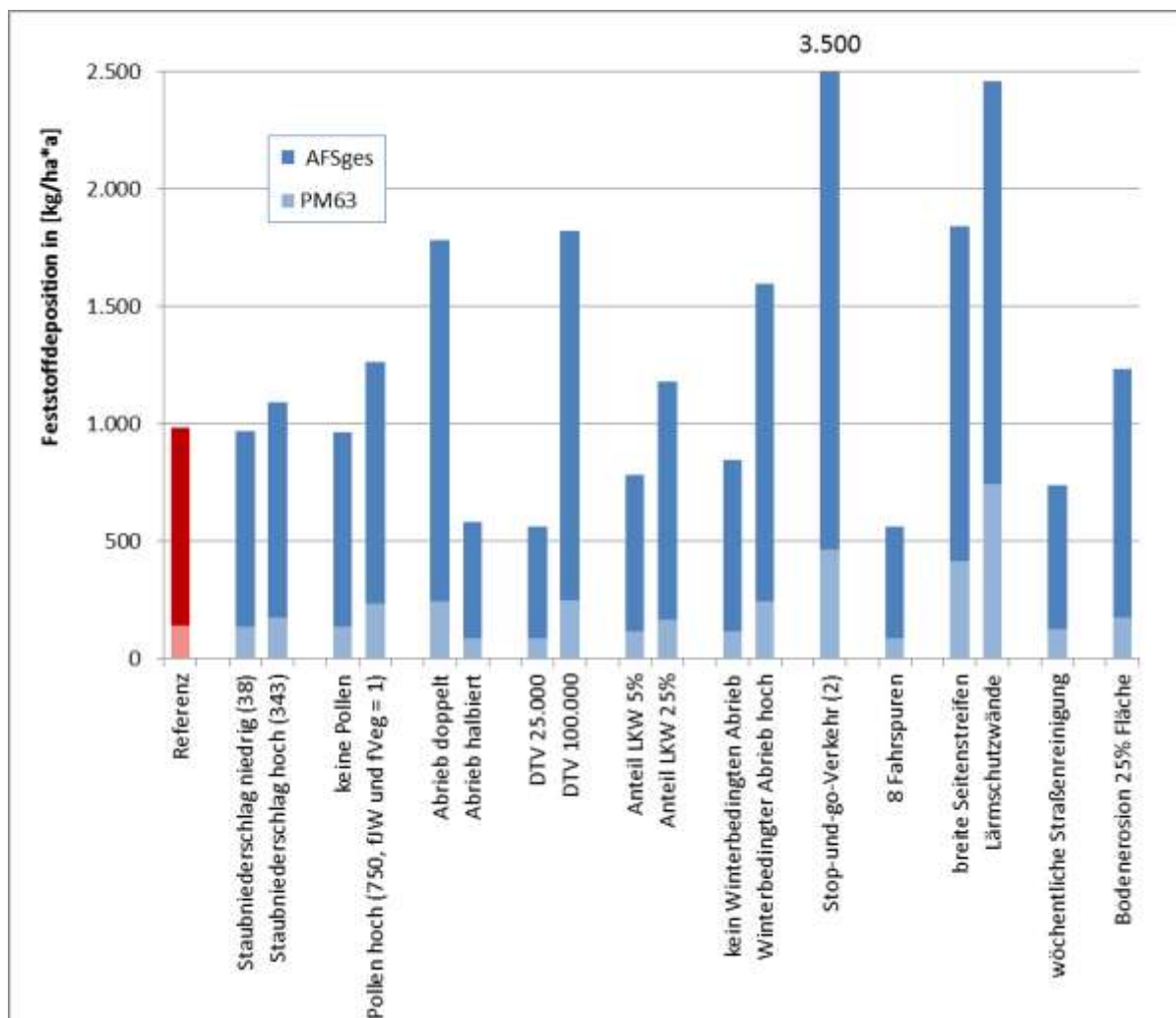


Bild 5-6: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die Berechnung des Feststoffaufkommens auf Autobahnen, in Klammern die Eingabewerte

Den größten Einfluss auf die PM63-Deposition auf Autobahnen haben die baulichen Gegebenheiten. Die PM63-Deposition kann auf mehr als das Fünffache ansteigen, wenn Lärmschutzwände vorhanden sind. Sind sehr breite statt schmale Seitenstreifen vorhanden, so steigt das PM63-Aufkommen auf etwas mehr als das Dreifache. Das Gesamtfeststoffaufkommen wird durch Lärmschutzwände um das 2,5-fache, bei breiten Seitenstreifen auf das Doppelte erhöht.

Stop-and-go-Verkehr lässt das Feststoffaufkommen um etwa das 3,5-fache ansteigen.

Um etwa das 1,5-fache steigt das Gesamtfeststoff- und PM63-Aufkommen unter der Annahme doppelten Abriebs, ungünstiger Winterbedingungen und doppelter Verkehrsbelastung, das Gesamtfeststoffaufkommen bei Verbreiterung der Seitenstreifen, das PM63-Aufkommen unter der Annahme, dass die Pollenbelastung sehr hoch ist.

Eine Verringerung bzw. Erhöhung um 15 bis 40% des Feststoffaufkommens ergibt sich bei Halbierung der Verkehrsbelastung oder des Abriebs, bei Vorhandensein von 8 Fahrspuren oder wenn Bodenerosion stattfindet.



Eine wöchentliche Straßenreinigung würde das Gesamtfeststoffaufkommen um 25%, das PM<sub>63</sub>-Aufkommen um 10% verringern.

Die Veränderung sämtlicher anderer Faktoren wirkt sich nur gering auf das Feststoffaufkommen aus, am geringsten die Annahme eines geringen Staubniederschlags oder, dass keine Pollen vorhanden sind.

#### 5.1.2.2 Verifizierung

Zur Verifizierung der Formeln 3.1 und 3.4 für Autobahnabflüsse wurden die in Kap. 4.2.1.2 beschriebenen Messkampagnen zur Hilfe genommen. Die Auswahl der Parameter wurde anhand der Beschreibungen getroffen. War die Beschreibung nicht eindeutig, wurden die Parameter wie in Tabelle 5-4 dargestellt angenommen. Bei der DTV wurde, falls nicht anders angegeben, von 15% LKW-Verkehr ausgegangen. Die Anzahl der Fahrspuren und Seitenstreifen, eventuelle Randbebauung und Vegetationsanteile wurden mittels Satellitenfotos abgeschätzt. Bei den in der Studie von [Grotehusmann et al., 2013] beprobten Autobahnen stellte sich die Frage, ob der mitbeprobte Anteil aus der geschlossenen Sammelrinne tatsächlich im Niederschlagsabfluss landen würde oder nicht zumindest teilweise in die Umgebung verweht würde. Hier wurde hilfsweise statt des üblichen Faktors für die Randbebauung für Autobahnen der für Seitenstreifen an Landstraßen verwendet.

Die Eingabeparameter sind in Tabelle 5-5 aufgelistet.

In Bild 5-7 sind schließlich die berechneten Ergebnisse den gemessenen Werten gegenübergestellt.

Der Unterschied der berechneten und gemessenen Werte in Heilbronn und Ulm-West ist eventuell auf den großen Einfluss des Anschlusses unbefestigter Flächen im den Einzugsgebieten zurückzuführen, hier ist der Abtrag durch Bodenerosion pauschal mit 2.500 kg/(ha·a) eventuell zu gering angenommen.

Auch die gemessenen und berechneten Werte der Studie aus Burton-i.K (60%) und Winterthur (44%) weichen erheblich voneinander ab. Hier wurde jeweils wesentlich mehr berechnet als gemessen, was an falschen Annahmen der Randbedingungen liegen mag. Die übrigen Studien liegen im Bereich von  $\pm 3$  bis 20% Abweichung, was als sehr gut angesehen werden muss, wenn man das generelle Problem bei der Durchführung von Messprogrammen, die Probendichte, bedenkt.

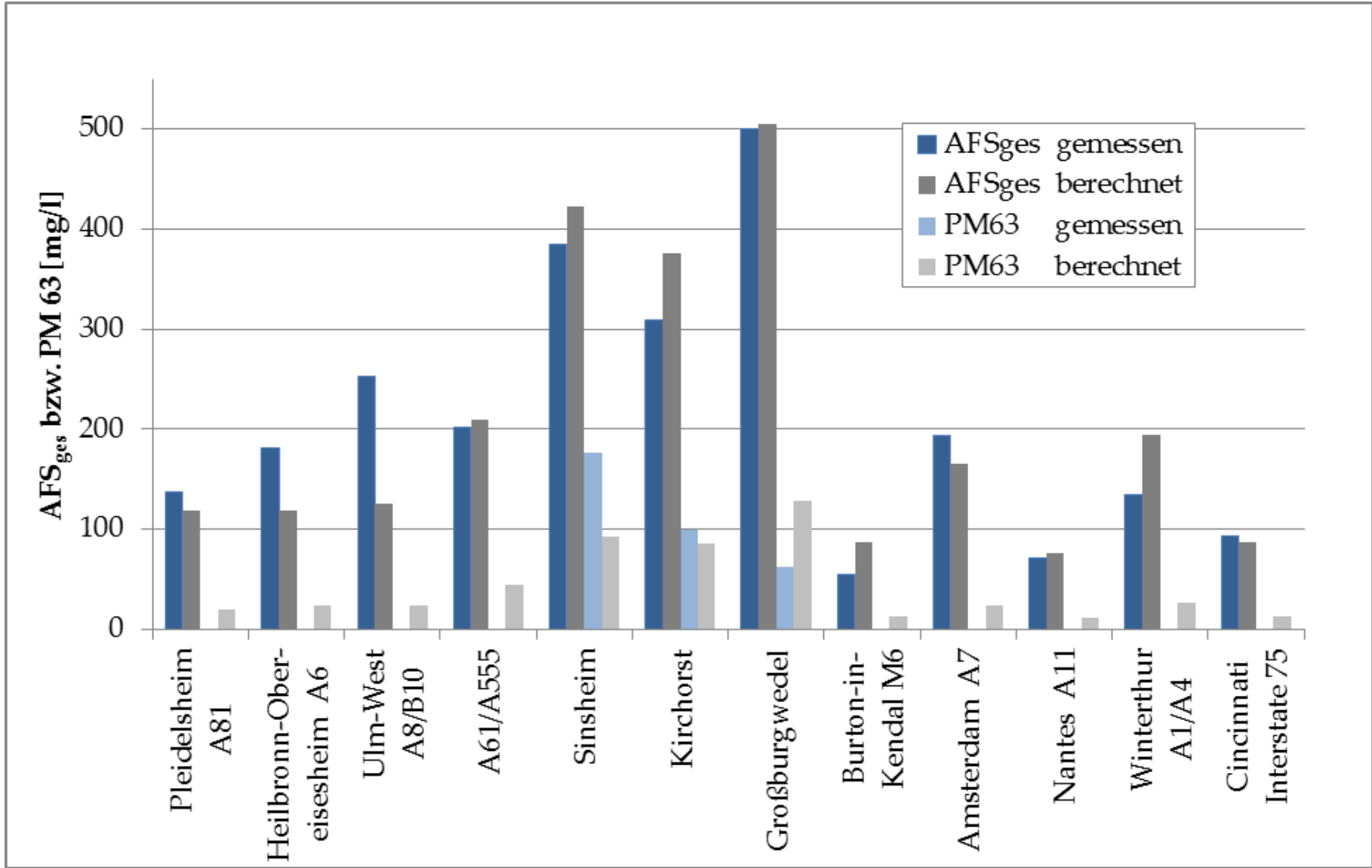


Bild 5-7: Verifizierung zur Berechnung von Autobahnabflüssen

Tabelle 5-5: Eingabeparameter zur Berechnung des AFS<sub>ges</sub> und des PM63 in Autobahnabflüssen

| Anteil   | Einheit       | Vorschläge       |                       |                    | Pleidelsheim | Heilbronn | Ulm    | A 61/A 555 | Sinsheim A6 | Kirchhorst A37 | Großburgwedel 7 | Burton-i-K. | Amsterdam | Nantes | Winterthur | Cincinnati |
|--|---------------|------------------|-----------------------|--------------------|--------------|-----------|--------|------------|-------------|----------------|-----------------|-------------|-----------|--------|------------|------------|
| <b>Staubniederschlag</b>                                 |               | ländlich         | städtisch             | Industrie          |              |           |        |            |             |                |                 |             |           |        |            |            |
| Wert   | kg/(ha*a)     | 38               | 71                    | 343                | 109          | 109       | 109    | 1300       | 71          | 38             | 38              | 38          | 71        | 71     | 71         | 71         |
| <b>Pollen</b>  |               | normal           | hoch                  |                    |              |           |        |            |             |                |                 |             |           |        |            |            |
| Wert   | kg/(ha*a)     | 400              | 750                   |                    | 400          | 400       | 400    | 0          | 400         | 400            | 400             | 400         | 400       | 400    | 400        | 400        |
| <b>Anteil PM63 in SN und Pollen</b>                      |               | normal           | individuell           |                    |              |           |        |            |             |                |                 |             |           |        |            |            |
| Wert   | -             | 0,8              |                       |                    | 0,8          | 0,8       | 0,8    | 0,8        | 0,8         | 0,8            | 0,8             | 0,8         | 0,8       | 0,8    | 0,8        | 0,8        |
| <b>Jahreszeitfaktor für Pollen</b>                       |               | Jahresmittel     | Vegetationszeit       | individuell        |              |           |        |            |             |                |                 |             |           |        |            |            |
| Wert   | -             | 0,33             | 1                     |                    | 0,66         | 0,66      | 0,27   | 0,33       | 0,33        | 0,33           | 0,33            | 0,33        | 0,33      | 0,33   | 0,33       | 0,33       |
| <b>Vegetationsfaktor</b>                                 |               | keine Vegetation | normal                | komplett belaubt   |              |           |        |            |             |                |                 |             |           |        |            |            |
| Wert   | -             | 0                | 0,33                  | 1                  | 0,66         | 0,8       | 0,66   | 0,33       | 0,165       | 0,8            | 0,165           | 0,33        | 0,33      | 0,33   | 0,33       | 0,33       |
| <b>Verkehrsbedingter Abrieb</b>                          |               | normal           | individuell           |                    |              |           |        |            |             |                |                 |             |           |        |            |            |
| Wert PKW   | kg/(ha*a)*PKW | 0,1              |                       |                    | 0,1          | 0,1       | 0,1    | 0,1        | 0,1         | 0,1            | 0,1             | 0,1         | 0,1       | 0,1    | 0,1        | 0,1        |
| Wert LKW   | kg/(ha*a)*LKW | 0,5              |                       |                    | 0,5          | 0,5       | 0,5    | 0,5        | 0,5         | 0,5            | 0,5             | 0,5         | 0,5       | 0,5    | 0,5        | 0,5        |
| <b>Verkehrsbelastung</b>                                 |               | normal           | individuell           |                    |              |           |        |            |             |                |                 |             |           |        |            |            |
| DTV  | Fahrzeuge/d   |                  |                       |                    | 47.000       | 47.000    | 26.000 | 69.000     | 85.600      | 45.000         | 86.000          | 38.000      | 53.000    | 24.000 | 50.000     | 150.000    |
| <b>Anteil LKW</b>  |               | 0,15             | 0,05 bis 0,25         |                    | 0,18         | 0,22      | 0,15   | 0,12       | 0,15        | 0,15           | 0,15            | 0,15        | 0,15      | 0,15   | 0,15       | 0,10       |
| PKW  | Fahrzeuge/d   |                  |                       |                    | 38.540       | 36.660    | 22.100 | 60.775     | 72.760      | 38.250         | 73.100          | 32.300      | 45.050    | 20.400 | 42.500     | 135.000    |
| LKW  | Fahrzeuge/d   |                  |                       |                    | 8.460        | 10.340    | 3.900  | 8.225      | 12.840      | 6.750          | 12.900          | 5.700       | 7.950     | 3.600  | 7.500      | 15.000     |
| <b>Anteil PM63 Verkehrsabrieb</b>                        |               | normal           | individuell           |                    |              |           |        |            |             |                |                 |             |           |        |            |            |
| Wert   | -             | 0,22             |                       |                    | 0,3          | 0,3       | 0,3    | 0,3        | 0,3         | 0,3            | 0,3             | 0,3         | 0,3       | 0,3    | 0,3        | 0,3        |
| <b>GB<sub>winter</sub></b>                               |               | Frostindexzone I | Frostindexzone II     | Frostindexzone III |              |           |        |            |             |                |                 |             |           |        |            |            |
| Wert   | kg/(ha*a)     | 500              | 1.000                 | 1.500              | 1.000        | 1.000     | 1.000  | 500        | 1.000       | 500            | 500             | 1.000       | 1.000     | 250    | 1.500      | 500        |
| <b>DTV-bezogener Fahrbahnabrieb, Winter</b>              |               | normal           | individuell           |                    |              |           |        |            |             |                |                 |             |           |        |            |            |
| Wert   | kg/(ha*a)*DTV | 0,03             |                       |                    | 0,03         | 0,03      | 0,03   | 0,03       | 0,03        | 0,03           | 0,03            | 0,03        | 0,03      | 0,015  | 0,03       | 0,03       |
| <b>Anteil PM63 Verkehrsabrieb Winter</b>                 |               | bei Salztreuung  | ohne Streeung         |                    |              |           |        |            |             |                |                 |             |           |        |            |            |
| Wert   | -             | 0,4              | 0,22                  |                    | 0,4          | 0,4       | 0,4    | 0,4        | 0,4         | 0,4            | 0,4             | 0,4         | 0,4       | 0,4    | 0,4        | 0,4        |
| <b>Jahreszeitfaktor f<sub>iw</sub></b>                   |               | normaler Winter  | individuell           |                    |              |           |        |            |             |                |                 |             |           |        |            |            |
| Wert   | -             | 0,25             |                       |                    | 0,222        | 0,333     | 0,27   | 0,25       | 0,25        | 0,125          | 0,125           | 0,25        | 0,25      | 0,25   | 0          | 0,25       |
| <b>Faktor Verkehrsart f<sub>kr</sub></b>                 |               | Autobahn         | gestörter Verkehr     | Individuell        |              |           |        |            |             |                |                 |             |           |        |            |            |
| Wert   | -             | 0,5              | > 1                   |                    | 0,5          | 0,5       | 0,5    | 0,5        | 0,5         | 0,5            | 0,5             | 0,5         | 0,5       | 0,5    | 0,5        | 0,4        |
| <b>Faktor Anzahl Fahrspuren</b>                          |               | 2                | 4                     | 6                  |              |           |        |            |             |                |                 |             |           |        |            |            |
| Wert   | -             | 1                | 0,5                   | 0,33               | 0,33         | 0,33      | 0,33   | 0,36       | 0,33        | 0,5            | 0,33            | 0,33        | 0,5       | 0,5    | 0,75       | 0,25       |
| <b>Bodenerosion/Landwirtschaft/Bautätigkeiten</b>        |               | Bodenerosion     | Bau/LW                | Sonstiges          |              |           |        |            |             |                |                 |             |           |        |            |            |
| Wert   | kg/(ha*a)     | 2.500            | bis über 10.000       | bis über 10.000    | 0            | 2.500     | 2.500  | 0          | 0           | 0              | 0               | 0           | 0         | 0      | 0          | 0          |
| <b>Fläche mit Bodenerosion etc.</b>                      |               |                  |                       |                    |              |           |        |            |             |                |                 |             |           |        |            |            |
| Wert   | % von ha      |                  |                       |                    | 0            | 0,14      | 0,6    | 0          | 0           | 0              | 0               | 0           | 0         | 0      | 0          | 0          |
| <b>Zeitfaktor f<sub>zeit</sub> besondere Belastungen</b> |               |                  |                       |                    |              |           |        |            |             |                |                 |             |           |        |            |            |
| Wert   | -             |                  |                       |                    | 0            | 1         | 1      | 0          | 0           | 0              | 0               | 0           | 0         | 0      | 0          | 0          |
| <b>Anteil PM63 besondere Belastungen</b>                 |               | normal           | individuell           |                    |              |           |        |            |             |                |                 |             |           |        |            |            |
| Wert   | -             | 0,33             |                       |                    | 0,33         | 0,33      | 0,33   | 0,33       | 0,33        | 0,33           | 0,33            | 0,33        | 0,33      | 0,33   | 0,33       | 0,33       |
| <b>Faktor bei fehlender Randbebauung f<sub>RB</sub></b>  |               | Autobahn         | breite Seitenstreifen | Lärmschutzwände    |              |           |        |            |             |                |                 |             |           |        |            |            |
| Wert AFS <sub>ges</sub>                                  | -             | 0,4              | 0,75                  | 1                  | 0,4          | 0,4       | 0,4    | 0,4        | 0,75        | 0,75           | 0,875           | 0,4         | 0,4       | 0,4    | 0,4        | 0,4        |
| Wert PM63  | -             | 0,17             | 0,5                   | 0,9                | 0,17         | 0,17      | 0,17   | 0,17       | 0,5         | 0,5            | 0,7             | 0,17        | 0,17      | 0,17   | 0,17       | 0,17       |
| <b>Faktor Straßenreinigung f<sub>SR</sub></b>            |               | täglich          | wöchentlich           | keine              |              |           |        |            |             |                |                 |             |           |        |            |            |
| Wert AFS <sub>ges</sub>                                  | -             | 0,5              | 0,75                  | 1                  | 1            | 0,75      | 0,75   | 1          | 1           | 1              | 1               | 1           | 1         | 1      | 1          | 1          |
| Wert PM63  | -             | 0,8              | 0,9                   | 1                  | 1            | 0,9       | 0,9    | 1          | 1           | 1              | 1               | 1           | 1         | 1      | 1          | 1          |
| <b>Benetzungs-, Mulden-, Verdunstungsverlust</b>         |               | normal           | individuell           |                    |              |           |        |            |             |                |                 |             |           |        |            |            |
| Wert   | -             | 0,8              |                       |                    | 0,8          | 0,8       | 0,8    | 0,8        | 0,9         | 0,9            | 0,9             | 0,8         | 0,8       | 0,927  | 0,8        | 0,8        |
| <b>h<sub>N</sub></b>                                     |               | Mittelwert D     | individuell           |                    |              |           |        |            |             |                |                 |             |           |        |            |            |
| Wert   | mm/a          | 800              |                       |                    | 800          | 800       | 800    | 800        | 535         | 454            | 471             | 800         | 780       | 656    | 800        | 1400       |

Ein weiterer Vergleich wird mit den Angaben aus Tabelle 2-5 vorgenommen: Hier sind zwar keine Feststoffkonzentrationen, aber die Feststoffdeposition zweier hoch belasteter Autobahnen in Berlin angegeben, der A 113 neu mit ca. 103.000 DTV (Verkehrszählung von 2008) und der A 100, die meist befahrene Straße Deutschlands, mit im Durchschnitt 170.000 DTV. Das gemessene Feststoffaufkommen dort ist enorm, 5.927 kg/(ha·a) an der A 113 neu und 4.560 kg/(ha·a) an der A 100 [Fuchs et al., 2010b].

Der gemessene Wert von 5.927 kg/(ha·a) für die A 113 neu konnte rechnerisch nicht nachgewiesen werden, es ergaben sich 3.144 kg/(ha·a). Eventuell führten die festgestellten massiven Betonschäden zu einem erhöhten Fahrbahnabrieb [Kurpjuweit, 2010].

Für die A 100 wurden 3.891 kg/(ha·a) berechnet. Eventuell führt ein gestörter Verkehrsfluss, was aufgrund der Verkehrsdichte anzunehmen ist, tatsächlich zu mehr Abrieb.

In drei Messprogrammen wurden auch PM63 systematisch gemessen, siehe Bild 5-7. Nur in einer Studie (Kirchhorst) stimmen der gemessene und der berechnete Wert überein. In Sinsheim und Großburgwedel weichen gemessene und errechnete Werte stark voneinander ab.

Hier wären noch weitere Untersuchungen wünschenswert, um mehr Erkenntnisse über das Aufkommen und vor allem Verhalten feiner Feststoffe zu erlangen.

Als erste Näherung ist die Annahme der PM63-Anteile jedoch geeignet, den Anfall feiner Feststoffe auf Autobahnen abzuschätzen.

### 5.1.3 Parkplatzabflüsse

Als Referenzparkplatz wird ein Supermarktparkplatz mit einer Parkplatzfläche von 2.800 m<sup>2</sup> gewählt. Die Anzahl der Stellflächen beträgt 100. Somit werden 10 „Felder“ angenommen und es ergibt sich nach der Formel für die Verkehrsart  $f_{\text{Verkehr}} = (9 + n)/n$  der Faktor  $f_{\text{Verkehr}} = 1,9$ . Die DTV wurde abhängig von der angenommenen Verkaufsfläche von 1.180 m<sup>2</sup> zu 800 mit 1% LKW-Verkehr abgeschätzt [Feirreira-Pereira, 2013]. Mit den Eingabewerten nach Tabelle 5-6 ergibt sich ein Feststoffaufkommen von 306 kg/(ha·a) bzw. ein PM63-Aufkommen von 143 kg/(ha·a), und eine Niederschlagsabflusskonzentration bei mittleren hydrologischen Gegebenheiten von 47,8 mg/l bzw. 22,4 mg/l PM63.

Tabelle 5-6: Eingabeparameter zur Berechnung des AFS<sub>ges</sub> und des PM63 in Parkplatzabflüssen

| Anteil  | Einheit       | Autobahn-<br>rastplatz | Supermarkt-<br>parkplatz | Vorschläge   |                      |                    |
|---|---------------|------------------------|--------------------------|--|----------------------|--------------------|
| <b>Staubniederschlag</b>                                |               |                        |                          | ländlich   | städtisch            | Industrie          |
| Wert  | kg/(ha*a)     | 71                     | 71                       | 38   | 71                   | 343                |
| <b>Pollen</b>   |               |                        |                          | normal   | hoch                 |                    |
| Wert  | kg/(ha*a)     | 400                    | 400                      | 400  | 750                  |                    |
| <b>Anteil PM63 in SN und Pollen</b>                     |               |                        |                          | normal   | individuell          |                    |
| Wert  | -             | 0,8                    | 0,8                      | 0,8  |                      |                    |
| <b>Jahreszeitfaktor für Pollen</b>                      |               |                        |                          | Jahresmittel                                       | Vegetationszeit      | individuell        |
| Wert  | -             | 0,33                   | 0,33                     | 0,33   | 1                    |                    |
| <b>Vegetationsfaktor</b>                                |               |                        |                          | keine Vegetation                                   | normal               | komplett belaubt   |
| Wert  | -             | 0,33                   | 0,33                     | 0  | 0,33                 | 1                  |
| <b>Verkehrsbedingter Abrieb</b>                         |               |                        |                          | normal   | individuell          |                    |
| Wert PKW  | kg/(ha*a)*PKW | 0,1                    | 0,1                      | 0,1  |                      |                    |
| Wert LKW  | kg/(ha*a)*LKW | 1                      | 1                        | 0,5  |                      |                    |
| <b>Verkehrsbelastung</b>                                |               |                        |                          | Autobahnrastplatz                                  | Supermarkt           | individuell        |
| DTV   | Fahrzeuge/d   | 2.000                  | 800                      |  |                      |                    |
| Anteil LKW  |               | 0,30                   | 0,01                     | 0,30   | 0,01                 | 0 bis 0,2          |
| PKW   | Fahrzeuge/d   | 1.400                  | 792                      |  |                      |                    |
| LKW   | Fahrzeuge/d   | 600                    | 8                        |  |                      |                    |
| <b>Anteil PM63 Verkehrsabrieb</b>                       |               |                        |                          | normal   | individuell          |                    |
| Wert  | -             | 0,22                   | 0,22                     | 0,22   |                      |                    |
| <b>GB<sub>Winter</sub></b>                              |               |                        |                          | Frostindexzone I                                   | Frostindexzone II    | Frostindexzone III |
| Wert  | kg/(ha*a)     | 1.000                  | 1.000                    | 500  | 1.000                | 1.500              |
| <b>DTV-bezogener Fahrbahnabrieb, Winter</b>             |               |                        |                          | normal   | individuell          |                    |
| Wert  | kg/(ha*a)*DTV | 0,03                   | 0,03                     | 0,03   |                      |                    |
| <b>Anteil PM63 Verkehrsabrieb Winter</b>                |               |                        |                          | bei Salzstreuung                                   | ohne Streueung       |                    |
| Wert  | -             | 0,4                    | 0,4                      | 0,4  | 0,22                 |                    |
| <b>Jahreszeitfaktor f<sub>JW</sub></b>                  |               |                        |                          | normaler Winter                                    | individuell          |                    |
| Wert  | -             | 0,25                   | 0,25                     | 0,25   |                      |                    |
| <b>Faktor Verkehrsart f<sub>Kr</sub></b>                |               |                        |                          | Rechnung   | Fahrbahn             | Parkplatz          |
| Wert  | -             | 1,21                   | 1,90                     | (10+(n-1)*1)/n                                     | 1                    | 10                 |
| <b>PKW-Stellflächen</b>                                 | -             | 85                     | 100                      |  |                      |                    |
| <b>LKW-Stellflächen</b>                                 | -             | 84                     | 0                        |  |                      |                    |
| <b>Felder n</b>   | -             | 42,1                   | 10                       | Rechnung: PKW-Stellflächen/10+LKW-Stellflächen/2,5 |                      |                    |
| <b>Faktor Anzahl Fahrspuren</b>                         |               |                        |                          | Parkplatz  |                      |                    |
| Wert  | -             | 0,5                    | 0,5                      | 0,5  |                      |                    |
| <b>Faktor bei fehlender Randbebauung f<sub>RB</sub></b> |               |                        |                          | Parkplatz  | Lärmschutzwände etc. |                    |
| Wert AFS <sub>ges</sub>                                 | -             | 0,9                    | 0,9                      | 0,9  | 1                    |                    |
| Wert PM63   | -             | 0,75                   | 0,75                     | 0,75   | 0,9                  |                    |
| <b>Faktor Straßenreinigung f<sub>SR</sub></b>           | -             |                        |                          | täglich  | wöchentlich          | keine              |
| Wert AFS <sub>ges</sub>                                 | -             | 0,75                   | 0,75                     | 0,5  | 0,75                 | 1                  |
| Wert PM63   | -             | 0,9                    | 0,9                      | 0,8  | 0,9                  | 1                  |
| <b>Benetzungs-, Mulden-, Verdunstungsverlust</b>        |               |                        |                          | normal   | individuell          |                    |
| Wert  | -             | 0,8                    | 0,8                      | 0,8  |                      |                    |
| <b>h<sub>N</sub></b>                                    |               |                        |                          | Mittelwert D                                       | individuell          |                    |
| Wert  | mm/a          | 800                    | 800                      | 800  |                      |                    |

Als weiterer Referenzparkplatz wurde eine typische Autobahnraststätte gewählt. In Deutschland gab es im Jahr 2010 entlang der rund 12.800 Autobahn-Kilometer 431

bewirtschaftete Rastanlagen mit Tankstellen, Raststätten sowie Motels sowie 1.550 unbewirtschaftete Rastanlagen [BfVBS, 2011]. Für den Referenzparkplatz wird eine bewirtschaftete Autobahnraststätte (Raststätte Taunusblick an der A 5 westlich von Frankfurt) mit 85 PKW-Stellplätzen ( $A = 2.000 \text{ m}^2$ ) sowie 80 LKW- und 4 Busparkplätzen (ca.  $8.500 \text{ m}^2$ ) gewählt. Aus den Angaben lassen sich etwa  $25 \text{ m}^2$  pro PKW-Stellplatz ermitteln sowie etwa  $100 \text{ m}^2$  je LKW-Parkplatz bzw. 42 Felder n. Die Gesamtfläche der Rastanlage beträgt etwa 40 ha, die befestigte Fläche etwa 27 ha. Die DTV wurde mit Hilfe einer Verkehrszählung zu 2.000 abgeschätzt, davon waren 600 LKW [Schumacher, 2013]. Nach der Formel für die Verkehrsart  $f_{\text{Verkehr}} = (9 + n)/n$  lässt sich 1,21 errechnen. Mit den Eingabewerten nach Tabelle 5-6 ergibt sich ein Feststoffaufkommen von  $555 \text{ kg}/(\text{ha}\cdot\text{a})$  bzw. PM63-Aufkommen von  $195 \text{ kg}/(\text{ha}\cdot\text{a})$ , und eine Niederschlagsabflusskonzentration von  $86,8 \text{ mg/l}$  bzw.  $31 \text{ mg/l}$  PM63.

### 5.1.3.1 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse wurde anhand des Supermarktparkplatzes durchgeführt. Da die Verkehrsbelastung des Autobahnrastplatzes ähnlich wie die einer städtischen Straße ist und die gleiche Formel verwendet wird, ist hier eine weitere Analyse nicht notwendig. Die Verkehrsbelastung des Supermarktplatzes dagegen ist wesentlich geringer. Das Feststoffaufkommen wurde anhand einer 10%igen Erhöhung der in Tabelle 4-8 verwendeten Parameter berechnet und in Bild 5-8 dargestellt.

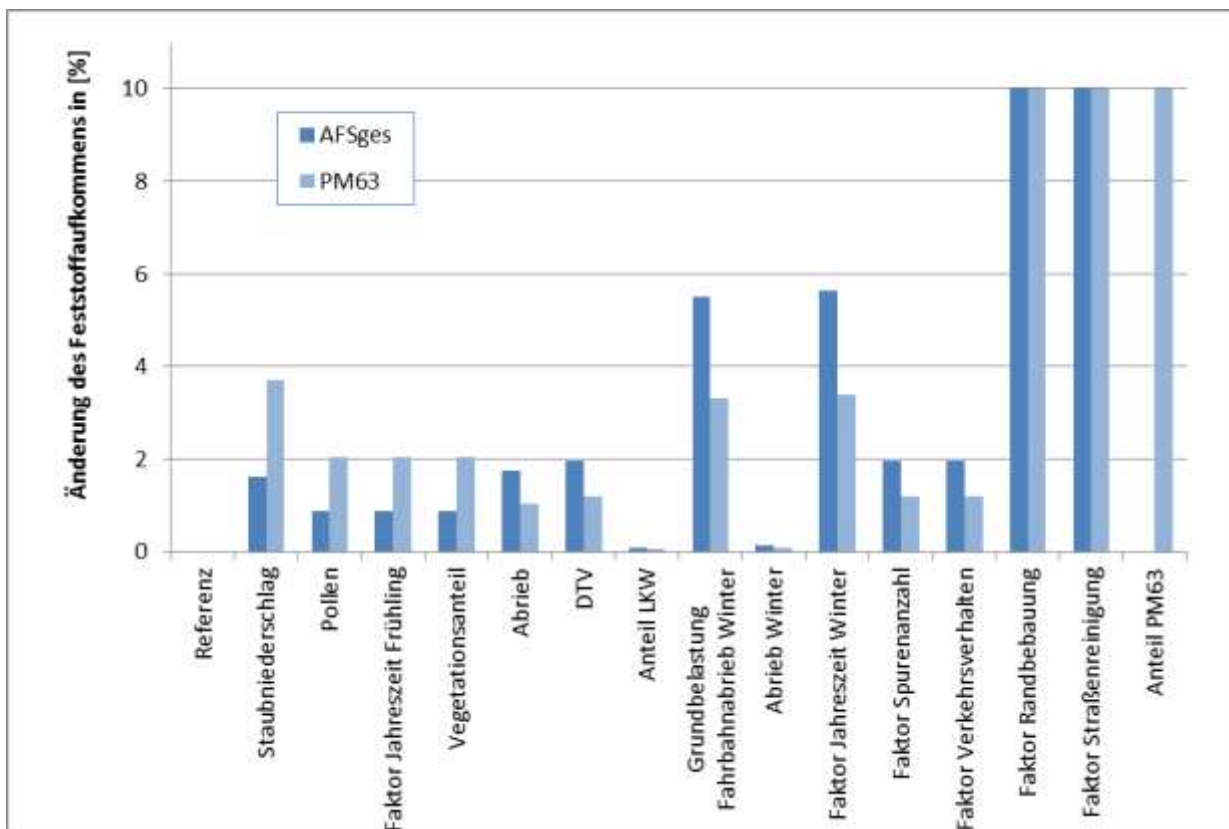


Bild 5-8: Änderung des Feststoffaufkommens auf (Supermarkt-)Parkplätzen nach Erhöhung der Eingabeparameter um 10%

Da das Verkehrsaufkommen mit angenommenen 800 DTV insgesamt geringer als bei Straßen oder gar Autobahnen, macht sich die Erhöhung der Eingabewerte, die die Fahrzeuganzahl oder den Abrieb betreffen, um 10% nur um maximal 2% bemerkbar. Die Erhöhung des Staubbiederschlags um 10% wirkt sich als 4%ige Erhöhung des PM63-Aufkommens aus. Am deutlichsten bewirken eine Erhöhung der Parameter, die die gesamte Fläche - unabhängig vom Verkehr - betreffen, eine Erhöhung des Feststoffaufkommens. Die prozentuale Anhebung der Faktoren „Randbebauung“ und „Straßenreinigung“ sowie der angenommene Anteil der PM63 bewirkt eine Erhöhung des Feststoffaufkommens um jeweils den selben Prozentsatz.

In Bild 5-9 sind die Ergebnisse der Variation der Eingabeparameter, an mögliche Randbedingungen von Parkplätzen angepasst, dargestellt. Da die Belastung insgesamt relativ gering ist, machen sich Einträge die gesamte Fläche betreffend am stärksten bemerkbar. Dies gilt in absteigender Rangfolge für den Anschluss unbefestigter Flächen, eine hohe Staubbelastung, bei hohem Anteil an Verwehungen, für AFS<sub>ges</sub>, wenn keine Frostperioden vorhanden sind und für PM63, wenn dieser Anteil verändert wird oder die Pollenbelastung hoch ist.

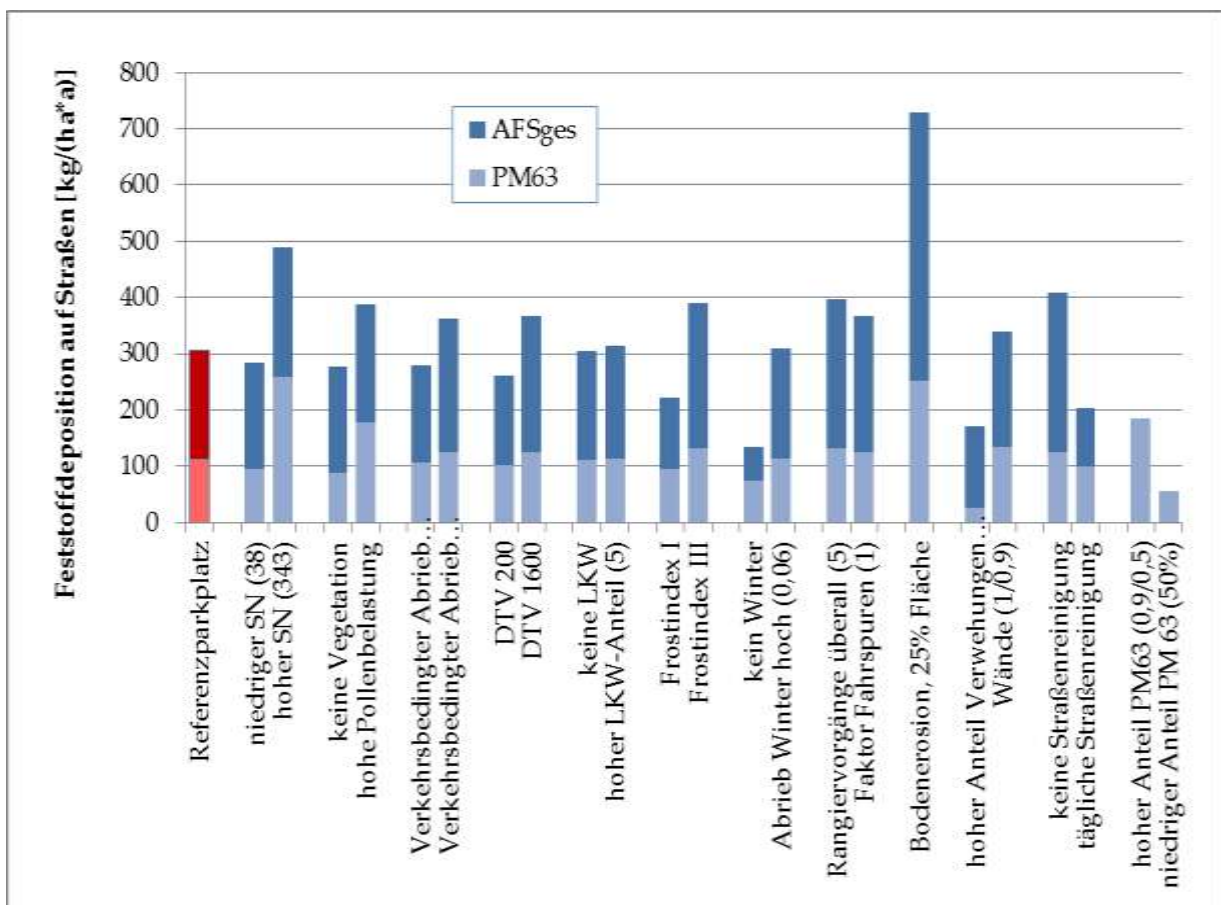


Bild 5-9: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die Berechnung des Feststoffaufkommens auf (Supermarkt-)Parkplätzen, in Klammern die Eingabewerte



Die Veränderung des Straßenreinigungsintervalls macht sich vor allem auf den  $AFS_{ges}$  bemerkbar.

Die Veränderung von Parametern, die nur die Verkehrsbelastung betreffen (Faktor Verkehrsart, Faktor Fläche, Annahme Abrieb und die DTV) wirken sich dagegen aufgrund der geringen DTV kaum auf das Feststoffaufkommen aus.

### 5.1.3.2 Verifizierung

Leider wurden außer in zwei Studien [Tiefenthaler et al., 2001] und [Neary et al., 2002] keine Aussagen über die Fahrzeugbelastung (DTV) gemacht. Die Angabe der Anzahl der Stellplätze [McQueen, 2008] allein reicht nicht, um die Belastung tatsächlich zu beurteilen. So blieben drei Studien zur Verifizierung. Mit der Angabe über die Frequentierung [Grotehusmann und Kasting, 2002] wurden die DTV für nachfolgende Verifizierung abgeschätzt, vgl. Tabelle 5-7, hier ist naturgemäß die Fehlerquelle hoch.

Die Niederschläge waren nicht angegeben, so wurden die durchschnittlichen Niederschläge des betreffenden Gebietes im Beprobungszeitraum zu Grunde gelegt und auf ein Jahr in [mm/a] hochgerechnet, vgl. Tabelle 5-7. In der Studie aus Long Beach, Kalifornien, wurden künstliche Niederschläge entsprechend typischer kalifornischer Niederschlagsintensitäten verwendet, insofern wurden auch hier durchschnittliche Niederschläge dieser Gegend verwendet.

In Bild 5-10 sind die Ergebnisse der Verifizierung dargestellt.

Mit dem Eingabeparameter für verkehrsbedingten Abrieb von LKW auf Straßen in der Höhe von  $0,5 \text{ kg}/(\text{ha}\cdot\text{a}\cdot\text{LKW})$  waren die Unterschiede zwischen Feststoffabflüssen bei LKW-belasteten Parkplätzen zunächst sehr hoch. Das Bremsen und Starten scheint insbesondere bei LKW mehr Abrieb zu verursachen, als zunächst angenommen. Der Wert wurde daher auf  $1,0 \text{ kg}/(\text{ha}\cdot\text{a}\cdot\text{LKW})$  angehoben.

Der berechnete Größenbereich des  $AFS_{ges}$  stimmt jeweils mit dem gemessenen überein. Diskrepanzen lassen sich mit den getroffenen Annahmen (Niederschläge, DTV, Straßenreinigung, Anschluss unbefestigter Flächen, Baumbestand, Staubbiederschlag etc.) begründen.

Tabelle 5-7: Eingabeparameter zur Berechnung des AFS<sub>ges</sub> und des PM63 in Parkplatzabflüssen

| Anteil  | Einheit  | Vorschläge         |                      |                     | Long   | Cooke-    | Cooke-    | Garbsen, | Garbsen, | Allertal |
|---|--|--------------------|----------------------|---------------------|--|-----------|-----------|----------|----------|----------|
|   |  |                    |                      |                     | Beach  | ville PP1 | ville PP2 | LKW      | PKW      |          |
| <b>Staubniederschlag</b>                                      |  | ländlich           | städtisch            | Industrie           |  |           |           |          |          |          |
| Wert  | kg/(ha*a)  | 38                 | 71                   | 343                 | 71   | 71        | 71        | 71       | 71       | 71       |
| <b>Pollen</b>   |  | normal             | hoch                 |                     |  |           |           |          |          |          |
| Wert  | kg/(ha*a)  | 400                | 750                  |                     | 400  | 400       | 400       | 400      | 400      | 400      |
| <b>Anteil PM63 in SN und Pollen</b>                           |  | normal             | individuell          |                     |  |           |           |          |          |          |
| Wert  | -  | 0,8                |                      |                     | 0,8  | 0,8       | 0,8       | 0,8      | 0,8      | 0,8      |
| <b>Jahreszeitfaktor für Pollen</b>                            |  | Jahresmittel       | Vegetationszeit      | individuell         |  |           |           |          |          |          |
| Wert  | -  | 0,33               | 1                    |                     | 0,33   | 0,14      | 0,14      | 0,33     | 0,33     | 0,33     |
| <b>Vegetationsfaktor</b>                                      |  | keine Vegetation   | normal               | komplett belaubt    |  |           |           |          |          |          |
| Wert  | -  | 0                  | 0,33                 | 1                   | 0,33   | 0,33      | 0,33      | 0,33     | 0,33     | 0,33     |
| <b>Verkehrsbedingter Abrieb</b>                               |  | normal             | Parkplatz            |                     |  |           |           |          |          |          |
| Wert PKW  | kg/(ha*a)*PKW  | 0,1                | 0,1                  |                     | 0,1  | 0,1       | 0,1       | 0,1      | 0,1      | 0,1      |
| Wert LKW  | kg/(ha*a)*LKW  | 0,5                | 1,0                  |                     | 1,0  | 1,0       | 1,0       | 1,0      | 1,0      | 1,0      |
| <b>Verkehrsbelastung</b>                                      |  | Autobahn-rastplatz | Supermarkt           | individuell         |  |           |           |          |          |          |
| DTV   | Fahrzeuge/d  |                    |                      |                     | 100  | 76        | 28        | 320      | 2.800    | 2.400    |
| <b>Anteil LKW</b>   |  | 0,2 bis 0,3        | 0,01                 | 0 bis 1             | 0,01   | 0,01      | 0,01      | 1        | 0        | 0,2      |
| PKW   | Fahrzeuge/d  |                    |                      |                     | 99   | 75        | 28        | 0        | 2.800    | 1.920    |
| LKW   | Fahrzeuge/d  |                    |                      |                     | 1  | 1         | 0         | 320      | 0        | 480      |
| <b>Anteil PM63 Verkehrsabrieb</b>                             |  | normal             | individuell          |                     |  |           |           |          |          |          |
| Wert  | -  | 0,22               |                      |                     | 0,22   | 0,22      | 0,22      | 0,22     | 0,22     | 0,22     |
| <b>GB<sub>winter</sub></b>                                    |  | Frostindex-zone I  | Frostindex-zone II   | Frostindex-zone III |  |           |           |          |          |          |
| Wert  | kg/(ha*a)  | 500                | 1.000                | 1.500               | 0  | 500       | 500       | 500      | 500      | 500      |
| <b>DTV-bezogener Fahrbahnabrieb, Winter</b>                   |  | normal             | individuell          |                     |  |           |           |          |          |          |
| Wert  | kg/(ha*a)*DTV  | 0,03               |                      |                     | 0  | 0,03      | 0,03      | 0,03     | 0,03     | 0,03     |
| <b>Anteil PM63 Verkehrsabrieb Winter</b>                      |  | bei Salzstreuung   | ohne Streeung        |                     |  |           |           |          |          |          |
| Wert  | -  | 0,4                | 0,22                 |                     | 0,22   | 0,4       | 0,4       | 0,4      | 0,4      | 0,4      |
| <b>Jahreszeitfaktor f<sub>JW</sub></b>                        |  | normaler Winter    | individuell          |                     |  |           |           |          |          |          |
| Wert  | -  | 0,25               |                      |                     | 0  | 0,57      | 0,67      | 0,25     | 0,25     | 0,25     |
| <b>Faktor Verkehrsart f<sub>Verkehr</sub></b>                 |  | Rechnung           | Fahrbahn             | Parkplatz           |  |           |           |          |          |          |
| Wert  | -  | (9+n)/n            | 1                    | 10                  | 1,60   | 1,14      | 1,86      | 1,51     | 1,51     | 1,25     |
| <b>PKW-Stellflächen</b>                                       | -  |                    |                      |                     | 150  | 635       | 105       | 0        | 175      | 116      |
| <b>LKW-Stellflächen</b>                                       | -  |                    |                      |                     | 0  | 0         | 0         | 44       | 0        | 62       |
| <b>Felder n</b>   | Rechnung: PKW-Stellflächen/10 + LKW-Stellflächen/2,5 |                    |                      |                     | 15   | 63,5      | 10,5      | 17,6     | 17,5     | 36,4     |
| <b>Faktor Anzahl Fahrspuren</b>                               |  | Parkplatz          |                      |                     |  |           |           |          |          |          |
| Wert  | -  | 0,5                |                      |                     | 0,5  | 0,5       | 0,5       | 0,5      | 0,5      | 0,5      |
| <b>Bodenerosion/Landwirtschaft/Bautätigkeiten</b>             |  | Bodenerosion       | Bau/LW               | Sonstiges           |  |           |           |          |          |          |
| Wert  | kg/(ha*a)  | 2.500              | bis über 10.000      | bis über 10.000     | 2.500  | 2.500     | 2.500     | 2.500    | 2.500    | 2.500    |
| <b>Fläche mit Bodenerosion etc.</b>                           |  |                    |                      |                     |  |           |           |          |          |          |
| Wert  | % von ha   |                    |                      |                     | 0  | 0         | 0         | 0,05     | 0        | 0        |
| <b>Zeitfaktor f<sub>Zeit</sub> besondere Belastungen</b>      |  |                    |                      |                     |  |           |           |          |          |          |
| Wert  | -  |                    |                      |                     | 0  | 0         | 0         | 1        | 0        | 0        |
| <b>Anteil PM63 besondere Belastungen</b>                      |  | normal             | individuell          |                     |  |           |           |          |          |          |
| Wert  | -  | 0,33               |                      |                     | 0,33   | 0,33      | 0,33      | 0,33     | 0,33     | 0,33     |
| <b>Faktor bei fehlender Randbebauung f<sub>RB</sub></b>       |  | Parkplatz          | Lärmschutzwände etc. |                     |  |           |           |          |          |          |
| Wert AFS <sub>ges</sub>                                       | -  | 0,9                | 1                    |                     | 0,9  | 0,9       | 0,9       | 0,9      | 0,9      | 0,9      |
| Wert PM63   | -  | 0,75               | 0,9                  |                     | 0,75   | 0,75      | 0,75      | 0,75     | 0,75     | 0,75     |
| <b>Faktor Straßenreinigung f<sub>SR</sub></b>                 |  | täglich            | wöchentlich          | keine               |  |           |           |          |          |          |
| Wert AFS <sub>ges</sub>                                       | -  | 0,5                | 0,75                 | 1                   | 1  | 1         | 1         | 1        | 1        | 1        |
| Wert PM63   | -  | 0,8                | 0,9                  | 1                   | 1  | 1         | 1         | 1        | 1        | 1        |
| <b>Faktor Retention im Gully-/Kanalsystem f<sub>Ret</sub></b> |  | zentral            | dezentral            |                     |  |           |           |          |          |          |
| Wert AFS <sub>ges</sub>                                       | -  | 0,6                | 1                    |                     | 1  | 1         | 1         | 1        | 1        | 1        |
| Wert PM63   | -  | 0,8                | 1                    |                     | 1  | 1         | 1         | 1        | 1        | 1        |
| <b>Benetzungs-, Mulden-, Verdunstungsverlust</b>              |  | normal             | individuell          |                     |  |           |           |          |          |          |
| Wert  | -  | 0,8                |                      |                     | 0,8  | 0,8       | 0,8       | 0,8      | 0,8      | 0,8      |
| <b>h<sub>N</sub></b>  |  | Mittelwert D       | individuell          |                     | Jahresmittelwert oder hochgerechnet über N im Zeitraum der Messung |           |           |          |          |          |
| Wert  | mm/a   | 800                |                      |                     | 450  | 1128      | 1136      | 641      | 641      | 800      |

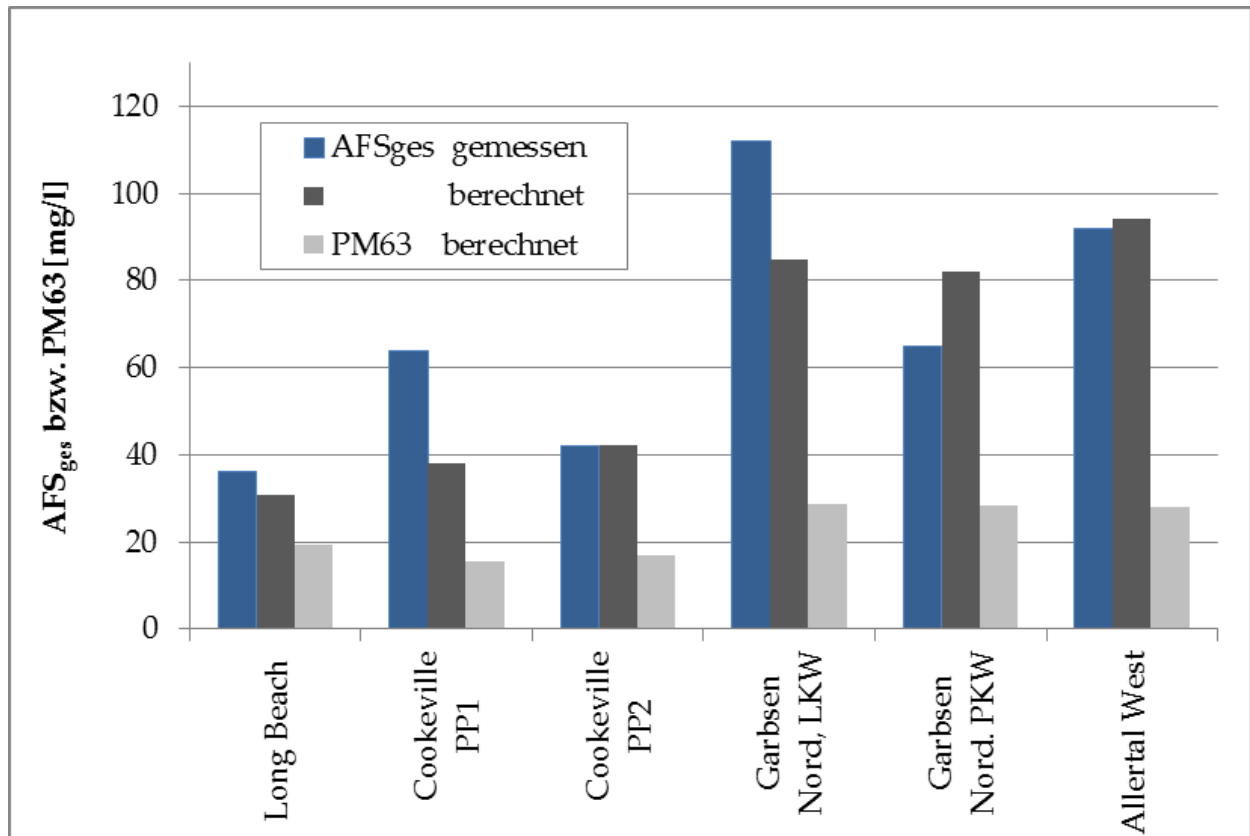


Bild 5-10: Verifizierung zur Berechnung von Parkplatzabflüssen

Insbesondere bei Autobahnraststätten an stark befahrenen Autobahnen wird abhängig von der Windrichtung eventuell auch der Staubbiederschlag höher als angenommen sein. Dies lassen die Untersuchungen der BAST vermuten, die einen erhöhten Staubbiederschlag in bis zu 150 m Entfernung an drei untersuchten Autobahnen mit etwa 70.000 DTV feststellen konnten [Bast, 2010 und 2011].

Die Ergebnisse der anderen Studien mit einer repräsentativen Probenanzahl lagen im Bereich von 44 bis 86 mg/l, also vergleichbar mit den berechneten Ergebnissen der Referenzparkplätze (47,8 bzw. 86,8 mg/l).

An PM63 lagen leider keine Messwerte vor.

Parkplatzabflüsse sind aufgrund der relativ großen Fläche und somit Verdünnung der Stoffe relativ gering mit Feststoffen belastet und bezüglich dieses Parameters als unkritisch zu bewerten. Dies gilt nicht für reine LKW-Parkplätze, die vermutlich durch erhöhten Abrieb stärker belastet sind.

Dies gilt auch nicht für andere Parameter, wie für MKW, die als Tropfverluste auch vom ruhenden Verkehr ausgehen können, oder für Ammonium-Stickstoff, das in Parkplatzabflüssen gerade an Autobahnen in höheren Konzentrationen gemessen wurde [Grotehusmann und Kasting, 2002].

## 5.2 Dachabflüsse

Zur Berechnung des AFS<sub>ges</sub>- und PM63-Aufkommens auf Dachflächen mit Hilfe von Formel 3.2 wurden die Auswahlparameter nach Tabelle 5-8 herangezogen.

Tabelle 5-8: Auswahlparameter zur Berechnung des AFS<sub>ges</sub> und PM63 in Dachabflüssen

| Anteil   | Einheit   | Eingabe     | Vorschläge       |                 |                  |
|--|-----------|-------------|------------------|-----------------|------------------|
| <b>Staubniederschlag</b>                         |           |             | ländlich         | städtisch       | Industrie        |
| <b>Wert</b>                                      | kg/(ha*a) | <b>71</b>   | 38               | 71              | 343              |
| <b>Pollen</b>                                    |           |             | normal           | hoch            |                  |
| <b>Wert</b>                                      | kg/(ha*a) | <b>400</b>  | 400              | 750             |                  |
| <b>Anteil PM63 in SN und Pollen</b>              |           |             | normal           | individuell     |                  |
| <b>Wert</b>                                      | -         | <b>0,8</b>  | 0,8              |                 |                  |
| <b>Jahreszeitfaktor für Pollen</b>               |           |             | Jahresmittel     | Vegetationszeit | individuell      |
| <b>Wert</b>                                      | -         | <b>0,33</b> | 0,33             | 1               |                  |
| <b>Vegetationsfaktor</b>                         |           |             | keine Vegetation | normal          | komplett belaubt |
| <b>Wert</b>                                      | -         | <b>0,33</b> | 0                | 0,33            | 1                |
| <b>Dachhöhe</b>                                  | m         |             | 10               | 20              | 30               |
| <b>Wert</b>                                      | -         | <b>1</b>    | 1                | 0,75            | 0,5              |
| <b>Dachabrieb</b>                                |           |             | kein             | normal          | viel             |
| <b>Wert</b>                                      | kg/(ha*a) | <b>144</b>  | 0                | 144             | 288              |
| <b>Anteil PM63 im Dachabrieb</b>                 |           |             | normal           |                 |                  |
| <b>Wert</b>                                      | -         | <b>0,5</b>  | 0,5              |                 |                  |
| <b>Anteil Dachflächen</b>                        |           |             | keine            | normal          | alle             |
| <b>Wert</b>                                      | -         | <b>0,8</b>  | 0                | 0,8             | 1                |
| <b>Benetzungs-, Mulden-, Verdunstungsverlust</b> |           |             | normal           | individuell     |                  |
| <b>Wert</b>                                      | -         | <b>0,9</b>  | 0,9              |                 |                  |
| <b>h<sub>N</sub></b>                             |           |             | Mittelwert D     | individuell     |                  |
| <b>Wert</b>                                      | mm        | <b>800</b>  | 800              |                 |                  |

Mit den in der Beispieltabelle gewählten Werten mit städtischer Hintergrundstaubbelastung, normaler Vegetation, geringer Dachhöhe und normalem Dachabrieb ergeben sich ca. 230 kg/(ha-a) Feststoffaufkommen und 150 kg/(ha-a) PM63-Aufkommen. Dieses Dach wird als „Referenzdach“ gewählt. Unter der Annahme eines jährlichen Niederschlags von 800 mm und eines Verlustbeiwertes von 0,9 betragen die Gesamtfeststoffkonzentration 31,9 mg/l und die PM63-Konzentration 20,7 mg/l.

## 5.2.1 Sensitivitätsanalyse

Die einzelnen Parameter wurden jeweils zu den gewählten Werten des Referenzdaches um 10% erhöht und die Veränderung des Feststoffaufkommens in [%] in Bild 5-11 dargestellt.

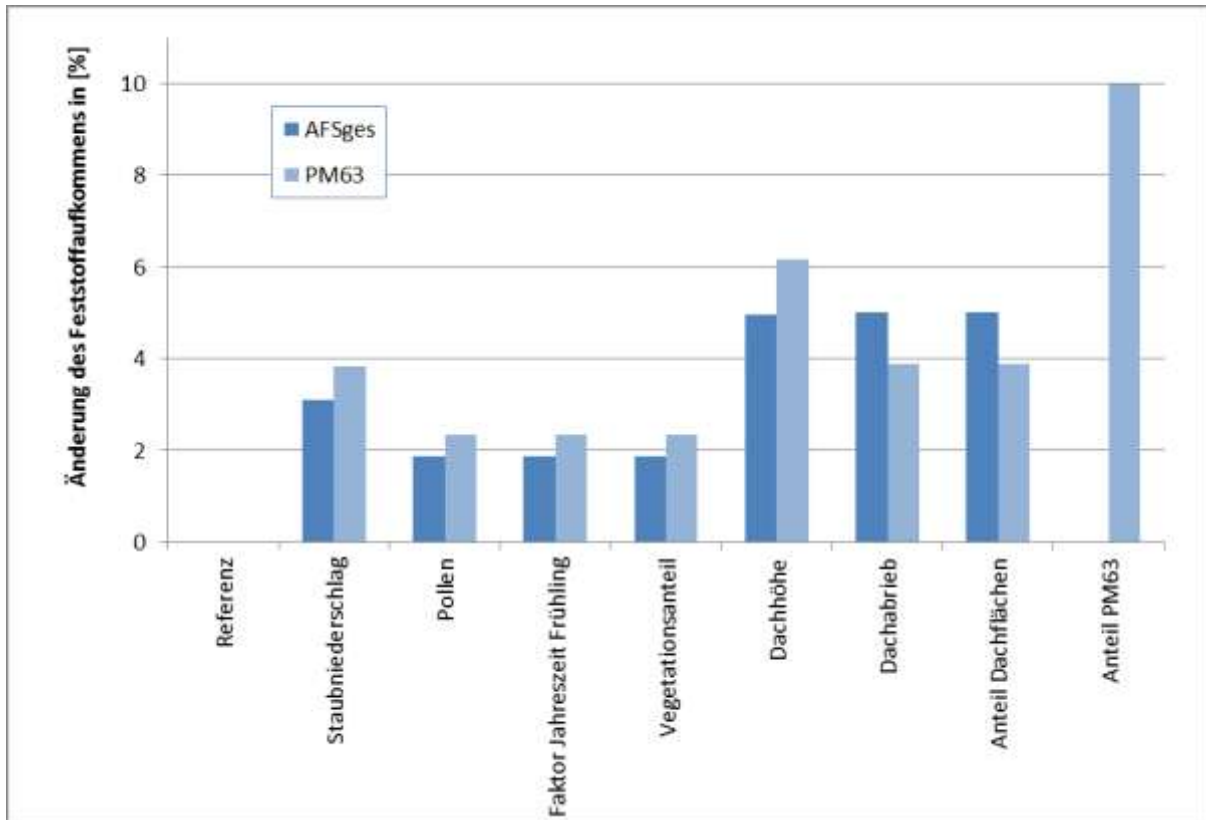


Bild 5-11: Änderung des Feststoffaufkommens auf Dachflächen nach Erhöhung der Eingabeparameter um 10%

Änderungen der Staub- und Pollenbelastung um 10% machen sich nur etwa um 2 bis 4% im Feststoff- und PM63-Aufkommen bemerkbar, allerdings wesentlich deutlicher als im Feststoffaufkommen auf Straßen oder Autobahnen. Änderungen in der Annahme der Dachhöhe, des Dachabriebs und des Anteils der durch Dachabrieb betroffenen Flächen machen sich mit etwa 5% etwas stärker bemerkbar. Die Annahme eines um 10% höheren PM63-Anteils macht sich naturgemäß um 10% Erhöhung im PM63-Aufkommen bemerkbar.

In einer weiteren Analyse wurden die Eingabeparameter innerhalb des realistischen Bereichs variiert. Die Auswirkungen auf das Feststoffaufkommen sind in Bild 5-12 dargestellt.

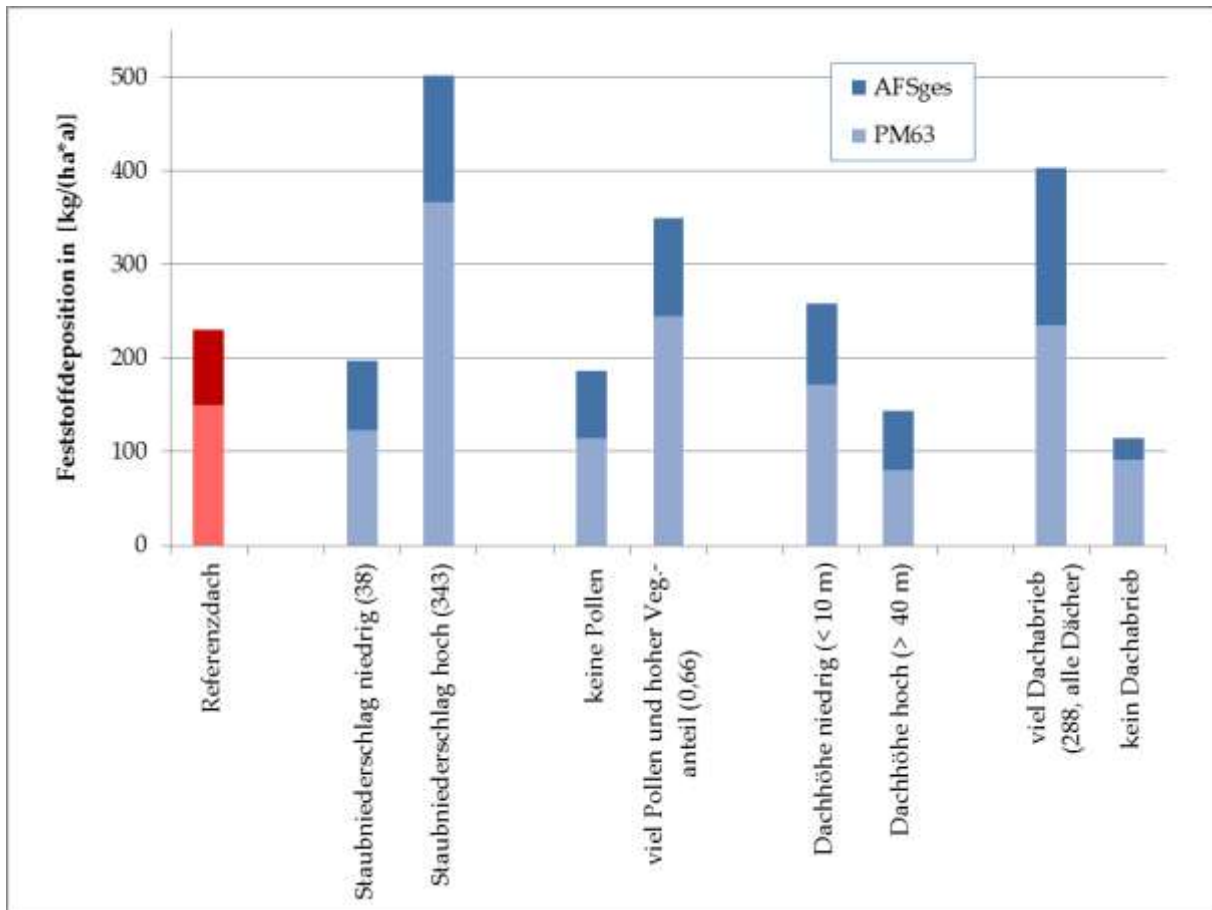


Bild 5-12: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die Berechnung des Feststoffaufkommens auf Dachflächen, in Klammern die Eingabewerte

Der Staubniederschlag beeinflusst demnach das Feststoffaufkommen auf Dachflächen maßgeblich, in industriebeeinflussten Einzugsgebieten kann er auf über den doppelten Wert ansteigen. Abgemindert wird das Feststoffaufkommen durch eine große Dachhöhe. Auch der Dachabrieb kann das Feststoffaufkommen insbesondere des groben Anteils deutlich beeinflussen. Die Annahme, ob das Einzugsgebiet stark oder nicht mit Pollen belastet wird, macht sich im Jahresmittelwert weniger bemerkbar.

## 5.2.2 Verifizierung

Die Verifizierung der Formeln 3.2 und 3.4 wurde mit Hilfe der in Kap. 4.2.2 beschriebenen Messkampagnen durchgeführt. Die Auswahl der Parameter wurde anhand der Beschreibungen getroffen. Wenn die Beschreibung nicht eindeutig war, wurden die Parameter abgeschätzt. Waren Niederschläge nicht angegeben, so wurden die durchschnittlichen Niederschläge des betreffenden Gebietes im Beprobungszeitraum zu Grunde gelegt.

Die Eingabeparameter zur Berechnung der AFS<sub>ges</sub>- und PM63-Konzentrationen sind in Tabelle 5-9 aufgelistet. In Bild 5-13 sind die Ergebnisse dargestellt.

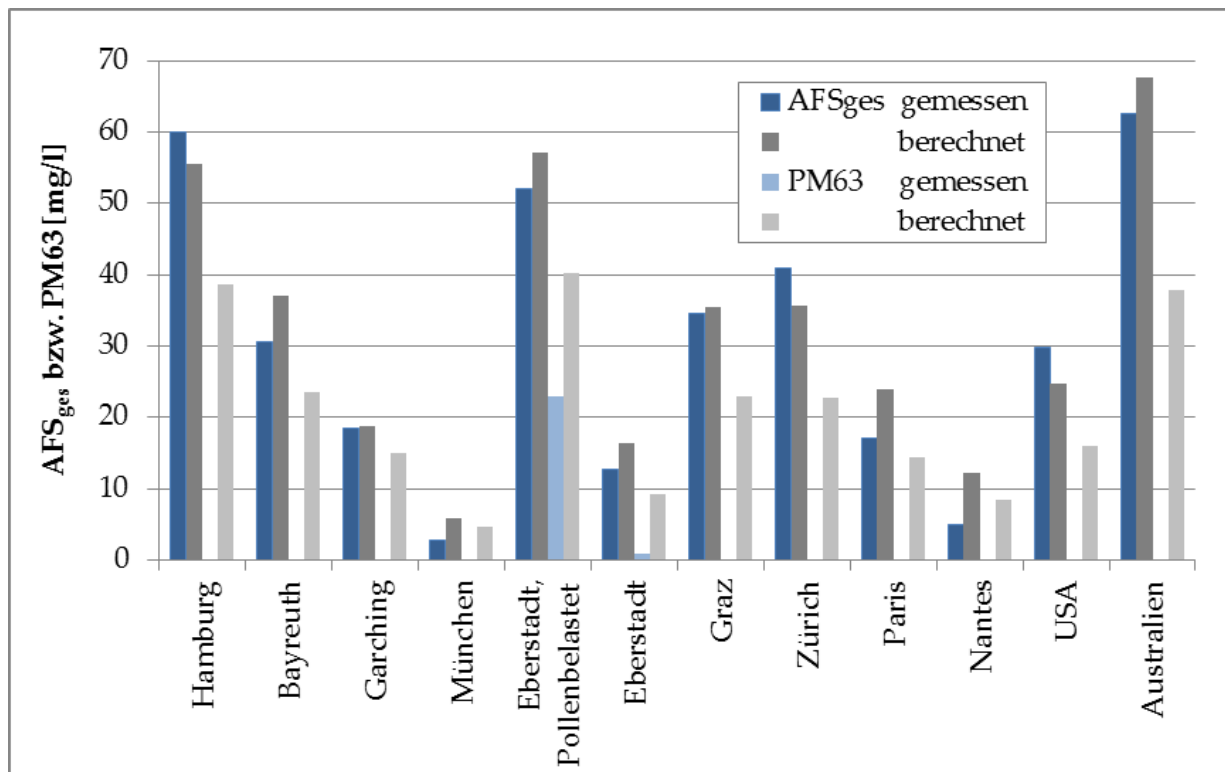


Bild 5-13: Verifizierung zur Berechnung von Dachabflüssen

Der Vergleich der berechneten mit den gemessenen AFS<sub>ges</sub>-Werten zeigt jeweils eine gute Übereinstimmung bezüglich des Größenbereichs (Abweichungen von  $\pm 0,2$  bis  $\pm 7,2$  mg/l). Prozentual die größten Abweichungen sind bei den Studien festzustellen, die zum einen sehr niedrige Messwerte ergaben (München und Nantes), zum anderen bei denen nur der Median der Messwerte publiziert wurde (Paris und Nantes), der i.d.R. unterhalb des Mittelwertes liegt. Auch eine geringe Anzahl an Proben führte teilweise zu größeren Abweichungen (Bayreuth, Eberstadt ohne Pollen, München, USA).

Leider gab es nur zwei PM63-Messwerte, der Probenumfang der Messreihe in Eberstadt ohne Pollenbelastung war zusätzlich mit  $n = 3$  sehr gering. Die gemessenen PM63 lagen jeweils weit unterhalb der berechneten. Dies liegt insbesondere daran, dass der theoretisch abgeleitete PM63-Anteil mit 0,8 angenommen wurde, der tatsächlich in der Studie gemessene Anteil lag bei 0,4 [Kreiling, 2012].



Tabelle 5-9: Eingabeparameter zur Berechnung des AFS<sub>ges</sub> und des PM63 in Dachabflüssen

| Anteil                                    | Einheit   | Vorschläge       |                 |                  | Hamburg | Bayreuth | Garching | München  | Eberstadt,<br>Pollen | Eberstadt | Graz | Zürich | Paris | Nantes | USA  | Australien |  |
|---|-----------|------------------|-----------------|------------------|---------|----------|----------|--|----------------------|-----------|------|--------|-------|--------|------|------------|--|
|   |           | ländlich         | städtisch       | Industrie        |         |          |          |  |                      |           |      |        |       |        |      |            |  |
| Staubniederschlag                         |           | ländlich         | städtisch       | Industrie        |         |          |          |  |                      |           |      |        |       |        |      |            |  |
| Wert                                      | kg/(ha*a) | 38               | 71              | 343              | 200     | 71       | 38       | 71   | 19                   | 19        | 71   | 71     | 71    | 71     | 71   | 71         |  |
| Pollen                                    |           | normal           | hoch            |                  |         |          |          |  |                      |           |      |        |       |        |      |            |  |
| Wert                                      | kg/(ha*a) | 400              | 750             |                  | 400     | 400      | 400      | 400  | 400                  | 0         | 400  | 400    | 400   | 400    | 400  | 400        |  |
| Anteil PM63 in SN und Pollen              |           | normal           | individuell     |                  |         |          |          |  |                      |           |      |        |       |        |      |            |  |
| Wert                                      | -         | 0,8              |                 |                  | 0,8     | 0,8      | 0,8      | 0,8  | 0,8                  | 0,8       | 0,8  | 0,8    | 0,8   | 0,8    | 0,8  | 0,8        |  |
| Jahreszeitfaktor für Pollen               |           | Jahresmittel     | Vegetationszeit | individuell      |         |          |          |  |                      |           |      |        |       |        |      |            |  |
| Wert                                      | -         | 0,33             | 1               |                  | 0,5     | 0,33     | 1        | 0,33   | 1                    | 1         | 0,5  | 0,66   | 0,33  | 0      | 0,33 | 0          |  |
| Vegetationsfaktor                         |           | keine Vegetation | normal          | komplett belaubt |         |          |          |  |                      |           |      |        |       |        |      |            |  |
| Wert                                      | -         | 0                | 0,33            | 1                | 0,33    | 0,33     | 0,33     | 0,167  | 0,33                 | 0,33      | 0,33 | 0,33   | 0,33  | 0,33   | 0,33 | 0,33       |  |
| Dachhöhe                                  | m         | 10               | 20              | 30               |         |          |          |  |                      |           |      |        |       |        |      |            |  |
| Wert                                      | -         | 1                | 0,75            | 0,5              | 0,825   | 0,825    | 1        | 0,5  | 1                    | 1         | 1    | 1      | 0,5   | 0,825  | 1    | 1          |  |
| Dachabrieb                                |           | kein             | normal          | viel             |         |          |          |  |                      |           |      |        |       |        |      |            |  |
| Wert                                      | kg/(ha*a) | 0                | 144             | 288              | 144     | 144      | 0        | 0  | 72                   | 72        | 144  | 288    | 144   | 144    | 144  | 288        |  |
| Anteil PM63 im Dachabrieb                 |           | normal           |                 |                  |         |          |          |  |                      |           |      |        |       |        |      |            |  |
| Wert                                      | -         | 0,5              |                 |                  | 0,5     | 0,5      | 0,5      | 0,5  | 0,5                  | 0,5       | 0,5  | 0,5    | 0,5   | 0,5    | 0,5  | 0,5        |  |
| Anteil Dachflächen                        |           | keine            | normal          | alle             |         |          |          |  |                      |           |      |        |       |        |      |            |  |
| Wert                                      | -         | 0                | 0,8             | 1                | 0,8     | 0,8      | 0,8      | 0  | 1                    | 1         | 1    | 0,66   | 0,8   | 0,25   | 0,8  | 1          |  |
| Benetzungs-, Mulden-, Verdunstungsverlust |           | normal           | individuell     |                  |         |          |          |  |                      |           |      |        |       |        |      |            |  |
| Wert                                      | -         | 0,9              |                 |                  | 0,9     | 0,9      | 0,9      | 0,9  | 0,9                  | 0,9       | 0,9  | 0,9    | 0,9   | 0,9    | 0,9  | 0,9        |  |
| h <sub>N</sub>                            |           | Mittelwert D     | individuell     |                  |         |          |          | Jahresmittelwert oder hochgerechnet über N im Zeitraum der Messung |                      |           |      |        |       |        |      |            |  |
| Wert                                      | mm/a      | 800              |                 |                  | 670     | 630      | 1008     | 900  | 434                  | 620       | 880  | 1086   | 800   | 860    | 1036 | 590        |  |

Weitere Interpretationen über den Feinanteil im Dachabfluss sind daher nicht möglich. Hier fehlen weitere Studien. Für eine Berechnung des PM63-Gehalts im Dachabfluss müsste der PM63-Anteil abhängig von der Belastungssituation (liegen Pollen vor? Ist mit Dachabrieb zu rechnen?) ermittelt werden. Um den Jahresmittelwert berechnen zu können, sind mindestens ein Jahr dauernde Messprogramme notwendig. Sinnvoll wäre es, den Staubbiederschlag parallel, und zwar  $SN_{\text{gesamt}}$  und PM63, zu messen und die Randbedingungen (Dachhöhe, Niederschläge, Vegetationszeiten und Anteil) genau zu dokumentieren.

Der  $AFS_{\text{ges}}$ -Gehalt lässt sich jedoch mit den Formeln 3.2 und 3.3 relativ genau berechnen.

### 5.3 Trenngebietsabflüsse

In größeren Einzugsgebieten werden die oben beschriebenen Flächenarten zusammengefasst und deren Niederschlagsabflüsse mit oder ohne Behandlung über Trenngebietsauslässe in ein Gewässer eingeleitet.

Bei der theoretisch zu erwartenden Feststoffdeposition muss der Betrachtungsort unterschieden werden: das Feststoffaufkommen am jeweiligen Anfallsort einzelner Flächen kann mittels Formel 3.3 berechnet werden. Hier werden die Feststoffaufkommen entsprechend ihres Anteils an der Gesamtfläche aufaddiert. Interessanter ist jedoch das Feststoffaufkommen am Trenngebietsauslass bzw. im Zulauf einer Behandlungsanlage. Hier müssen die unterschiedlichen möglichen Retentionsfaktoren gemäß Kap. 3.3.4 berücksichtigt werden. Die Feststoffkonzentration kann schließlich mittels Formel 3.4 berechnet werden, hier sind die unterschiedlichen Abflussbeiwerte für Verkehrs- und sonstigen Flächen sowie für Dachflächen und die Niederschlagshöhe zu berücksichtigen.

Vor der Sensitivitätsanalyse und der Verifizierung werden zunächst typische Verteilungen an Flächenanteilen (Dächer, Verkehrsflächen, sonstige versiegelte Flächen) ermittelt und analysiert. Die Beschreibung der Messprogramme liefert überwiegend keine Angaben über die Flächenverteilung, vermutlich, weil andere Fragestellungen im Vordergrund standen oder die exakte Flächenverteilung nicht genau bekannt war.

#### 5.3.1 Flächenanteile

Über den „Flächenverbrauch“ in Deutschland existieren detaillierte Statistiken, die jährlich erhoben werden [Statistisches Bundesamt, 2010]. Sowohl Verkehrsflächen als auch sogenannte Siedlungsflächen werden jedoch inklusive Freiflächen angegeben. In Verkehrsflächen sind Rad- und Gehwege, Mittelstreifen, Plätze etc. miterfasst, in Siedlungsflächen auch Freiflächen und Parks, somit ist diese Art der Statistik zur Ermittlung der Anteile undurchlässiger Flächen nicht anwendbar.

Die Auswertung von mehreren Einzugsgebieten bezüglich der befestigten Flächen zeigte, dass Gebiete ähnlicher Struktur große Spannweiten in der Flächenaufteilung aufweisen. Ein typisch städtisches oder ländliches Einzugsgebiet bezüglich der Flächenaufteilung ist daher nicht auszumachen.

Zusammengefasst aus den Untersuchungen, die im Anhang 1 ausführlicher dargestellt sind, lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

*Der Anteil der Verkehrsfläche an der versiegelten Gesamtfläche umfasst je nach Siedlungstyp eine große Spannweite. Er beträgt ca. 18 bis 22% in größeren Städten (Basel, Paris) ca. 18 bis 36 % in Bereichen mit reiner Wohnbebauung (Modellgebiete), 30 bis 40% in (klein-)städtischen Innenstadtbereichen (Kaiserslautern, Frankfurt) und bis zu 36 bis 50% in ländlichen Gebieten (Frankfurter Raum). Eine Untersuchung aus Frankfurt zeigt, dass städtische Gebiete im Vergleich zu ländlichen Gebieten tendenziell etwas weniger Verkehrsflächen aufweisen [Kostis, 2012].*

*Die Dachflächenanteile liegen überwiegend im Bereich um 40 bis 50%, sie variieren von 34 % (Punktbebauung, Modellgebiete) bis 54 % (dichte Blockbebauung in Paris).*

*Die Anteile der sonstigen befestigten Freiflächen variieren je nach Nutzung des betrachteten Einzugsgebietes am stärksten von 11 bis 72% mit einem Schwerpunkt bei etwa 25%.*

Daher wird die Festlegung nach Tabelle 5-10 vorgeschlagen. Für die Sensitivitätsanalyse wird der mittlere Siedlungstyp „Stadt“ herangezogen. Die Berechnung des Feststoffaufkommens wird schließlich für alle drei Siedlungstypen vorgenommen.

Tabelle 5-10: Vorschlag der Aufteilung befestigter Flächen in Abhängigkeit vom Siedlungstyp

|                                      | Dachfläche | Verkehrsfläche | befestigte Freifläche |
|--------------------------------------|------------|----------------|-----------------------|
| Siedlungstyp                         | [%]        | [%]            | [%]                   |
| Großstadt                            | 50         | 20             | 30                    |
| Stadt                                | 45         | 30             | 25                    |
| Land                                 | 40         | 40             | 20                    |
| undurchlässiger Anteil <sup>1)</sup> | 100        | 100            | 75                    |

<sup>1)</sup> vgl. Kap. 3.2.3

### 5.3.2 Abschätzung des Feststoffaufkommens in Modellgebieten und Vergleich mit gemessenen Werten in Trenngebieten

Es wird angenommen, dass die Abflüsse verschiedener Flächen in Straßen- und Dacheinläufen in einem Kanal zusammengeführt werden und dort eine Retention gemäß Kapitel 3.3.4 stattfindet. Nicht befestigten Flächen wird zunächst unterstellt, dass sie nicht zum Abfluss beitragen.

Die **Flächenaufteilung** wird entsprechend Tabelle 5-10 vorgenommen.

Die Eingabewerte für ein Stadtgebiet sind in Tabelle 5-11 zusammengefasst.

Die **Staubbelastung** wird in Städten und Großstädten mit 71 kg/(ha·a) in ländlichen Gemeinden mit 38 kg/(ha·a) angenommen. Der **Vegetationsfaktor** wird für alle Modellgebiete gleich angesetzt.

Die **Verkehrsbelastung** der Verkehrsflächen wird mit im Mittel 2.000 DTV mit einem Anteil von 10% an LKW bzw. Bussen in Städten, 5.000 DTV in Großstädten und 300 DTV in ländlichen Gemeinden angenommen.

Parkplätze mit einer normalerweise geringeren Verkehrsbelastung als Straßen sind dabei in den Verkehrsflächen mitenthalten. Ein Streusalzeinsatz wird für 50% aller Verkehrs- und Freiflächen angenommen. Es wird von einer wöchentlichen Straßenreinigung ausgegangen. Die Bebauung wird zu 50% aus niedrigen Bordsteinen oder Seitenstreifen und zu 50% aus kompletter Bebauung (Häuserwände o.ä.) angenommen.

Bei den **befestigten Freiflächen** wird davon ausgegangen, dass kein Verkehr vorhanden ist und dass der Anteil der undurchlässigen Fläche 75% beträgt. Es wird auch mit winterbedingtem Feststoffaufkommen durch Zerstörung des Flächenbelages gerechnet, dieser entspricht der „Grundbelastung Winter“.

Zur **Berechnung der Feststoffkonzentration** werden 0,9 für Dachflächen und 0,8 für sonstige undurchlässige Flächen als **Benetzungs-, Mulden- und Verdunstungsbeiwerte** angenommen.

Der **Retentionsfaktor** für die gesamten Feststoffe wird für **Dachabflüsse** im Vergleich zu Straßenabflüssen von 0,6 auf 0,7 heraufgesetzt, da im Dachabfluss weniger grobe Feststoffe vorhanden sind.

In Tabelle 5-12 sind die Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 5-11: Eingabeparameter zur Berechnung des AFS<sub>ges</sub> und des PM63 im Trenngebietsabfluss einer Stadt

| Anteil  | Einheit       | Straße                     | Freifläche                 | Dach        |
|---|---------------|----------------------------|----------------------------|-------------|
| <b>Staubniederschlag</b>                                      |               |                            |                            |             |
| Wert  | kg/(ha*a)     | 71                         | 71                         | 71          |
| <b>Pollen</b>   |               |                            |                            |             |
| Wert  | kg/(ha*a)     | 400                        | 400                        | 400         |
| <b>Anteil PM63 in SN und Pollen</b>                           |               |                            |                            |             |
| Wert  | -             | 0,8                        | 0,8                        | 0,8         |
| <b>Jahreszeitfaktor für Pollen</b>                            |               |                            |                            |             |
| Wert  | -             | 0,33                       | 0,33                       | 0,33        |
| <b>Vegetationsfaktor</b>                                      |               |                            |                            |             |
| Wert  | -             | 0,33                       | 0,33                       | 0,33        |
| <b>Verkehrsbedingter Abrieb</b>                               |               |                            |                            |             |
| Wert PKW  | kg/(ha*a)*PKW | 0,1                        |                            |             |
| Wert LKW  | kg/(ha*a)*LKW | 0,5                        |                            |             |
| <b>Verkehrsbelastung</b>                                      |               |                            |                            |             |
| DTV   | Fahrzeuge/d   | 2.000                      |                            |             |
| <b>Anteil LKW</b>   |               |                            |                            |             |
| PKW   | Fahrzeuge/d   | 1.800                      |                            |             |
| LKW   | Fahrzeuge/d   | 200                        |                            |             |
| <b>Anteil PM63 Verkehrsabrieb</b>                             |               |                            |                            |             |
| Wert  | -             | 0,3                        |                            |             |
| <b>GB<sub>Winter</sub></b>                                    |               |                            |                            |             |
| Wert  | kg/(ha*a)     | 1.000                      | 1.000                      |             |
| <b>DTV-bezogener Fahrbahnabrieb, Winter</b>                   |               |                            |                            |             |
| Wert  | kg/(ha*a)*DTV | 0,03                       |                            |             |
| <b>Anteil PM63 Verkehrsabrieb Winter</b>                      |               |                            |                            |             |
| Wert  | -             | 0,3                        |                            |             |
| <b>Jahreszeitfaktor f<sub>jw</sub></b>                        |               |                            |                            |             |
| Wert  | -             | 0,25                       |                            |             |
| <b>Faktor Verkehrsart f<sub>Kr</sub></b>                      |               |                            |                            |             |
| Wert  | -             | 2                          |                            |             |
| <b>Faktor Anzahl Fahrspuren</b>                               |               |                            |                            |             |
| Wert  | -             | 1                          |                            |             |
| <b>Dachhöhe</b>   | m             |                            |                            | 10          |
| Wert  | -             |                            |                            | 1           |
| <b>Dachabrieb</b>   |               |                            |                            | normal      |
| Wert  | kg/(ha*a)     |                            |                            | 144         |
| <b>Anteil PM63 im Dachabrieb</b>                              |               |                            |                            |             |
| Wert  | -             |                            |                            | 0,5         |
| <b>Anteil Dachflächen mit Abrieb</b>                          |               |                            |                            |             |
| Wert  | -             |                            |                            | 0,8         |
| <b>Faktor bei fehlender Randbebauung f<sub>RB</sub></b>       |               |                            |                            |             |
| Wert AFS <sub>ges</sub>                                       | -             | 0,865                      | 0,865                      |             |
| Wert PM63   | -             | 0,7                        | 0,7                        |             |
| <b>Faktor Straßenreinigung f<sub>SR</sub></b>                 |               |                            |                            |             |
| Wert AFS <sub>ges</sub>                                       | -             | 0,75                       | 0,75                       |             |
| Wert PM63   | -             | 0,9                        | 0,9                        |             |
| <b>Benetzungs-, Mulden-, Verdunstungsverlust</b>              |               |                            |                            |             |
| Wert  | -             | 0,8                        | 0,8                        | 0,9         |
| <b>h<sub>N</sub></b>  |               |                            |                            |             |
| Wert  | mm/a          | 800                        | 800                        | 800         |
| <b>Faktor Retention im Gully-/Kanalsystem f<sub>Ret</sub></b> |               | wöchentl. Straßenreinigung | wöchentl. Straßenreinigung | Dachabfluss |
| Wert AFS <sub>ges</sub>                                       | -             | 0,8                        | 0,8                        | 0,7         |
| Wert PM63   | -             | 0,9                        | 0,9                        | 0,8         |

Tabelle 5-12: Feststoffaufkommen und -konzentration in Trenngebietsabflüssen unterschiedlicher Modellgebiete

|  | AFS <sub>ges</sub> | PM63 |
|--|--------------------|------|
| <b>dem Niederschlagsabfluss zur Verfügung stehendes Feststoffaufkommen</b> |                    |      |
|  | <b>[kg/(ha·a)]</b> |      |
| Land   | 178                | 94   |
| Stadt  | 272                | 138  |
| Großstadt  | 331                | 159  |
| <b>Feststoffaufkommen am Trenngebietsauslass</b>                           |                    |      |
|  | <b>[kg/(ha·a)]</b> |      |
| Land   | 136                | 80   |
| Stadt  | 209                | 118  |
| Großstadt  | 255                | 136  |
| <b>Konzentration ohne Retention</b>  |                    |      |
|  | <b>[mg/l]</b>      |      |
| Land   | 24,0               | 12,7 |
| Stadt  | 37,3               | 18,8 |
| Großstadt  | 46,0               | 21,8 |
| <b>Konzentration am Trenngebietsauslass</b>                                |                    |      |
|  | <b>[mg/l]</b>      |      |
| Land   | 18,5               | 11,0 |
| Stadt  | 29,0               | 16,2 |
| Großstadt  | 35,8               | 18,8 |

Der Stoffabtrag in einem städtischen Modelltrenngebiet beträgt 272 kg/(ha·a) AFS<sub>ges</sub> bzw. 138 kg/(ha·a) PM63, wird eine mögliche Retention berücksichtigt, so verringert er sich auf 209 kg/(ha·a) AFS<sub>ges</sub> bzw. 118 kg/(ha·a) PM63. In einer Großstadt beträgt die berechnete Deposition etwas mehr, 331 kg/(ha·a) AFS<sub>ges</sub> bzw. 159 kg/(ha·a) PM63, in ländlichen Gemeinden etwas weniger, 178 kg/(ha·a) AFS<sub>ges</sub> bzw. 94 kg/(ha·a) PM63.

Die Konzentrationen vor Einlauf in ein Kanalsystem würden 24 bis 46 mg/l AFS<sub>ges</sub> bzw. 12,7 bis 21,8 mg/l PM63 betragen. Die berechnete Konzentration in Trenngebietsauslässen vermindert sich auf 18,5 bis 35,8 mg/l AFS<sub>ges</sub> bzw. 11 bis 18,8 mg/l PM63.

Die hier berechneten AFS<sub>ges</sub>-Frachten am Trenngebietsauslass in der Höhe von 136 bis 255 kg/(ha·a) entsprechen in der Größenordnung etwa den in Tabelle 2-5 aufgeführten Frachten größerer Einzugsgebiete (103 bis 344 kg/(ha·a)), die durch Messungen ermittelt wurden [Fuchs et al., 2010b]. Die höheren Werte sind damit zu erklären, dass in größeren Einzugsgebieten mit örtlich und zeitlich begrenzten Sondersituationen wie Bautätigkeiten, Verschmutzungen durch Landwirtschaft oder je nach Topo-

grafie mit Bodenerosion zu rechnen ist, die bei den Berechnungen nicht berücksichtigt wurden. In einigen Einzugsgebieten kann auch die Staubbelastung höher als angenommen sein. Die rechnerische Abschätzung des AFS<sub>ges</sub>-Aufkommens in einem Großstadtgebiet unter der Annahme höherer Staubbelastung (100 kg/(ha·a)) und Bodenerosion von 10% der Verkehrs- und Freiflächen ergab z.B. 407 kg/(ha·a) bzw. 315 kg/(ha·a) nach Retention im Kanalnetz.

### 5.3.3 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse wird anhand des Modellgebiets Stadt durchgeführt, das aus Verkehrsflächen, Dachflächen sowie versiegelten weiteren nicht mit Verkehr belasteten Flächen entsprechend Tabelle 5-10 bzw. Tabelle 5-11 besteht. Eine mögliche Retention im Kanalnetz wurde zunächst nicht betrachtet.

Das Ergebnis bei einer jeweils 10%igen Erhöhung der Teilflächen bzw. einzelnen Faktoren ist in Bild 5-12 dargestellt. Bei der Betrachtung der Flächenanteile wurden bei einer Erhöhung eines Flächentyps (z.B. Dachflächen) die anderen Flächentypen um jeweils 5% verringert.

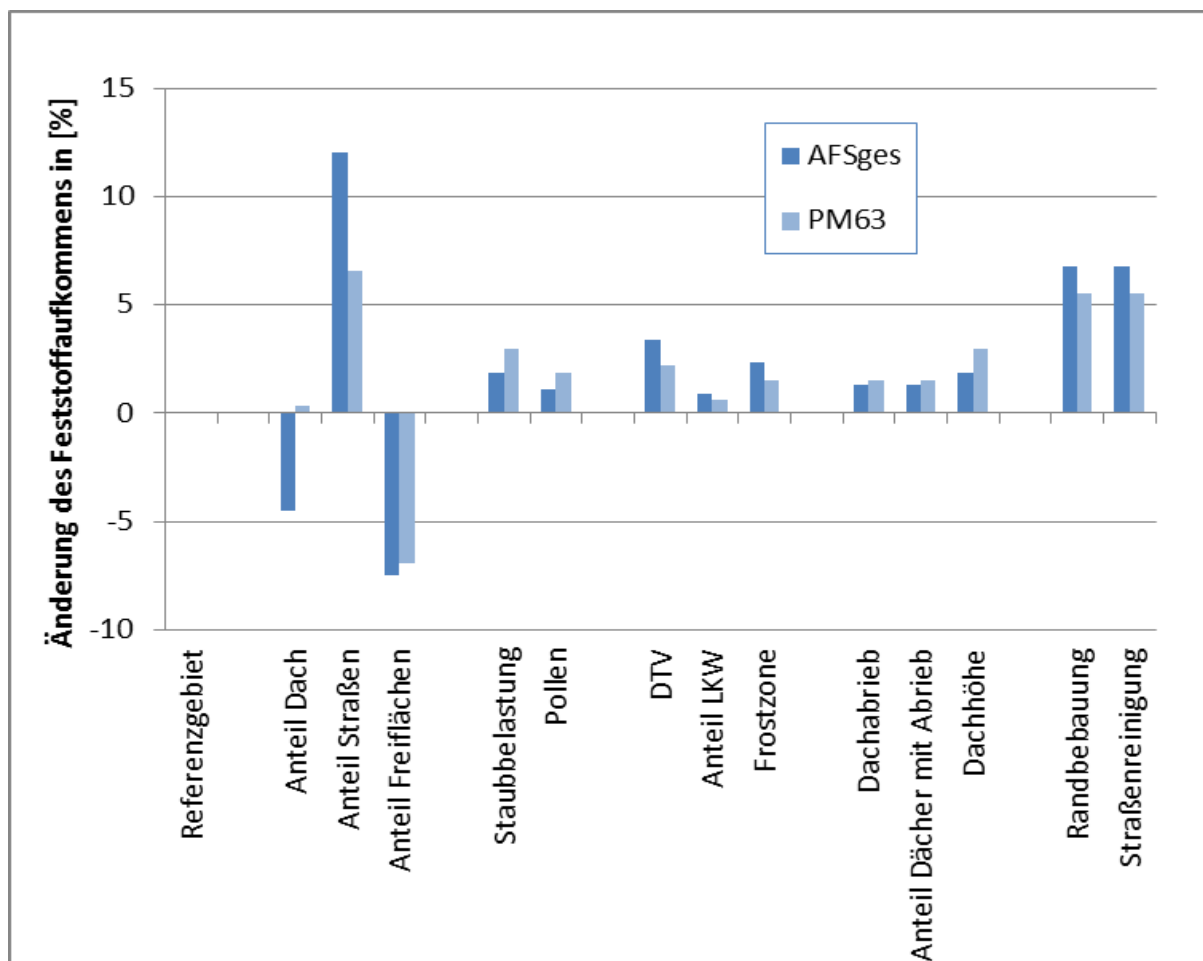


Bild 5-14: Änderung des Feststoffaufkommens in Mischgebieten nach Erhöhung der Eingabeparameter um 10%



Interessant ist, dass eine Erhöhung des Dachflächenanteils zu einer Verringerung des  $AFS_{ges}$ , aber zu einer minimalen Erhöhung des  $PM_{63}$  führt, was daran liegt, dass der angenommene  $PM_{63}$ -Anteil bei der Dachflächendeposition mit 0,8 höher liegt als bei Verkehrsflächen und anderen befestigten Freiflächen. Bei einer Erhöhung der Straßenanteile steigen aufgrund des verkehrsbedingten Feststoffanfalls sowohl  $AFS_{ges}$  als auch  $PM_{63}$ -Aufkommen, bei einer Erhöhung des unversiegelten Freiflächenanteils ist das Gegenteil der Fall.

Die Annahme einer 10%igen Erhöhung der Staub- oder Pollenbelastung, der DTV, des LKW-Anteils, des winterbedingten Feststoffaufkommens sowie des Dachabriebs und des Dachhöhenfaktors wirkt sich nur sehr gering (1 bis 3,5%) auf das Feststoffaufkommen aus. Die Änderung der Randbedingungen bei den Verkehrs- und Freiflächen wie Straßenreinigung und Randbebauung wirkt sich dagegen etwas stärker aus.

In einer weiteren Analyse wurden die Eingabeparameter innerhalb des realistischen Bereichs variiert. Die Auswirkungen auf das Feststoffaufkommen sind in Bild 5-15 dargestellt.

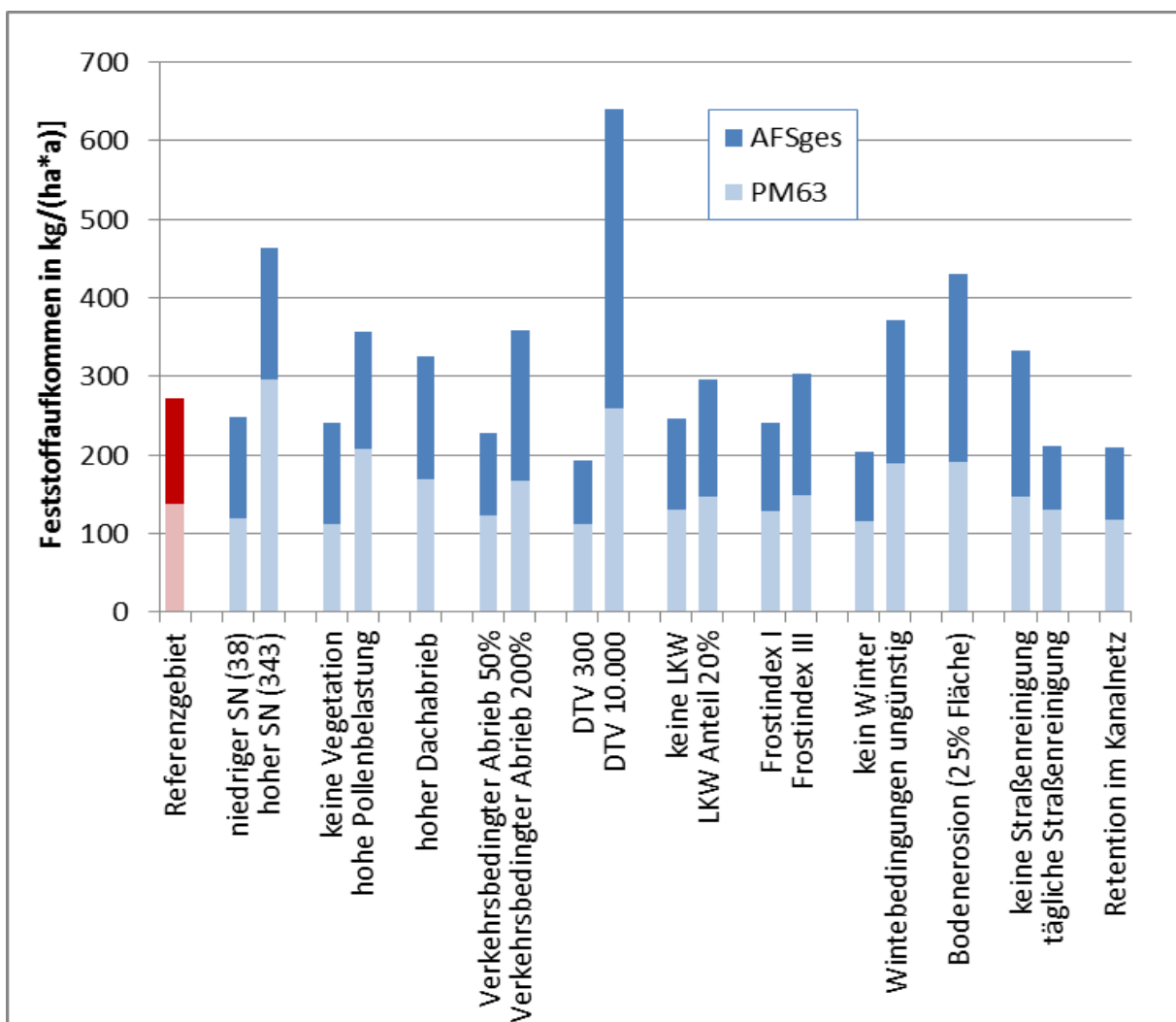


Bild 5-15: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die Berechnung des Feststoffaufkommens in Mischgebieten, in Klammern die Eingabewerte

Hier macht sich das Verkehrsaufkommen am stärksten bemerkbar, wobei ein Trenngebiet aus unterschiedlichen Flächenanteilen mit durchgängig 10.000 DTV relativ unwahrscheinlich ist.

Ein hoher Staubbiederschlag im gesamten Gebiet wirkt sich genauso wie eine sehr hohe Verkehrsbelastung auf das PM63-Aufkommen und dadurch auf das gesamte Feststoffaufkommen aus. Dies gilt auch, wenn auch in geringerem Maße, für eine hohe Pollenbelastung, da sie auf die gesamte Fläche wirkt.

Bodenerosion, die von zusätzlicher unbefestigter Fläche (25% der befestigten Fläche) kommt, bewirkt eine starke Erhöhung des Feststoffaufkommens feiner und grober Anteile.

Die Annahme der Verdoppelung oder Halbierung des verkehrsbedingten Abriebs bewirkt eine Änderung des Gesamt- und PM63-Aufkommens um etwa  $\pm 25\%$ .

Der Wintereinfluss macht sich ebenfalls deutlich durch ein verringertes oder erhöhtes Feststoffaufkommen, so wie auch die Modalitäten der Straßenreinigung, bemerkbar.

Die Annahme eines hohen Dachabriebs von sämtlichen Dächern wirkt sich deutlich auf das Feststoffaufkommen aus.

Die Retention im Kanalnetz bewirkt ein geringeres Gesamtfeststoffaufkommen im Trenngebietsauslass, hat aber kaum Einfluss auf dessen PM63-Aufkommen.

#### **5.3.4 Verifizierung anhand zweier Trenngebiete**

Das Problem der Verifizierung in Trenngebieten ist, dass zwar Messprogramme durchgeführt wurden, vgl. Kap. 4.2.3, aber die Beschreibungen der Einzugsgebiete (Flächenanteile, Verkehrsbelastung, Vegetationsbestand, Straßenreinigung etc.) nicht genau genug sind, um die für eine Berechnung erforderlichen Randbedingungen und Faktoren festzulegen. Im Folgenden wird die Verifizierung anhand zweier Messprogramme in Trenngebieten, in Hamburg und in Mörfelden-Walldorf, dargestellt. In letzterem Messprogramm wurde auch der PM63-Gehalt im Niederschlagsabfluss gemessen.

##### *5.3.4.1 Einzugsgebiet der Pilotanlage Halenreie*

Das in mehreren Veröffentlichungen beschriebene Einzugsgebiet der Pilotanlage Halenreie in Hamburg [Fitschen, 2000], [Dobner u. Holthuis, 2011] und [Holthuis et al., 2012] erschien geeignet, eine Verifizierung daran durchzuführen. Aus den Ver-

öffentlichungen wurden möglichst viele Informationen herangezogen. Das Einzugsgebiet ist in Bild 5-16 dargestellt, die nähere Beschreibung in Kap. 4.2.3.

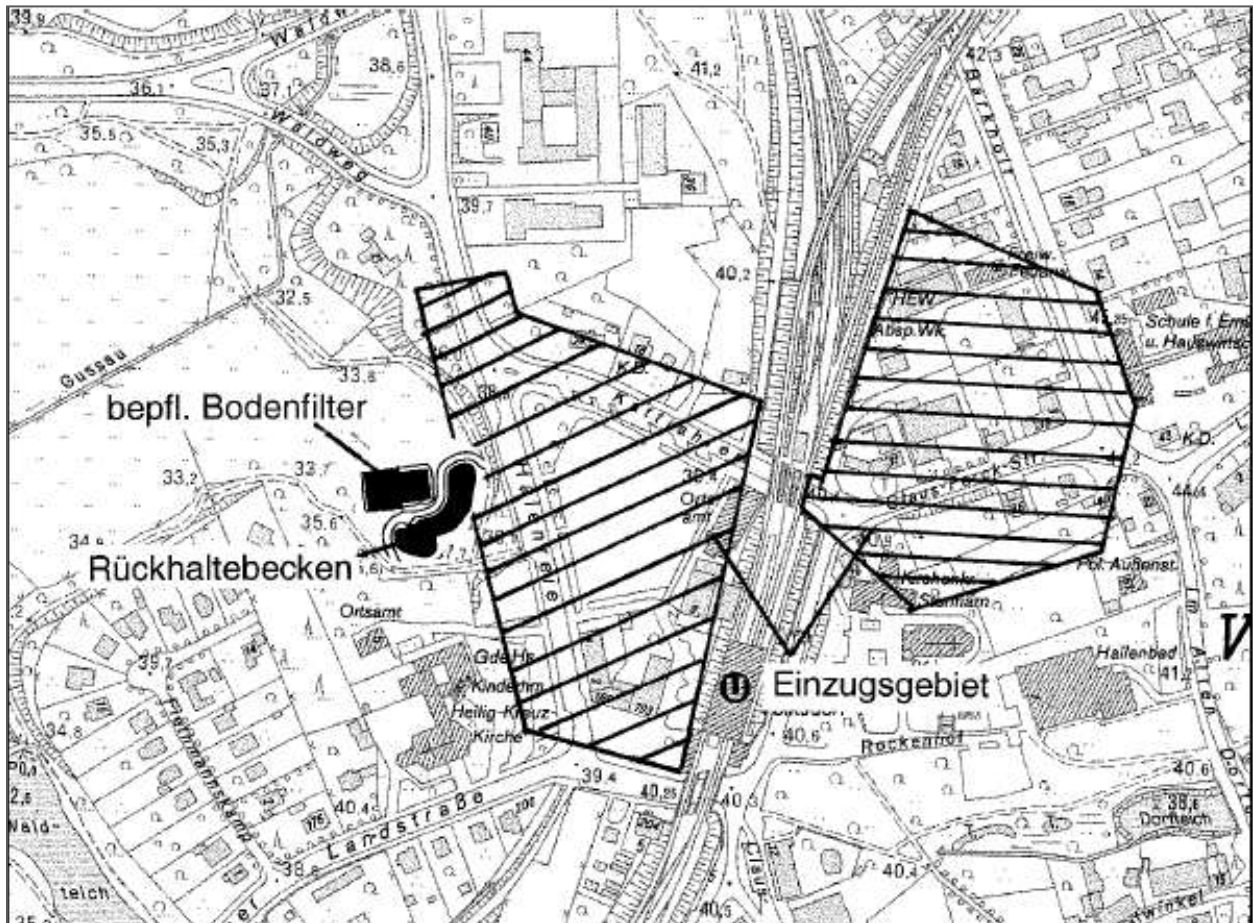


Bild 5-16: Einzugsgebiet der Pilotanlage Halenreie [Fitschen, 2000]

Die Informationen aus den Veröffentlichungen wurden ergänzt durch Informationen zur Vegetation, Nutzung und Randbebauung aus google-earth sowie zur Flächenaufteilung aus google-maps, vgl. auch Bild 5-17.

Die Eingabeparameter zur Berechnung sind in Tabelle 5-14 dargestellt.

Die Flächenanteile wurden aus dem Kartenmaterial ausgemessen und folgendermaßen abgeschätzt:

Tabelle 5-13: Befestigte Flächenanteile des Einzugsgebiets Halenreie

| Dachfläche | Verkehrsfläche | befestigte Freifläche <sup>1)</sup> | Marktplatz |
|------------|----------------|-------------------------------------|------------|
| [%]        | [%]            | [%]                                 | [%]        |
| 31         | 32             | 14                                  | 24         |

<sup>1)</sup> undurchlässiger Anteil davon geschätzt mit 75%

Tabelle 5-14: Eingabeparameter zur Berechnung des AFS<sub>ges</sub> und des PM63 im Einzugsgebiet Halenreihe

| Anteil  | Einheit       | Dachflächen                            | Straßen                                   | Freiflächen  | Marktplatz |
|---|---------------|--|---|--------------|------------|
| Staubniederschlag                                       |               | erhöht, da Bahnlinie das Gebiet kreuzt |   |              |            |
| Wert  | kg/(ha*a)     | 100                                    | 100                                       | 100          | 100        |
| Pollen  |               |  |   |              |            |
| Wert  | kg/(ha*a)     | 400                                    | 400                                       | 400          | 400        |
| Anteil PM63 in SN und Pollen                            |               |  |   |              |            |
| Wert  | -             | 0,8                                    | 0,8                                       | 0,8          | 0,8        |
| Jahreszeitfaktor für Pollen                             |               |  |   |              |            |
| Wert  | -             | 0,33                                   | 0,33                                      | 0,33         | 0,33       |
| Vegetationsfaktor                                       |               | erhöht, aufgrund optischen Eindrucks   |   |              |            |
| Wert  | -             | 0,5                                    | 0,5                                       | 0,5          | 0,5        |
| Verkehrsbedingter Abrieb                                |               |  |   |              |            |
| Wert PKW  | kg/(ha*a)*PKW |  | 0,1                                       |              |            |
| Wert LKW  | kg/(ha*a)*LKW |  | 0,5                                       |              |            |
| Verkehrsbelastung                                       |               |  | Mittel                                    |              |            |
| DTV   | Fahrzeuge/d   |  | 7.000                                     |              |            |
| Anteil LKW  |               |  | 0,10                                      |              |            |
| PKW   | Fahrzeuge/d   |  | 6.300                                     |              |            |
| LKW   | Fahrzeuge/d   |  | 700                                       |              |            |
| Anteil PM63 Verkehrsabrieb                              |               |  | 0,3                                       |              |            |
| Wert  | -             |  |   |              |            |
| GB <sub>Winter</sub>                                    |               | Frostindexzone I                       |   |              |            |
| Wert  | kg/(ha*a)     | 500                                    | 500                                       | 500          |            |
| DTV-bezogener Fahrbahnabrieb, Winter                    |               |  |   |              |            |
| Wert  | kg/(ha*a)*DTV | 0,03                                   |   |              |            |
| Anteil PM63 Verkehrsabrieb Winter                       |               |  |   |              |            |
| Wert  | -             | 0,3                                    |   |              |            |
| Jahreszeitfaktor f <sub>jw</sub>                        |               |  |   |              |            |
| Wert  | -             | 0,25                                   |   |              |            |
| Faktor Verkehrsart f <sub>Verkehr</sub>                 |               |  |   |              |            |
| Wert  | -             | 2,5                                    |   |              |            |
| Faktor Anzahl Fahrspuren                                |               |  |   |              |            |
| Wert  | -             | 1                                      |   |              |            |
| Dachhöhe  | m             | 10                                     | Marktbetrieb                              |              |            |
| Wert  | -             | 1                                      | Wert                                      | kg/(ha*a)    | 10.000     |
| Dachabrieb  |               | normal                                 | Fläche mit Marktbetrieb                   |              |            |
| Wert  | kg/(ha*a)     | 144                                    | Wert                                      | % von ha     | 1          |
| Anteil PM63 im Dachabrieb                               |               |  | Zeitfaktor f <sub>Zeit</sub> Marktbetrieb |              |            |
| Wert  | -             | 0,5                                    | Wert                                      | 3 Tage/Woche | 0,43       |
| Anteil Dachflächen mit Abrieb                           |               |  | Anteil PM63 Marktbetrieb                  |              |            |
| Wert  | -             | 0,8                                    | Wert                                      | -            | 0,3        |
| Faktor bei fehlender Randbebauung f <sub>RB</sub>       |               |  | niedrige Randsteine/ Seitenstreifen       |              |            |
| Wert AFS <sub>ges</sub>                                 | -             |  | 0,75                                      | 0,75         | 0,75       |
| Wert PM63   | -             |  | 0,5                                       | 0,5          | 0,5        |
| Faktor Straßenreinigung f <sub>SR</sub>                 |               |  | wöchentliche Straßenreinigung             |              |            |
| Wert AFS <sub>ges</sub>                                 | -             |  | 0,75                                      | 0,75         | 0,75       |
| Wert PM63   | -             |  | 0,9                                       | 0,9          | 0,9        |
| Benetzungs-, Mulden-, Verdunstungsverlust               |               |  |   |              |            |
| Wert  | -             | 0,9                                    | 0,8                                       | 0,8          | 0,8        |
| h <sub>N</sub>  |               |  | für Hamburg                               |              |            |
| Wert  | mm/a          | 773                                    | 773                                       | 773          | 773        |
| Faktor Retention im Gully-/Kanalsystem f <sub>Ret</sub> |               | Dachabfluss                            | bei wöchentlicher Straßenreinigung        |              |            |
| Wert AFS <sub>ges</sub>                                 | -             | 0,7                                    | 0,8                                       | 0,8          | 0,8        |
| Wert PM63   | -             | 0,8                                    | 0,9                                       | 0,9          | 0,9        |





Bild 5-17: Einzugsgebiet der Pilotanlage Halenreihe [google-earth, 2013]

Der leicht erhöhte Staubniederschlag von  $100 \text{ kg}/(\text{ha}\cdot\text{a})$  wurde aufgrund der Bahnstrecke, die das Einzugsgebiet durchschneidet, gewählt.

Die mittlere DTV von 7.000 wurde abgeschätzt mit der Angabe der Verkehrsbelastung von 15.000 DTV auf der Straße Halenreihe und unter der Annahme einer DTV von 3.000 auf den übrigen Straßen sowie über die Straßenlängen im Einzugsgebiet (Halenreihe 275 m von etwa 765 m Straßengesamtlänge).

Der pollenrelevante Vegetationsanteil der nicht befestigten Flächen erschien relativ hoch und wurde abgeschätzt zu 0,5.

Es wurde von einer wöchentlichen Straßenreinigung sowie einer Retention im Kanalnetz ausgegangen.

Der durchschnittliche Niederschlag in Hamburg beträgt 773 mm.

Die Belastung des Marktplatzes wurde abgeschätzt zu  $10.000 \text{ kg}/(\text{ha}\cdot\text{a})$  und insgesamt 3 Markttagen in der Woche.

Weitere Parameter wurden als durchschnittlich angenommen.

Die Ergebnisse sowie Gegenüberstellung mit den gemessenen Werten sind in Bild 5-18 dargestellt.

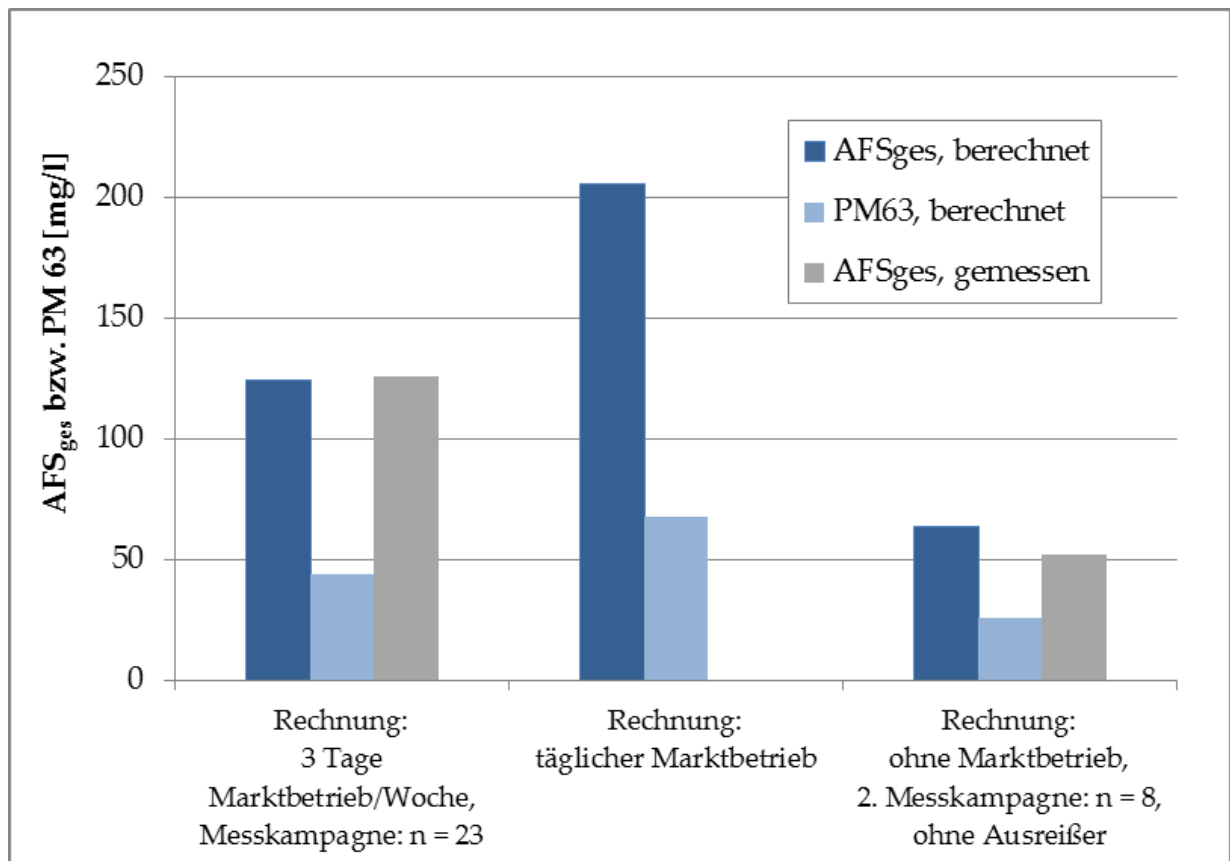


Bild 5-18: Verifizierung zur Berechnung eines Trenngebietsabflusses

Die berechnete mittlere AFS<sub>ges</sub>-Konzentration unter durchschnittlichen Bedingungen (124 mg/l) entspricht etwa dem Mittelwert von 126 mg/l der 1996 bis 1999 durchgeführten Messkampagne mit insgesamt 23 beprobten Regenereignissen.

Wird täglicher Marktbetrieb angenommen, so steigt die berechnete AFS<sub>ges</sub>-Konzentration auf 205 mg/l.

In der zweiten Messkampagne wurden nur 8 Regenereignisse beprobt und AFS<sub>ges</sub>-Konzentrationen von 7 bis 711 mg/l gemessen. Bei der Ermittlung des Mittelwertes in der Höhe von 51,8 mg/l wurden „Ausreißer“ ohne Angabe der Methode [Holthuis et al., 2012] eliminiert, wobei die Spannweite in Niederschlagsabflüssen generell groß ist und gerade die sehr hohen Werte für z.B. eine Jahresfrachtbewertung wichtig sind. Die gemessenen Maximalkonzentrationen lagen in der ersten Messkampagne bei 501 mg/l und in der zweiten bei 711 mg/l. Hier wird ein Zusammentreffen von längeren Trockenperioden und für die Abflusskonzentration ungünstiges Niederschlagsgeschehen (z.B. kurzer, intensiver Regen, der viel Material abspülen kann aber wenig Volumen ergibt) vermutet. Um also den bereinigten Mittelwert mit einem berechneten Wert vergleichen zu können, wurden bei einer weiteren Rechnung Markttag (mit vermutlich hohen Belastungen) weggelassen. Die Rechnung ergab 63,6 mg/l und liegt damit nahe an dem gemessenen Mittelwert.



Ein Vergleich von berechneten und gemessenen PM63-Konzentrationen ist nicht möglich, da keine PM63-Messwerte vorliegen. Die berechneten PM63-Konzentrationen liegen nach Retention im Kanalnetz etwa zwischen 25 und 67 mg/l. Der PM63-Anteil am gesamten Feststoffgehalt liegt zwischen 33 und 41% und ist umso höher, je geringer die AFS<sub>ges</sub>-Konzentration ist.

#### 5.3.4.2 Einzugsgebiet Regenklärbecken Mörfelden-Süd

Eine weitere Verifizierung wird anhand einer an der FH Frankfurt durchgeführten Masterarbeit [Schmitt, 2013] dargestellt, in der in einer vier Monate umfassenden Messkampagne von August bis November 2013 sechs Regenereignisse im Zulauf eines Regenklärbeckens erfasst wurden. Anhand der Quantifizierung der Fläche, Charakterisierung der Nutzung und weiterer Randbedingungen des Einzugsgebiets wurden die Faktoren zur Berechnung des AFS<sub>ges</sub>- und PM63-Aufkommens bestimmt und die Messergebnisse mit den theoretischen Abschätzungen verglichen.

Die Stadt Mörfelden-Walldorf liegt in der Untermainebene im Rhein-Main-Gebiet im Kreis Groß-Gerau. Das Einzugsgebiet des Regenklärbeckens umfasst im Wesentlichen das als Mischgebiet ausgewiesene Gewerbegebiet „Mörfelden-Süd“ mit dort angesiedelten Dienstleistungsbetrieben (Speditionen, Reinigungsfirmen, Werbeagenturen etc.), mit produzierendem Gewerbe (Schlosserei, Schreinereien etc.), einer Spielhalle, einem Fitnessstudio, einem Getränkemarkt und mehreren Autohäuser, eine als Sondergebiet ausgewiesene Fläche mit großflächigem Einzelhandel sowie ein Wohngebiet, vgl. Bild 5-19 und Bild 5-20.



Bild 5-19: Luftbild des Einzugsgebiets des Regenklärbeckens Mörfelden-Süd [Schmitt, 2013]



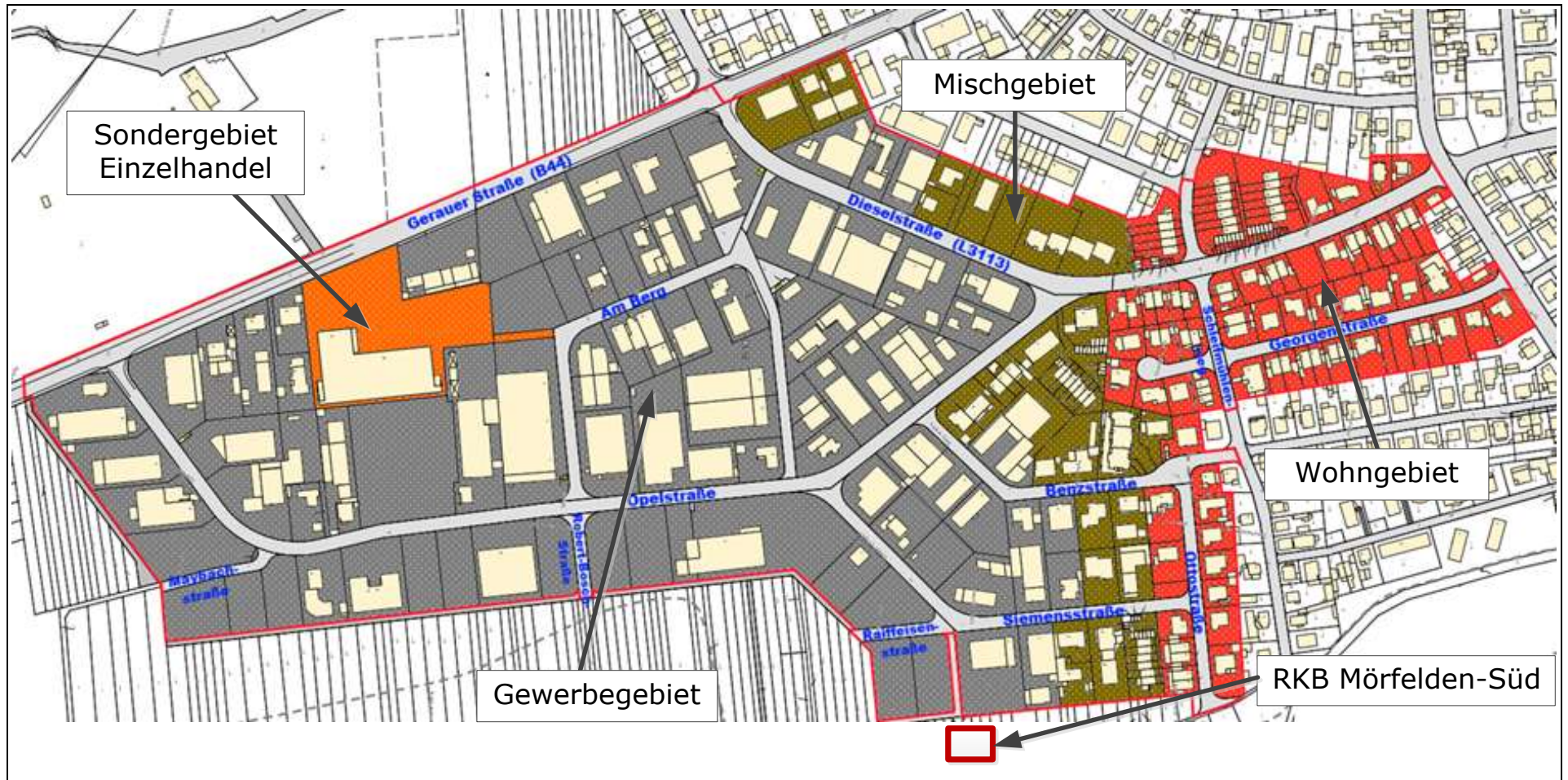


Bild 5-20: Einzugsgebiet des Regenklärbeckens Mörfelden-Süd, verändert nach [Schmitt, 2013]  
 RKB: Regenklärbecken

•

Die mittels aktuellen Generalentwässerungsplans (GEP) und Geoinformationssystems (GIS) ermittelte Fläche beträgt 28,4 ha, davon sind 17,0 ha befestigt. Die Flächenaufteilung für Dach- und Verkehrsflächen erfolgte mittels Auswertung von ALKIS-Daten (Daten des Amtliches Liegenschaftskataster Informationssystem) und GIS. Die Bestimmung der befestigten Freiflächen und deren Anteil an undurchlässiger Fläche wurden mit Hilfe von Angaben der Teileinzugsgebietsflächen sämtlicher Haltungen aus dem GEP durchgeführt. Der undurchlässige Anteil der befestigten Freifläche wurde mit 65% bestimmt. Die gesamte befestigte Fläche untergliedert sich gemäß Tabelle 5-15 in die Teilflächen „Dach“, „Straße“, „Parkplatz“ und „sonstige befestigte Fläche“ [Schmitt, 2013].

Tabelle 5-15: Befestigte Flächenanteile des Einzugsgebiets Regenklärbecken Mörfelden-Süd, aus [Schmitt,2013]

| Dachfläche | Straßenfläche | Parkfläche | befestigte Freifläche <sup>1)</sup> |
|------------|---------------|------------|-------------------------------------|
| [%]        | [%]           | [%]        | [%]                                 |
| 46,5       | 24            | 9          | 20,5                                |

<sup>1)</sup> undurchlässiger Anteil davon ermittelt mit 65%

Die DTV der Verkehrsflächen wurde anhand von Verkehrszählungen ermittelt. Die mittlere DTV des Gesamtgebiets wurde gewichtet mittels Straßenlängen bzw. Parkplatzflächen. Die Randbedingungen für die Randbebauung der Verkehrsflächen, Straßenreinigung, die Traufhöhe der Dächer, möglicher Eintrag über Bodenerosion etc. wurden abgefragt bzw. mittels Ortsbegehungen eruiert [Schmitt, 2013]. Der Messzeitraum lag außerhalb der jahreszeitlich relevanten Monate für einen Pollen eintrag und winterbedingten Mehranfall an Straßenabrieb.

Der Staubniederschlag wurde leicht erhöht angesetzt, da das Untersuchungsgebiet im dicht besiedelten Rhein-Main-Gebiet zwischen Mainz und Frankfurt liegt.

Der Niederschlag während der Probennahmetage betrug insgesamt 88,7 mm. Zusammen mit den jeweils vorangegangenen Trockentagen ergab sich ein Gesamtmeszeitraum von 32 Tagen. Hochgerechnet auf einen Jahresniederschlag ergaben sich somit fiktiv 952 mm/a [Schmitt, 2013].

Die Eingabewerte sind in Tabelle 5-16 zusammengefasst. Mit diesen Eingabewerten werden ein Gesamtfeststoffabtrag von 203 kg/(ha·a) und ein PM63-Abtrag von 98 kg/(ha·a) berechnet. Die mittlere Jahreskonzentration wird berechnet zu 27,6 mg/l AFS<sub>ges</sub> bzw. 13,2 mg/l PM63, vgl. Tabelle 5-17.

Tabelle 5-16: Eingabeparameter zur Berechnung des AFS<sub>ges</sub> und des PM63 im Einzugsgebiet RKB Mörfelden-Süd

| Anteil  | Einheit       | Straße                               | Freifläche                 | Dach        | Parkplatz                  |
|---|---------------|--------------------------------------|----------------------------|-------------|----------------------------|
| <b>Staubniederschlag</b>                                      |               |                                      |                            |             |                            |
| Wert  | kg/(ha*a)     | 100                                  | 100                        | 100         | 100                        |
| <b>Pollen</b>   |               |                                      |                            |             |                            |
| Wert  | kg/(ha*a)     | 400                                  | 400                        | 400         | 400                        |
| <b>Anteil AFS<sub>fein</sub> in SN und Pollen</b>             |               |                                      |                            |             |                            |
| Wert  | -             | 0,8                                  | 0,8                        | 0,8         | 0,8                        |
| <b>Jahreszeitfaktor für Pollen</b>                            |               |                                      |                            |             |                            |
| Wert  | -             | 0                                    | 0                          | 0           | 0                          |
| <b>Vegetationsfaktor</b>                                      |               |                                      |                            |             |                            |
| Wert  | -             | 0,33                                 | 0,33                       | 0,33        | 0,33                       |
| <b>Verkehrsbedingter Abrieb</b>                               |               |                                      |                            |             |                            |
| Wert PKW  | kg/(ha*a)*PKW | 0,1                                  |                            |             | 0,1                        |
| Wert LKW  | kg/(ha*a)*LKW | 0,5                                  |                            |             | 0,5                        |
| <b>Verkehrsbelastung</b>                                      |               |                                      |                            |             |                            |
| DTV   | Fahrzeuge/d   | 3.000                                |                            |             | 1.000                      |
| <b>Anteil LKW</b>   |               | 0,05                                 |                            |             | 0,01                       |
| PKW   | Fahrzeuge/d   | 2.850                                |                            |             | 990                        |
| LKW   | Fahrzeuge/d   | 150                                  |                            |             | 10                         |
| <b>Anteil AFS<sub>fein</sub> Verkehrsabrieb</b>               |               |                                      |                            |             |                            |
| Wert  | -             | 0,3                                  |                            |             | 0,3                        |
| <b>Faktor Verkehrsart f<sub>Kr</sub></b>                      |               |                                      |                            |             |                            |
| Wert  | -             | 2,5                                  |                            |             | 1,25                       |
| <b>Faktor Anzahl Fahrspuren</b>                               |               |                                      |                            |             |                            |
| Wert  | -             | 1                                    |                            |             | 0,5                        |
| <b>Dachhöhe</b>   | m             |                                      |                            | 10          |                            |
| Wert  | -             |                                      |                            | 1           |                            |
| <b>Dachabrieb</b>   |               |                                      |                            | normal      |                            |
| Wert  | kg/(ha*a)     |                                      |                            | 144         |                            |
| <b>Anteil PM63 im Dachabrieb</b>                              |               |                                      |                            |             |                            |
| Wert  | -             |                                      |                            | 0,5         |                            |
| <b>Anteil Dachflächen mit Abrieb</b>                          |               |                                      |                            |             |                            |
| Wert  | -             |                                      |                            | 0,8         |                            |
| <b>Faktor bei fehlender Randbebauung f<sub>RB</sub></b>       |               | nach Ortsbesichtigung                |                            |             |                            |
| Wert AFS <sub>ges</sub>                                       | -             | 0,75                                 | 0,875                      |             | 0,9                        |
| Wert PM63   | -             | 0,5                                  | 0,7                        |             | 0,75                       |
| <b>Faktor Straßenreinigung f<sub>SR</sub></b>                 |               |                                      |                            |             |                            |
| Wert AFS <sub>ges</sub>                                       | -             | 0,83                                 | 0,9                        |             | 0,7                        |
| Wert PM63   | -             | 0,92                                 | 0,95                       |             | 0,85                       |
| <b>Benetzungs-, Mulden-, Verdunstungsverlust</b>              |               |                                      |                            |             |                            |
| Wert  | -             | 0,8                                  | 0,8                        | 0,9         | 0,8                        |
| <b>h<sub>N</sub></b>  |               | hochgerechnet von Probenahmezeitraum |                            |             |                            |
| Wert  | mm/a          | 952                                  | 952                        | 952         | 952                        |
| <b>Faktor Retention im Gully-/Kanalsystem f<sub>Ret</sub></b> |               | wöchentl. Straßenreinigung           | wöchentl. Straßenreinigung | Dachabfluss | wöchentl. Straßenreinigung |
| Wert AFS <sub>ges</sub>                                       | -             | 0,77                                 | 0,7                        | 1           | 0,9                        |
| Wert AFS <sub>fein</sub>                                      | -             | 0,88                                 | 0,85                       | 1           | 0,95                       |
| <b>Bodenerosion/Landwirtschaft/Bautätigkeiten</b>             |               | <b>Bodenerosion</b>                  |                            |             |                            |
| Wert  | kg/(ha*a)     | 2.500                                |                            |             |                            |
| <b>Fläche mit Bodenerosion</b>                                |               |                                      |                            |             |                            |
| Wert  | Anteil Fläche | 0,05                                 |                            |             |                            |
| <b>Zeitfaktor f<sub>Zeit</sub> besondere Belastungen</b>      |               |                                      |                            |             |                            |
| Wert  | -             | 1                                    |                            |             |                            |
| <b>Anteil PM63 besondere Belastungen</b>                      |               |                                      |                            |             |                            |
| Wert  | -             | 0,33                                 |                            |             |                            |

Tabelle 5-17: Berechneter Feststoffabtrag und –konzentration im Einzugsgebiet Mörfelden-Süd, nach [Schmitt, 2013]

|   | AFS <sub>ges</sub> | PM63 |
|---|--------------------|------|
| <b>Feststoffabtrag am Trenngebietsauslass [kg/(ha·a)]</b> | 203                | 98   |
| <b>Konzentration am Trenngebietsauslass [mg/l]</b>        | 27,6               | 13,2 |

Als Probennahmestelle wurde die Schmutzwasserinne des Regenklärbeckens gewählt. Zulaufmengenproportionale Proben aus sechs Regenereignissen wurden mittels digital angesteuertem Probennehmer in 1-l-Probeflaschen gepumpt und nach Ende des Regenereignisses in einem großen Gefäß gemischt. Daraus wurden nach Homogenisierung wiederum 4 1-l-Behälter gefüllt. Deren Inhalt wurde auf den Gehalt an AFS<sub>ges</sub> und PM63 analysiert. Die Filtration erfolgte jeweils über einen Filter der Porengröße 0,45 µm. Vor der Bestimmung des PM63 wurde die Probe dispergiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-18 dargestellt [Schmitt, 2013].

Tabelle 5-18: Niederschlagshöhe, Intensität, Trockenperiode, AFS<sub>ges</sub> und PM63- Konzentration sowie PM63/AFS<sub>ges</sub>-Verhältnis der untersuchten Niederschlagsereignisse im Einzugsgebiet RKB Mörfelden-Süd, nach [Schmitt, 2013]

| Datum<br>2013                                      | Nieder-<br>schlags-<br>höhe | Intensität | Trocken-<br>periode | AFS <sub>ges</sub> | PM63        | PM63/<br>AFS <sub>ges</sub> |
|--|-----------------------------|------------|---------------------|--------------------|-------------|-----------------------------|
|  | [mm]                        | [mm/h]     | [Tage]              | [mg/l]             | [mg/l]      | [%]                         |
| 06.08.   | 14,7                        | 7,4        | 7                   | 69,3               | 31,7        | 45,7                        |
| 25.08.   | 34,3                        | 2,6        | 6                   | 61,2               | 20,8        | 34,0                        |
| 31.08.   | 3,3                         | 0,8        | 5                   | 139,4              | 37,2        | 26,7                        |
| 11.09.   | 8,6                         | 2,2        | 1                   | 62,8               | 13,7        | 21,8                        |
| 09./10.10.   | 12,6                        | 0,9        | 3                   | 21,6               | 11,7        | 54,2                        |
| 01./02.11.   | 15,2                        | 1,5        | 4                   | 74,0               | 20,0        | 27,0                        |
| <b>Abflussgewichteter Mittelwert</b>               |                             |            |                     | <b>62,2</b>        | <b>21,1</b> | <b>34,0</b>                 |
| <b>Flächenspezifische Jahresfracht [kg/(ha·a)]</b> |                             |            |                     | <b>592</b>         | <b>201</b>  |                             |

Als abflussgewichteter Mittelwert ergeben sich für die AFS<sub>ges</sub>-Konzentration 62,2 mg/l, für die PM63-Konzentration 21,1 mg/l und für das Verhältnis von PM63 zu AFS<sub>ges</sub> 34 %.



Aus den Konzentrationen, der Abflussmenge, der Zeitspanne der Messungen sowie der gesamten undurchlässigen Fläche lässt sich die spezifische Fracht zu 592 kg AFS<sub>ges</sub>/(ha·a) sowie 201 kg PM63/(ha·a) berechnen [Schmitt, 2013].

Die gerechneten sind schließlich den gemessenen Konzentrationen in Bild 5-21 gegenübergestellt, aus dem ersichtlich wird, dass insbesondere mehr grobe Feststoffe gemessen als berechnet wurden.

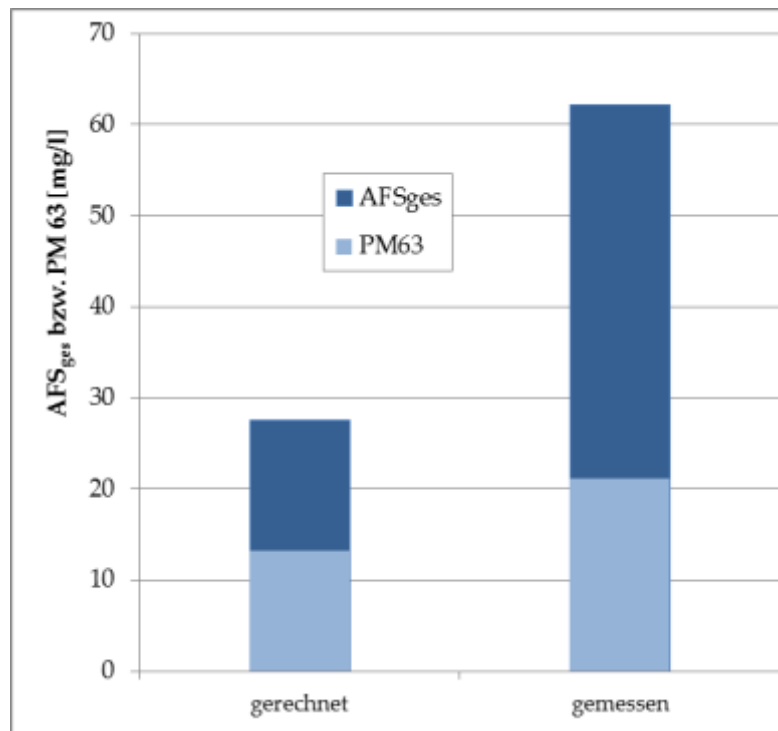


Bild 5-21: Berechnete und gemessene Feststoffkonzentrationen in Einzugsgebiet des Regenklärbeckens Mörfelden-Süd, Werte nach [Schmitt, 2013]

[Schmitt, 2013] führte eine Fehleranalyse bezüglich

- fehlerhafter Probennahme,
- fehlerhafter Probeauswertung,
- Fehler bei der Flächenbestimmung bzw. Flächenaufteilung der Entwässerungsfläche,
- falscher Annahme des Retentionsfaktors sowie
- falscher Einschätzung der lokalen Gegebenheiten bzw.
- falscher Abschätzung der Eingangsparameter der Berechnungsgleichung

durch. Mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse und unter Beachtung der Verschiebung des PM63/AFS<sub>ges</sub>-Verhältnisses kam er zu dem Schluss, dass sich zwar eine Fehlerquelle nicht eindeutig bestimmen lässt, dass die Fehlerquelle aber eher in dem Ansatz des verkehrsbedingten Abriebs und/oder aus der Feststoffbelastung durch Bodenerosion zu vermuten ist, da diese Anteile mehr grobe Feststoffe mit sich bringen.

In dem untersuchten Gebiet wurde der Feststoffeintrag aus nicht befestigter Freiflächen als nicht unerheblich beobachtet, vgl. Bild 5-22.



Bild 5-22: Feststoffeintrag durch Bodenerosion im Einzugsgebiet des Regenklärbeckens Mörfelden-Süd, aus [Schmitt, 2013]

Weiterhin kann vermutet werden, dass auch der nicht befestigte Anteil teilbefestigter Flächen einen größeren Beitrag zu Feststoffeinträgen liefern kann, als sich durch die Annahme des Abflussbeiwertes von 0,65 berechnen lässt.

Auch ist die Frage offen, ob die angenommene Beschädigung von befestigten Flächen durch Frostperioden (die hier aufgrund der Jahreszeit nicht angesetzt wurde) nicht über das Frühjahr hinaus zu Feststoffeinträgen führen kann.

Die genannten möglichen Fehlerquellen unterstreichen die in Kap. 5.3.3 aufgezeigten sensitiven Parameter für die Abschätzung des Feststoffabtrags in Trenngebieten.

Hinterfragt werden muss allerdings auf der anderen Seite, ob nur sechs erfasste Niederschlagsereignisse innerhalb von vier Monaten das Abflussgeschehen hinreichend abbilden können.





## 6 Anwendung der Berechnungsgleichung

Mit den Ergebnissen steht nun ein Instrument zur Verfügung, mit dem die voraussichtliche flächenspezifische Jahresfracht an  $AFS_{ges}$  und PM63 in  $[kg/(ha \cdot a)]$  eines Einzugsgebietes sowie die zu erwartende Feststoffkonzentration im Jahresmittel im Niederschlagsabfluss in  $[mg/l]$  abgeschätzt werden kann.

### 6.1 PM63-Wert einer nichtbehandlungsbedürftigen Fläche

Offen ist bislang der maximale PM63-Wert einer nichtbehandlungsbedürftigen Fläche, der als Maß für den erforderlichen Rückhalt für behandlungsbedürftige Flächen gelten kann. Dieser wird im Beispiel 1 berechnet.

Beispiel 1:

$AFS_{ges}$ - und PM63-Deposition und -Konzentration im Jahresmittel einer per Definition nichtbehandlungsbedürftigen Mischfläche eines typischen Stadtgebietes mit und ohne Belastungen durch Bodenerosion und Bautätigkeiten

Die DTV wird mit 300 und alternativ mit 2.000 gewählt, da beide Werte je nach rechtlichen Vorgaben als Grenze für eine Behandlungsbedürftigkeit gelten können [MUNLV, 2004] bzw. diskutiert werden [BLAG, 2008]. Die Belastung mit Pollen und andere Eingabeparameter wurden entsprechend der Referenzgebiete in Kap. 5.3.2 gewählt.

Die Flächenanteile entsprechen denen eines Stadtgebietes, vgl. Tabelle 5-10.

In Tabelle 6-1 und Bild 6-1 sind die Ergebnisse der Berechnung zusammengestellt.

Tabelle 6-1: Berechnung des mittleren Jahresfeststoffaufkommens in einem nicht behandlungsbedürftigen Einzugsgebiet sowie der mittleren Jahresfeststoffkonzentration

|   | 300 DTV     |      | 2.000 DTV   |      |
|---|-------------|------|-------------|------|
|   | $AFS_{ges}$ | PM63 | $AFS_{ges}$ | PM63 |
| <b>dem Niederschlagsabfluss zur Verfügung stehendes Feststoffaufkommen <math>[kg/(ha \cdot a)]</math></b> | 188         | 110  | 266         | 135  |
| <b>Feststoffaufkommen am Trenngebietsauslass <math>[kg/(ha \cdot a)]</math></b>                           | 142         | 92   | 204         | 115  |
| <b>Feststoffkonzentration ohne Retention <math>[mg/l]</math></b>  | 24,2        | 14,3 | 36,4        | 18,3 |
| <b>Feststoffkonzentration nach Retention <math>[mg/l]</math></b>  | 18,5        | 12,2 | 28,3        | 15,8 |

Unterschieden wird hier in Feststoffaufkommen (Gesamt resp. PM63), das dem Niederschlagsabfluss zur Verfügung steht und Feststoffaufkommen nach Retention in Straßenablauf und Kanalnetz, welches im Trenngebietsauslass zu erwarten ist.

Unter der Annahme mittlerer hydrologischer Verhältnisse ( $N = 800 \text{ mm}$ ,  $\psi = 0,8$  bzw.  $0,9$  für Dächer) sind auch die entsprechenden Konzentrationen berechnet.

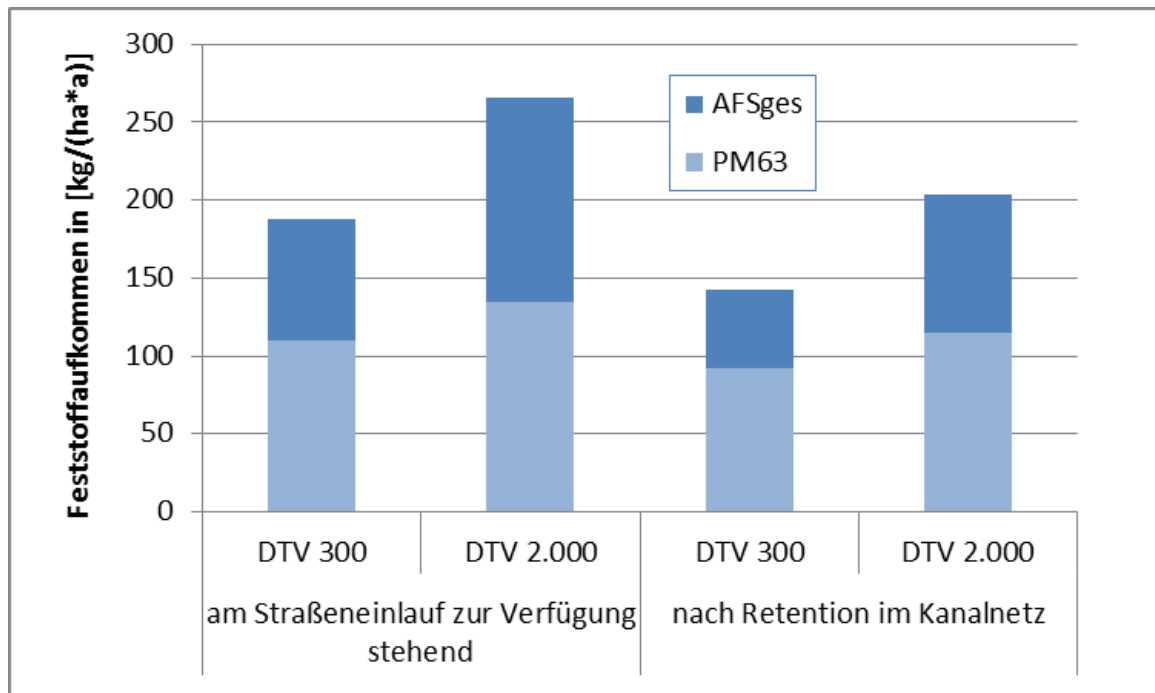


Bild 6-1: Berechnetes mittleres jährliches Feststoffaufkommen in Trenngebieten

Die berechneten Werte sind unerwartet niedrig. Es wird derzeit davon ausgegangen, dass ein Feststoffaufkommen von  $280 \text{ kg PM63}/(\text{ha}\cdot\text{a})$  die Grenze zur Behandlungsbedürftigkeit darstellt [Schmitt, 2012], also etwa das Doppelte des berechneten Wertes.

Als Erklärung könnten folgende Gedankenmodelle dienen:

Werte, die Allgemeingültigkeit besitzen sollen, werden häufig abgeleitet aus Ergebnissen von Messprogrammen, die dort durchgeführt wurden, wo die Belastung hoch ist, z.B. an vielbefahrenen Straßen oder in Einzugsgebieten, in denen bereits Probleme im Gewässer festgestellt wurden. Studien, die an Straßen z.B. mit 300 DTV durchgeführt wurden, sind dem Autor nicht bekannt.

Besondere Belastungen, wie Bodenerosion, Verschmutzungen aus Bau- oder landwirtschaftlichen Tätigkeiten sind in der Berechnung (Tabelle 6-1) nicht enthalten, können das Feststoffaufkommen aber maßgeblich beeinflussen, vgl. Kap. 3.1.3 bis 3.1.5.

Berechnet wird daher, wie sich das Feststoffaufkommen in einem Einzugsgebiet bei Anschluss von 25% unbefestigter Fläche sowie bei einem Einfluss von 10% der Flä-

che durch Bautätigkeiten erhöht. Beide Szenarien werden nicht als „behandlungsbedürftig“ in legislativen Vorgaben beschrieben, sind aber nicht ungewöhnlich in einem Einzugsgebiet. Der Staubbiederschlag auf den durch Bautätigkeiten beeinflusste Flächen wird in Anlehnung an die Erfahrungen der Stadt Herne mit Feinstaub durch Bautätigkeiten (vgl., Kap. 3.1.5) auf das 10-fache, auf 700 kg/(ha·a) heraufgesetzt, so dass sich im Mittel für die gesamte Fläche 134 kg/(ha·a) an Staubbelastung ergeben.

Das Ergebnis ist in Tabelle 6-2 und Bild 6-2 dargestellt.

Tabelle 6-2: Berechnung des mittleren Feststoffaufkommens in einem nicht behandlungsbedürftigen Einzugsgebiet, in dem jedoch Belastungen durch Bodenerosion (25% von  $A_u$ ) und Staubemissionen durch Bautätigkeiten auf 10% der Fläche vorhanden sind

|  | 300 DTV            |      | 2.000 DTV          |      |
|--|--------------------|------|--------------------|------|
|  | AFS <sub>ges</sub> | PM63 | AFS <sub>ges</sub> | PM63 |
| <b>dem Niederschlagsabfluss zur Verfügung stehendes Feststoffaufkommen [kg/(ha·a)]</b> | 395                | 199  | 473                | 225  |
| <b>Feststoffaufkommen am Trenngebietsauslass [kg/(ha·a)]</b>                           | 303                | 170  | 365                | 193  |
| <b>Feststoffkonzentration [mg/l]</b>   | 59,4               | 29,5 | 71,6               | 33,5 |
| <b>Feststoffkonzentration nach Retention im Gully-/Kanalsystem [mg/l]</b>              | 45,7               | 25,3 | 55,4               | 28,9 |

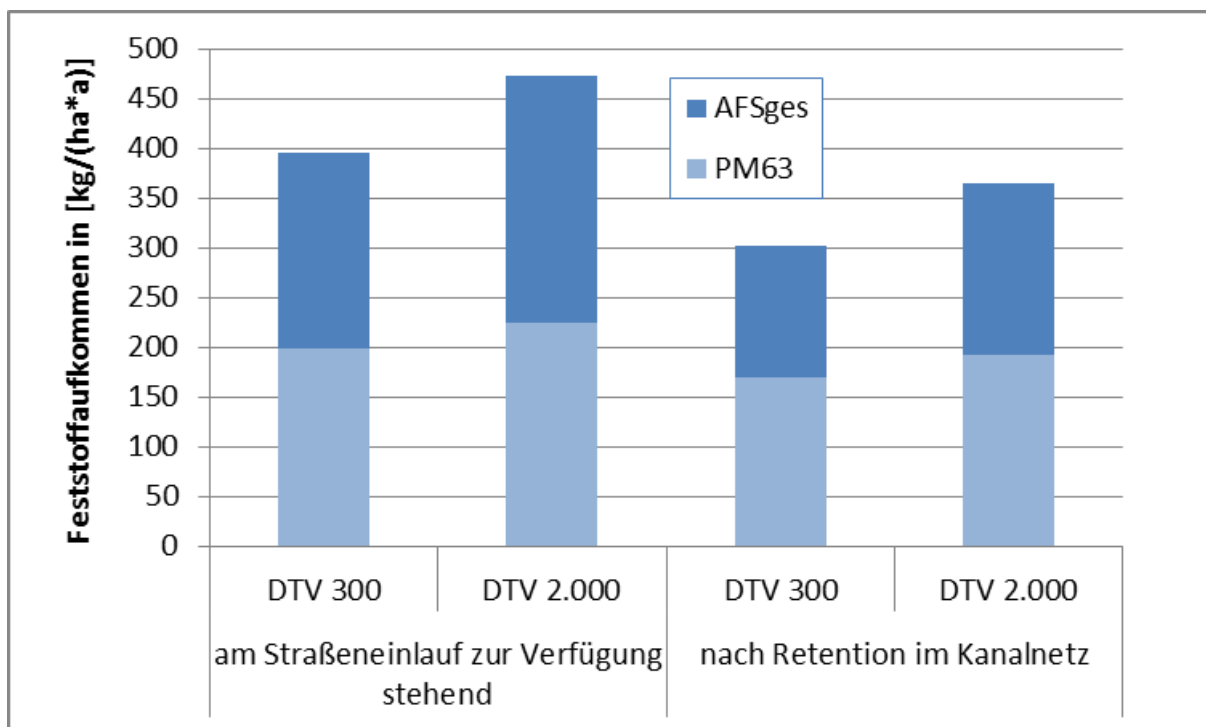


Bild 6-2: Berechnetes mittleres jährliches Feststoffaufkommen in Trenngebieten, wenn Bodenerosion und Bautätigkeiten vorhanden sind

Die berechneten Belastungen können durch diese Annahmen auf etwa das Doppelte ansteigen. Das PM63-Aufkommen in einem Gebiet mit durchgängig 2.000 DTV wird so zu 225 kg/(ha·a) abgeschätzt.

## 6.2 Maximale Feststoffkonzentrationen durch jahreszeitliche Extrembedingungen

Dezentrale Behandlungsanlagen werden oftmals bemessen nach einem festgelegten mittleren Jahresgehalt an Feststoffen (PM63). Bei einer Prüfung z.B. im Labor müssen sie einen vorgegebenen Rückhalt nachweisen (z.B. DIBt 92% für Einleiten in Grundwasser [DIBT, 2011] oder in NRW 50% für Einleiten in Oberflächengewässer [MKULNV, 2012]). Der Rückhaltswert der DIBt-Zulassungsgrundsätze wurde z.B. aus Aufkommen und zulässigen Bodenschutzwerten des Parameters PAK abgeleitet. Gezeigt werden soll anhand des 2. Beispiels, wie hoch eine Anlage, die für mittlere Feststoffgehalte (z.B. 100 mg/l PM63) ausgelegt ist, im Extremfall belastet werden kann.

Beispiel 2:

AFS- und PM63-Gehalt im 2. Quartal des Niederschlagsabflusses einer Verkehrsfläche mit der ungünstigsten Annahme, dass das Feststoffaufkommen durch die durch Frost beschädigte Fahrbahn und durch Aufkommen von Pollen gleichzeitig extrem ist. Beispiel 3.000 DTV

Das Ergebnis ist in Tabelle 5-3 dargestellt.

Tabelle 6-3: Berechnung des mittleren Feststoffaufkommens einer Verkehrsfläche mit 3.000 DTV und im Extremfall durch Frost beschädigte Fahrbahn und Belastung durch Pollen

|                                       | im Jahresmittel    |      | unter Extrembedingungen |      |
|---------------------------------------|--------------------|------|-------------------------|------|
|                                       | AFS <sub>ges</sub> | PM63 | AFS <sub>ges</sub>      | PM63 |
| <b>Feststoffaufkommen [kg/(ha·a)]</b> | 605                | 163  | 1.746                   | 508  |
| <b>Feststoffkonzentration [mg/l]</b>  | 95                 | 26   | 273                     | 79   |

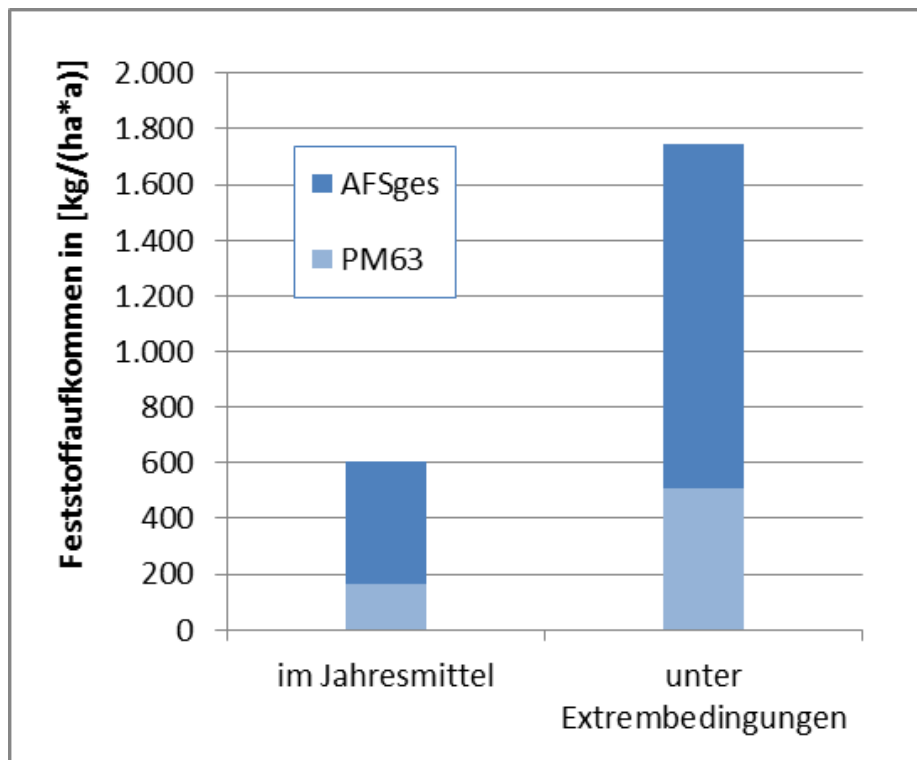


Bild 6-3: Mittleres Feststoffaufkommen einer Verkehrsfläche mit 3.000 DTV und unter Extrembedingungen (durch Frost beschädigte Fahrbahn und Belastung durch Pollen)

Die Berechnung zeigt, dass der Feststoffgehalt (AFS<sub>ges</sub> und PM63) im Extremfall auf etwa das Dreifache des Jahresmittelwertes ansteigen kann. Anlagen sollten daher so konzipiert sein, dass sie auch mit Feststoffspitzen ihre Reinigungsleistung aufrechterhalten können. Alternativ müssen Betrieb und Wartung auf solche Ereignisse angepasst werden.



## 7 Diskussion der Ergebnisse, Fazit und Ausblick

Ergebnisse aus Messprogrammen dienen dem Erkenntnisgewinn und sind sehr wertvoll für die Umweltforschung und letztendlich den Umweltschutz. Sämtliche beschriebene Phänomene bezüglich des Aufkommens, des Transports, des Verhaltens und der Schadwirkung von Feststoffen wurden durch die Auswertungen von Messungen im Feld erkannt. Widersprüchliche Aussagen in unterschiedlichen Studien sind meistens den Unterschieden der Örtlichkeiten und Randbedingungen geschuldet, können damit aber oft erklärt werden.

Mit Hilfe einer Vielzahl dieser Studien und Messprogrammen konnten Gleichungen zur Berechnung der Feststoffdeposition auf unterschiedlichen Herkunftsflächen und der Feststoffkonzentration in Niederschlagsabflüssen aufgestellt und verifiziert werden. Die Gleichungen liefern Ergebnisse im vertrauenswürdigen Bereich und können Hinweise für Extremsituationen liefern.

Den in Kapitel 3 entwickelten Berechnungsformeln wurden Sensitivitätsanalysen unterzogen und sie wurden anhand der in Kapitel 4 dargestellten Messprogramme verifiziert.

### Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalysen ergaben einige bedeutsame Zusammenhänge.

Entsprechend des Aufbaus der Formel bewirkt insbesondere die Änderung der Faktoren, die sich auf alle anfallenden Feststoffanteile beziehen, eine Änderung des Feststoffaufkommens. Bei der Berechnung für Verkehrsflächen sind es die Faktoren Randbebauung und Straßenreinigung. Die Steigerung oder Verringerung der Faktoren zur Berechnung des Feststoffaufkommens durch Frosteinwirkung, Pollen, Staubniederschlag und Annahme des LKW-Anteils wirken sich dagegen kaum aus.

Bei der Veränderung der einzelnen Faktoren und Parameter in einem als realistisch eingeordneten Bereich ergaben sich abhängig von der Herkunftsfläche deutlichere Unterschiede in der Relevanz, diese sind in Tabelle 7-1 zusammengefasst.

Bei Verkehrsflächen wirken sich rechnerisch der Staubniederschlag und die Pollenbelastung nur gering auf die Gesamtfeststoffdeposition aus. Je stärker eine Verkehrsfläche durch Fahrzeuge belastet ist, desto überprägender ist nach den Berechnungen im Vergleich zu den anderen Faktoren die Belastung durch den Verkehr. Die Faktoren für die Randbebauung (Lärmschutzwände) und für die Verkehrsart (Ampelkreuzung/Stop-und-go-Verkehr) wirken sich am stärksten auf die Feststoffdeposition aus. Ein Wintereinfluss ist nur auf Autobahnen deutlich festzustellen, da auf ihnen immer, auf anderen Verkehrsflächen jedoch nur wenig, Salz gestreut wird und gleichzeitig die Verkehrsbelastung groß ist.

Der Anschluss unbefestigter Flächen mit Bodenerosion, Bautätigkeiten oder Verschmutzungen durch die Landwirtschaft wirkt sich hauptsächlich auf Flächen ohne große Verkehrsbelastung aus.



Tabelle 7-1: Änderungen des Feststoffaufkommens im Vergleich zur Referenzfläche durch Änderung verschiedener Parameter

| Parameter  | Auto-<br>bahnen    |                  | Straßen<br>mit viel<br>Verkehr |                  | Straßen<br>mit wenig<br>Verkehr/<br>Park-<br>plätze |                  | Dach-<br>flächen   |                  | Trenn-<br>gebiete  |                  |
|--|--------------------|------------------|--------------------------------|------------------|---|------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|
|  | AFS <sub>ges</sub> | PM <sub>63</sub> | AFS <sub>ges</sub>             | PM <sub>63</sub> | AFS <sub>ges</sub>                                  | PM <sub>63</sub> | AFS <sub>ges</sub> | PM <sub>63</sub> | AFS <sub>ges</sub> | PM <sub>63</sub> |
| <b>hoher<br/>Staubniederschlag</b>                   | -                  | o                | o                              | +                | +   | + / ++           | + / ++             | + / ++           | +                  | + / ++           |
| <b>niedriger<br/>Staubniederschlag</b>               | --                 | --               | --                             | --               | --  | -                | -                  | -                | --                 | -                |
| <b>Pollen</b>  | --                 | --               | --                             | --               | o   | +                | +                  | +                | o                  | +                |
| <b>Dachabrieb</b>                                    |                    |                  |                                |                  |   |                  | +                  | +                |                    |                  |
| <b>Dachhöhe</b>                                      |                    |                  |                                |                  |   |                  | - / o              | - / o            |                    |                  |
| <b>DTV</b>   | +                  | +                | +                              | +                | -   | - / --           |                    |                  | o                  | o                |
| <b>LKW-Anteil</b>                                    | -                  | -                | -                              | -                | --  | --               |                    |                  | --                 | --               |
| <b>Verkehrsabrieb</b>                                | o / +              | o / +            | o / +                          | o / +            | -   | -                |                    |                  | -                  | -                |
| <b>Verkehrsart (gestört)</b>                         | ++                 | ++               | ++                             | ++               | o   | -                |                    |                  |                    |                  |
| <b>Randbebauung<br/>(Lärmschutzwand)</b>             | + / ++             | +++              | o                              | +                |   |                  |                    |                  |                    |                  |
| <b>Randbebauung<br/>(keine)</b>                      | +                  | + / ++           | o                              | +                |   |                  |                    |                  |                    |                  |
| <b>Breite/Anzahl<br/>Fahrspuren</b>                  | o                  | o                | o                              | o                | -   | -                |                    |                  |                    |                  |
| <b>Bodenerosion/Eintrag<br/>durch Landwirtschaft</b> | o                  | o                | +                              | +                | + / ++  | + / ++           |                    |                  | +                  | o                |
| <b>Verschmutzung durch<br/>Bautätigkeit</b>          | o                  | o                | +                              | +                | + / ++  | + / ++           |                    |                  | +                  | o                |
| <b>Straßenkehrung</b>                                | o                  | -                | o                              | -                | o   | -                |                    |                  | -                  | --               |
| <b>Wintereinfluss</b>                                | +                  | +                | -                              | -                | --  | --               |                    |                  | -                  | -                |
| <b>Retention im<br/>Kanalnetz</b>                    |                    |                  |                                |                  |   |                  |                    |                  | -                  | -                |

Beurteilungsgrundlage: Veränderung zur Referenzfläche in [%]

++:  $\geq \pm 200\%$       + / ++:  $\geq \pm 100\%$       +:  $\geq \pm 50\%$   
o:  $\geq \pm 25\%$       -:  $\geq \pm 10\%$       --  $< \pm 10\%$

Referenzflächen: vgl. Tabelle 5-2 (Straße); Tabelle 5-4 (Autobahn); Tabelle 5-6 (Parkplätze);  
Tabelle 5-8 (Dach); Tabelle 5-11 (Trenngebiet Stadt)

Das Feststoffaufkommen auf Dachflächen wird besonders durch hohen Staubbiederschlag, Dachabrieb sowie eine mögliche Pollenbelastung beeinflusst. Die Dachhöhe spielt eine untergeordnete Rolle.

In Niederschlagsabflüssen von Trenngebieten werden verschiedene Abflussarten zusammengefasst, der Einfluss der einzelnen Parameter der verschiedenen Flächen vermischt sich dort daher auch. Die Veränderung von baulichen Parametern wurde nicht betrachtet, da davon ausgegangen wurde, dass ein größeres Einzugsgebiet durch verschiedene bauliche Gegebenheiten geprägt ist. Ein hoher Staubbiederschlag macht sich relativ stark auf das Feststoffaufkommen bemerkbar, da er auf die gesamte Fläche wirkt. Auch Anteile an Bodenerosion oder Verschmutzung durch Landwirtschaft oder Bautätigkeit machen sich im Gesamtabfluss bemerkbar. Die DTV würde sich bei einem theoretischen Wert von etwa 10.000 zwar bemerkbar machen, jedoch ist dieser Wert in einem Einzugsgebiet im Durchschnitt aller Straßen unwahrscheinlich. Die Veränderung aller anderen Parameter wirken sich kaum auf die Feststoffdeposition aus.

Bei der Betrachtung des PM63 ergeben sich ähnliche Zusammenhänge. Bauliche Gegebenheiten beeinflussen den PM63 von Verkehrsflächen am stärksten, da insbesondere die feineren Anteile dem Transport durch Wind oder Turbulenzen ausgesetzt sind. Bei Verkehrsflächen mit einer hohen Verkehrsbelastung kann sich die Fahrweise deutlich auf den PM63-Anfall auswirken. Bei Verkehrsflächen mit geringer Verkehrsbelastung ist dagegen der Einfluss eines Eintrags durch Bodenerosion, der Verschmutzung durch die Landwirtschaft oder durch Bautätigkeiten höher. Die Änderung des Staubbiederschlags oder des Polleneintrags wirken sich ebenfalls deutlich auf gering mit Verkehr belastete Flächen aus, da der Feinanteil dieser Anteile mit 80% angenommen wurde.

Das PM63-Aufkommen auf Dachflächen wird am stärksten durch hohen Staubbiederschlag, aber auch durch Pollen und Dachabrieb beeinflusst.

In Trenngebieten wirken sich nur die Annahme eines hohen Staubbiederschlags und die Annahme einer hohen Pollenbelastung deutlich auf das PM63-Aufkommen aus. Alle anderen Faktoren wirken sich rechnerisch gering und überwiegend geringer als auf das Gesamtfeststoffaufkommen aus. Begründet werden kann die geringe Änderung durch landwirtschaftliche Nutzung oder Bodenerosion mit dem angenommen geringen Feinanteil von 33%, der noch nicht durch Messungen belegt ist.

Straßenkehrungen beeinflussen den PM-63-Abtrag durch Niederschlagsabflüsse weniger stark als den Gesamtfeststoffabtrag.

### Verifizierung

Zur Verifizierung der Gleichungen mit Hilfe von veröffentlichten Messprogrammen wurden sechs Studien für Straßenabflüsse, neun Studien für Autobahnabflüsse an zwölf Standorten, sechs Studien für Parkplatzabflüsse, elf Studien für Dachabflüsse und zwei Studien für Trenngebietsabflüsse verwendet. Weitere zur Verfügung ste-

hende Studien enthielten nicht genügend Angaben zu den Randbedingungen oder wiesen eine zu geringe Anzahl an beprobten Niederschlagsabflüssen auf.

Während der Verifizierung wurden die Parameter angepasst und optimiert. So stellte sich z.B. heraus, dass einige Parameter abhängig voneinander sind: der Wirkungsgrad einer Retention im Kanalnetz z.B. ist umso geringer, je höher der Wirkungsgrad der Straßenreinigung ist (unrealistisches Extrembeispiel: Sind sämtliche Feststoffe durch Straßenreinigung entfernt, kann keine Retention im Kanalnetz mehr stattfinden; oder: Werden viele Feststoffe verweht, ist die Straßenreinigung weniger effektiv).

Schließlich konnten alle Parameter und Faktoren so angepasst werden, dass Mess- und berechnete Werte für den Gesamtfeststoffgehalt in Straßen-, Autobahn-, Parkplatz- und Dachabflüssen in einem zufriedenstellenden Größenordnungsbereich übereinstimmten.

Da die Abweichungen teilweise Minderbefunden, teilweise zu hohen Befunden entsprechen, lässt vermuten, dass keine systematische Fehleinschätzungen enthalten sind. Die Abweichungen sind vermutlich auf die Qualität der Beschreibung der Randbedingungen zurückzuführen, die teilweise geschätzt wurden und zur Berechnung des zu erwartenden Feststoffgehaltes wesentlich sind sowie auf die Erfassung zu weniger Niederschlagsereignisse.

Die Anwendung der Formel für Trenngebiet wurde anhand zweier Studien verifiziert. Die in mehreren Zeiträumen beprobten Zuläufe im Einzugsgebiet der Pilotanlage Halenreie erbrachten gute Übereinstimmungen zwischen gemessenen und errechneten Werten. Die Diskrepanzen der zweiten Studie (RKB Mörfelden-Süd) konnten auf der einen Seite ansatzweise mit dem nicht in Ansatz gebrachten möglichen Feststoffeintrag durch Bodenerosion teilbefestigter Flächen und Fahrbahnabrieb auch außerhalb der Frostperiode erklärt werden. Auf der anderen Seite war die Probandichte evtl. zu gering, um auf eine Jahresfracht hochrechnen zu können. Hier wären weitere Studien mit einer ausreichenden Probandichte und einer ausführlichen Beschreibung der Randbedingungen des Einzugsgebietes hilfreich.

Die PM<sub>63</sub>-Deposition wurde theoretisch aus Korngrößenverteilungen der einzelnen Anteile (Staubniederschlag, Verkehrsabrieb etc.) abgeleitet. Es standen lediglich eine Studie an drei Autobahnen [Grotehusmann et al., 2013], eine Studie für Dachabflüsse sowie eine Studie für Trenngebietsabflüsse zur Verfügung. Letztere wurden in Form von Masterarbeiten an der FH Frankfurt im Rahmen dieser Dissertation durchgeführt [Kreiling, 2012], [Schmitt, 2013]. Somit mangelte es insgesamt an ausreichenden Studien zur Verifizierung und die Abweichungen zwischen gerechneten und gemessenen Werten waren relativ groß.

### Fazit und Ausblick

Messprogramme sind oftmals sehr schwierig und kostenintensiv durchzuführen. Sie haben den Nachteil, dass nicht alle Niederschläge erfasst werden können, oft nur wenige Ereignisse im Jahresverlauf. Somit kann das Berechnen des Feststoffaufkom-

mens ein hilfreiches Instrument zur Ergänzung oder Bestätigung von Messprogrammen sein.

Die Berechnungsgleichungen lassen sich auch auf einzelne Schadstoffe weiterentwickeln, hier müssten analog zum Faktor PM63 einzelne Schadstofffaktoren für die jeweiligen Komponenten der Formeln (Staubniederschlag, Abrieb etc.) eingeführt werden und zusätzlich lösliche Anteile berücksichtigt werden. Transport und Verhalten dieser in Abhängigkeit vom Chemismus des Niederschlags teils gelöst, teils fest vorliegenden Parameter sind jedoch ungleich schwieriger als bei Feststoffen in Berechnungsformeln darzustellen. Zur Identifizierung dieser Phänomene und Abhängigkeiten bedarf es wiederum gezielter Untersuchungen und Messprogramme im Feld, wie:

- Schadstoffgehalt in Niederschlagsabflüssen wenig belasteter Straßen (z.B. 300 bis 2.000 DTV), um Relevanz für Niederschlagswasserbehandlung dort nachweisen zu können,
- Schadstoffgehalt in Niederschlagsabflüssen von Industrie- und Gewerbegebieten unterschiedlicher Nutzung, um eine weitere Einteilung von niederschlagsabflussbeeinträchtigenden Branchen zu ermöglichen.

Messungen zum PM63-Anfall bzw. zum Verhalten sind nur wenige vorhanden. Hier empfiehlt es sich folgende Fragestellungen in Zukunft gezielt zu beleuchten:

- PM63-Anteil im Staubniederschlag (ländlicher Hintergrund, städtischer Hintergrund, emissionsbeeinflusst)
- PM63-Anteil im Feststoffaufkommen von Dachflächen mit Abrieb
- PM63-Anteil in durch Pollen beeinflusstem Staubniederschlag bzw. direkte Testung des PM63-Anteils in relevanten Pollen
- PM63-Anteil in unterschiedlichen Verkehrsflächenabflüssen (Autobahnen, Parkplätze, Straßen mit wenig und viel DTV, Straßen mit unterschiedlicher Randbebauung)

Da die zusätzliche Bestimmung des Parameters PM63 innerhalb eines Messprogrammes über die sehr aufwändigen Verfahrensschritte:

- Standortauswahl,
- Konzeption des Messprogrammes,
- Einrichten des Probennehmers oder der Probennahmeverrichtung,
- Durchführen der Probennahme,
- Analyse des AFS<sub>ges</sub>,

hinaus nur eine weitere Filtration und ggf. Homogenisierung bedeuten, sollte dieser Parameter zukünftig zum AFS<sub>ges</sub> immer mitgemessen werden.

Falls in Zukunft weitere Studien zum PM63 verfügbar werden, so ist eine Anpassung der hier vorgeschlagenen PM63-Anteile, eventuell mit weiteren Faktoren die Randbedingungen betreffend, problemlos möglich.

Auch ohne die Kenntnis oben dargestellter offener Punkte stellen die hier vorgestellten Gleichungen zur  $AFS_{ges}$ -Deposition eine gute und kostengünstige Möglichkeit dar, Einzugsgebiete ergänzend zu Messprogrammen hinsichtlich des Feststoffaufkommens zu bewerten. Hierzu ist allerdings das sorgfältige Erfassen der Randbedingungen des Einzugsgebiets durch Beobachten und Beschreiben und durch Auswerten von Flächenanteilen, Verkehrszählungen, Vegetationsanteilen, Erfragen von Straßenreinigungsturnüssen, Winterdiensten, Staubbiederschlägen, möglicher Bodenerosion, Bautätigkeiten, möglicher Verschmutzung durch Landwirtschaft usw. erforderlich.

## 8 Zusammenfassung

### Einleitung (Kapitel 1)

Niederschlagsabflüsse sind abhängig vom Standort, von der Nutzung im Einzugsgebiet und der verwendeten Materialien der Flächen, mit denen sie in Berührung kommen, unterschiedlich mit Schmutz- oder Schadstoffen belastet. Eine wichtige Stoffgruppe zur Beschreibung von Niederschlagsabflüssen sind Feststoffe. Vor allem die feinere Fraktion kann hoch mit Schwermetallen, polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) oder weiteren organischen Schadstoffen beladen sein und ein Gewässer bei Einleitung erheblich belasten.

Die Parameter „AFS – abfiltrierbare Stoffe“ oder auch „AFS<sub>fein</sub> – feine abfiltrierbare Stoffe“ werden daher oft als Maß für die Verschmutzung von Niederschlagsabflüssen herangezogen und sollen zukünftig als maßgebliche Bewertungsgröße definiert werden [Schmitt, 2012]. Erstmals wurde in der vorliegenden Arbeit der Begriff PM63 für feine abfiltrierbare Stoffe mit einer Korngröße zwischen 0,45 µm und 63 µm definiert.

Die Konzentration an Feststoffen in Niederschlagsabflüssen schwankt nicht nur von Einzugsgebiet zu Einzugsgebiet, sondern auch abhängig von den aktuellen Randbedingungen eines Einzugsgebietes beträchtlich. In Messprogrammen werden oft nur einzelne Ereignisse erfasst, die für die Angabe eines Jahresmittelwertes nicht genügen.

Darüber hinaus gibt es über die Deposition speziell von PM63 auf Herkunftsflächen oder die PM63-Konzentration in Niederschlagsabflüssen bislang kaum Untersuchungen.

### Ziel der Arbeit (Kapitel 1)

Ein Ziel der Arbeit war es, den Kenntnisstand bezüglich Herkunft, Verhalten und Verbleib, aber auch Zusammensetzung und Korngrößenverteilung von Feststoffen in Niederschlagsabflüssen darzustellen. Ein weiteres Ziel lag darin, anhand der Auswertung von Ergebnissen aus Studien und Messkampagnen Gleichungen für unterschiedliche Herkunftsflächen (Verkehrsflächen, Dachflächen, Mischflächen) zu entwickeln, mit denen das flächenspezifische jährliche Aufkommen abfiltrierbarer Stoffe (AFS) und feiner Feststoffe (PM63) in [kg/(ha·a)] bzw. jeweils eine mittlere Jahreskonzentration in Niederschlagsabflüssen in [mg/l] abgeschätzt werden können.

### Darstellung des Kenntnisstandes (Kapitel 2)

Zunächst wurde der Kenntnisstand bezüglich Herkunft, Verhalten und Verbleib, aber auch Zusammensetzung und Korngrößenverteilung von Feststoffen auf Verkehrs- und Dachflächen aus einer Vielzahl von Literaturdaten dargestellt. Da bisher wenige Kenntnisse über das PM63-Aufkommen und -Verhalten bestehen, wur-

den auch zahlreiche Studien bezüglich des Staubniederschlags, der im Korngrößenbereich bis maximal 200 µm vorliegt und einen Einfluss auf die Feststoffdeposition auf alle Flächentypen hat, berücksichtigt.

### Entwicklung von Formeln zur Berechnung des Feststoffaufkommens (Kapitel 3)

In Kap. 3 wurden die einzelnen Anteile, aus denen sich das Feststoffaufkommen auf einer Siedlungsfläche zusammensetzt, quantifiziert. Diese sind im Wesentlichen „Staubniederschlag“, „verkehrsbedingter Abrieb“, „Dachabrieb“, „vegetationsbedingte Belastung“, „winterbedingtes Feststoffaufkommen“, „Bodenerosion“ und „Einträge durch Bau- und landwirtschaftliche Tätigkeiten“.

Zusätzlich zu den feststofferhöhenden Aspekten wie Verkehrsverhalten, DTV oder verstärkter Winterdienst wurden feststoffmindernde Aspekte wie Straßenreinigung, Verwehungen oder Retention betrachtet, die mit Faktoren versehen wurden.

Sämtliche Parameter und Faktoren wurden schließlich in zwei Formeln (für Verkehrsflächen und für Dachflächen) zusammengefasst, mit denen die Abschätzung des AFS<sub>ges</sub>- und des PM<sub>63</sub>-Aufkommens möglich ist. Zur Ermittlung des Feststoffaufkommens in Mischflächen wurde die Verwendung von typischen Flächenanteilen vorgeschlagen. Für die Berechnung einer Feststoffkonzentration in Niederschlagsabflüssen wurden je nach Flächenart Abflussbeiwerte vorgegeben.

### Darstellung von Messprogrammen (Kapitel 4)

In Kapitel 4 wurden Messprogramme getrennt nach Verkehrsflächen-, Dach- und Trenngebietsabflüssen beschrieben. Da Messergebnisse maßgeblich von der Probenahmedichte, der Art der Probennahme, der Analytik und der Datenauswertung abhängen, wurden zunächst mögliche Fehler und resultierende Unterschiede beschrieben.

Der häufig vorkommende AFS<sub>ges</sub>-Messbereich (im (Jahres-)mittel) der ausgewerteten Studien wurde folgendermaßen eingegrenzt:

- Straßen: 30 bis 700 mg/l, ein Schwerpunktwert kann aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen nicht bestimmt werden,
- Autobahnen: 40 bis 700 mg/l, höhere DTV wird durch ruhigere Fahrweise, höherem Anteil an Verwehen und Verspritzen und größere Straßenfläche je DTV ausgeglichen,
- Parkplätze: unter 100 mg/l (40 bis 90 mg/l), LKW-Parkplätze etwas höher,
- Trenngebiete: 20 bis 180 mg/l, häufig unter 100 mg/l,
- wenig belastete Dachflächen: 20 bis 30 mg/l,
- durch z.B. Staubniederschlag oder Dachabrieb belastete Dachflächen: bis 60 mg/l.

Weiterhin wurden die Studien hinsichtlich ihrer Güte bezüglich Probennahme, Analytik und Datenauswertung und der Beschreibung hinsichtlich der für die Verifikation erforderlichen Kenntnis über die Randbedingungen gesichtet.



## Sensitivitätsanalyse (Kapitel 5)

In Sensitivitätsanalysen wurden sensitive und auf der anderen Seite unkritische Parameter unterschieden nach Siedlungsflächentyp identifiziert.

Das Feststoffaufkommen auf Dachflächen wird besonders durch Dachabrieb, den Staubbiederschlag sowie einer möglichen Pollenbelastung beeinflusst. Die Dachhöhe spielt eine untergeordnete Rolle.

Bei Verkehrsflächen wirken sich der Staubbiederschlag und die Pollenbelastung dagegen weniger auf die Gesamtfeststoffdeposition aus. Je stärker eine Verkehrsfläche durch Fahrzeuge belastet ist, desto überprägender ist die Belastung durch den Verkehr. Die Faktoren für die Randbebauung (Lärmschutzwände) und für die Verkehrsart (Ampelkreuzung/Stop-und-go-Verkehr) wirken sich am stärksten auf die Feststoffdeposition aus. Ein Wintereinfluss ist nur auf Autobahnen festzustellen, da die Verkehrsbelastung groß ist und auf ihnen immer, auf anderen Verkehrsflächen jedoch nur wenig, Salz gestreut wird.

Der Anschluss unbefestigter Flächen mit Bodenerosion, Bautätigkeiten oder Verschmutzungen durch die Landwirtschaft wirkt sich hauptsächlich auf Flächen ohne große Verkehrsbelastung aus.

## Verifizierung der Formeln (Kapitel 5)

Zur Verifizierung der Gleichungen mit Hilfe von veröffentlichten Messprogrammen wurden sechs Studien für Straßenabflüsse, neun Studien für Autobahnabflüsse an zwölf Standorten, sechs Studien für Parkplatzabflüsse, elf Studien für Dachabflüsse und zwei Studien für Trenngebietsabflüsse verwendet. Weitere zur Verfügung stehende Studien enthielten nicht genügend Angaben zu den Randbedingungen oder wiesen eine zu geringe Anzahl an beprobten Niederschlagsabflüssen auf.

Einige Parameter konnten im Zuge der Verifizierung der Formeln optimiert und angepasst werden. So stellte sich z.B. heraus, dass nicht alle Parameter unabhängig voneinander sind: der Wirkungsgrad eines Rückhalts im Straßeneinlauf/Kanalsystems z.B. ist umso geringer, je höher der Wirkungsgrad der Straßenreinigung ist (unrealistisches Extrembeispiel: sind sämtliche Feststoffe durch Straßenreinigung entfernt, kann keine Retention im Kanalnetz mehr stattfinden oder: werden viele Feststoffe verweht, ist die Straßenreinigung weniger effektiv).

Schließlich konnten alle Parameter und Faktoren so angepasst werden, dass Mess- und berechnete  $AFS_{ges}$ -Werte von Straßen-, Autobahn-, Parkplatz- und Dachabflüssen zumindest im Größenordnungsbereich übereinstimmten.

Schwierigkeiten brachte die Anwendung der Formel für Trenngebiete, da nur zwei Studien aufgrund einer ausführlichen Beschreibung geeignet erschienen. Hier wären weitere Studien hilfreich, in denen auch die Randbedingungen des Einzugsgebietes ausführlich beschrieben werden.

Die Verifikation von PM63-Deposition und PM63-Transport in Niederschlagsabflüsse konnte nicht abschließend durchgeführt werden, da es zu wenige Informationen über Aufkommen und Verhalten und zu wenige durchgeführte Messprogramme gibt.

### Spezielle Fragestellungen (Kapitel 6)

In Kap. 6 wurden mit Hilfe der entwickelten Formeln einige spezielle Fragestellungen beleuchtet, wie hoch z.B. die Belastung eines Einzugsgebietes ist, welches als gerade nicht behandlungsbedürftig eingestuft wird und dessen Stoffaustrag somit noch tolerierbar ist. Daraus könnte dann eine Festlegung einer emissionsseitigen Anforderung für Niederschlagsabflüsse abgeleitet werden.

### Ausblick (Kapitel 7)

Zukünftige Untersuchungen sollten sich mehr mit der Frage nach dem PM63-Anteil der Feststoffe in Niederschlagsabflüssen befassen. Im Detail sind vor allem folgende Fragestellungen ungeklärt:

- PM63-Anteil im Staubniederschlag (ländlicher Hintergrund, städtischer Hintergrund, emissionsbeeinflusst),
- PM63-Anteil im Feststoffaufkommen von Dachflächen mit Abrieb,
- PM63-Anteil in durch Pollen beeinflusstem Staubniederschlag bzw. direkte Testung des PM63-Anteils in relevanten Pollen,
- PM63-Anteil in unterschiedlichen Verkehrsflächenabflüssen (Autobahnen, Parkplätze, Straßen mit wenig und viel DTV, Straßen mit unterschiedlicher Randbebauung).

### Fazit (Kapitel 7)

Als Fazit wurden gezogen, dass das rechnerische Abschätzen des Feststoffaufkommens eine gute Möglichkeit ist, Messprogramme, die oftmals sehr schwierig und kostenintensiv durchzuführen sind, zu ergänzen. Hierzu ist allerdings das sorgfältige Erfassen der Randbedingungen des Einzugsgebiets durch Beobachten und Beschreiben und durch Auswerten von Flächenanteilen, Verkehrszählungen, Vegetationsanteilen, Erfragen von Straßenreinigungsturnussen, Winterdiensten, Staubniederschlägen, möglicher Bodenerosion, Bautätigkeiten, möglicher Verschmutzung durch Landwirtschaft usw. erforderlich.

## 9 Literatur

AGÖF (Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e.V.) (2012): Bitumen und Teer, Springe-Eldagsen 2012. Aus: [http://agoef.de/agoef/schadstoffe/bitumen\\_teer.html](http://agoef.de/agoef/schadstoffe/bitumen_teer.html)

Ahrens, D.; Anke, K.; Drechsler, S.; Gromes, B.; Holst, J.; Lumpp, R.; Sähn, E.; Scheu-Hachtel, H.; Scholz, W. (2007): Einflussgrößen auf die zeitliche und räumliche Struktur der Feinstaubkonzentrationen. Im Auftrag des Umweltministerium Baden-Württemberg. Hrsg. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. Karlsruhe, Juli 2007. Aus: [www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servelet/is/20250/feinstaubeinfluesse\\_endfassung.pdf?command=downloadContent&filename=feinstaub-einfluesse\\_endfassung.pdf](http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servelet/is/20250/feinstaubeinfluesse_endfassung.pdf?command=downloadContent&filename=feinstaub-einfluesse_endfassung.pdf)

Amrosik (2012): Berechnung von Konzentrationen abfiltrierbarer Stoffe ( $AFS_{\text{fein}}$ ) in Straßenabflüssen in Abhängigkeit von Charaktermerkmalen der Straße. Bachelorarbeit an der FH Frankfurt, Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft und Hydromechanik, Juni 2012

Aryal, R.K.; Furumai, H.; Nakajima, F.; Boller, M. (2005): Dynamic behaviour of fractional suspended solids and particle bound polycyclic aromatic hydrocarbons in highway runoff. *Water Research*, 39, S. 5.126-5.134

ASTRA (Bundesamtes für Straßen, Schweiz) (2009):  $PM_{10}$ -Emissionsfaktoren von Abriebspartikeln des Straßenverkehrs (APART). Forschungsauftrag ASTRA 2005/007, August 2009

Athanasiadis K. (2005): On-site Infiltration of Roof Runoff by Using Clinoptilolite as an Artificial Barrier Material. *Berichte aus der Siedlungswasserwirtschaft*, TU München, Bd. 187

Athanasiadis K., Helmreich, B.; Horn, H. (2006): Filtration des Niederschlagswassers von Kupferdächern zum Schutz von Boden und Grundwasser. Abschlussbericht eines Forschungsvorhabens gefördert durch das Bayerische Landesamt für Umwelt, TU München, 24. Juli 2006

ATV-DVWK (2003): Arbeitsblatt A 198, Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen, April 2003

ATV-DVWK (2004): Merkblatt M 165; Anforderungen an Niederschlag-Abfluss-Berechnungen in der Siedlungsentwässerung, Januar 2004

Baekken, T. (1993): Environmental effects of asphalt and tyre wear by road traffic. *Nordisk Seminar-og Arbejdsrapporter 1992:628*. Copenhagen, Denmark. In Norwegisch

Ball, J.E.; Abustan, I. (1995): "An Investigation of Particle Size Distribution during Storm Events from an Urban Catchment". *Proceedings of the Second International Symposium on Urban Stormwater Management*, Vol. 2, NCP No. 95/03, S. 531 – 535

- Bannermann, R.; Owens, D.W.; Dodds, R.B.; Hornever, N.J. (1993): Sources of pollutants in Wisconsin stormwater. *Water, Science & Technology*, Vol. 28, No. 3-5, S. 241-259
- Barrett, M.E.; Malina, J.M.; Charbeneau, R.J., Ward, G.H. (1995): Characterization of Highway Runoff in the Austin, Texas Area. CRWR 263. Center for Research in Water Resources, Austin, Texas, 1995
- Bast (Bundesanstalt für Straßenwesen) (2008): Ermittlung des Beitrages von Reifen-, Kupplungs-, Brems- und Fahrbahnabrieb an den PM10-Emissionen von Straßen. Bearbeiter: Quass, U.; John, A.; Beyer, M.; Lindermann J.; Kuhlbusch, T.; Hirner, A.; Sulkowski, M.; Sulkowski, M; Hippler, J. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Heft V 165, Bergisch Gladbach, März 2008
- Bast (Bundesanstalt für Straßenwesen) (2010): Stoffeintrag in Straßenrandböden, Messzeitraum 2005/2006. Bearbeiter: Kocher, B.; Brose, S.; Chlubek A.; Karagüzel, N.; Klein, N.; Siebertz, I. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Heft V 198, Bergisch Gladbach, 2010
- Bast (Bundesanstalt für Straßenwesen) (2011): Stoffeintrag in Straßenrandböden – Messzeitraum 2008/2009. Bearbeiter: Beer, F.; Surkus, B.; Kocher, B. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Heft V 209, Bergisch Gladbach, November 2011
- Bayerische Architektenkammer (2012): Virtuelle Hochschule Bayern: Kurs: Stoffliche und energetische Bauteiloptimierung. Aus: <http://volland.userweb.mwn.de/vhb/einblicke/wandbau.pdf>
- BBodSchV (1999): „Bundes- Bodenschutz- und Altlastenverordnung“, vom 12. Juli 1998, BGBl. Nr. 36, 1.554
- BBS (Behörde für Bildung und Sport) (2011): Sekundäre Aerosole. Climate Service Center und Hamburger Bildungsserver, Hamburg. Aus: [http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel /index.php/Datei:Aerosole\\_prozesse.gif](http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel /index.php/Datei:Aerosole_prozesse.gif)
- Beier, M. (2008): Urbane Beeinflussung des Grundwassers: Stoffemissionen und –immissionen am Beispiel Darmstadts. Dissertation am Fachbereich Material- und Geowissenschaften an der TU Darmstadt, Februar 2008
- Berbee, R.; Rijs, G.; Brouwer, M.W. (1996): Treatment of runoff from highways. Report 96.017 (Dutch), Institut Inland Water Manage Waste Water Treatment, Lelystad, Netherland, zitiert in Berbee et al. 1999
- Berbee, R.; Rijs, G.; Brouwer, R.; Velzen, L. (1999): Characterization and treatment of runoff from highways in the Netherlands paved with impervious and pervious asphalt. *Water Environment Research*, Vol. 71, No. 2, S. 183-190
- Berndtsson, L. C.; Bengtsson, L.; Jinno, K. (2009): Runoff Water Quality from Intensive and Extensive vegetated Roofs. *Ecological Engineering* 35 (2009), S. 369 - 380

Bertrand-Krajewskin, J. L.; Chebbo, G.; Saget, A. (1998): Distribution of pollutants Mass vs Volume in Stormwater Discharges and the First-Flush Phenomenon. *Water Research*, 1998, 32(8), S. 2341 - 2356

BfVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) (2011): Lkw-Parken in einem modernen, bedarfsgerechten Rastanlagensystem <http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/73144/publicationFile/45249/lkw-parken-in-einem-modernen-bedarfsgerechten-rastanlagensystem.pdf>

BfVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) (2012): Klima und Umwelt. Global Atmosphere Watch. Aerosole. Aus: [http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?\\_nfpb=true&\\_pageLabel=dwdwww\\_result\\_page&gsbSearchDocId=647698](http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_result_page&gsbSearchDocId=647698)

Bittner, S. (2006): Ermittlung der Schwermetallabgabe (run-off) metallischer Werkstoffe infolge atmosphärischer Korrosion, insbesondere bei Blei, Kupfer und Zink: Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, 2006

BLAG (Bund-Länder-Arbeitsgruppe) (2008): „Entwürfe für einen „Anhang Niederschlagswasser“ zur Abwasserverordnung“ vom 04.06.2008, 21.02.2008, 19.09.2007, 21.08.2005

Boller, M., Kaufmann, P. und Ochsenbein, U. (2005a): Schadstoffe im Straßenabwasser einer stark befahrenen Straße und deren Retention mit neuartigen Filterpaketen aus Geotextil und Adsorbermaterial. Schlussbericht Forschungsprojekt in Zusammenarbeit mit eawag, Dübendorf, FH Bern, GSA, Bern, ASTRA, Bern, BUWAL, Bern. Dübendorf 2005

Boller, M., Kaufmann, P. und Ochsenbein, U. (2005b): Bankette bestehender Straßen. Untersuchung der Versickerung von Straßenabwasser über Straßenrandstreifen an einer bestehenden Straße. Schlussbericht Forschungsprojekt in Zusammenarbeit mit eawag, Dübendorf, FH Bern, GSA, Bern, ASTRA, Bern, BUWAL, Bern. Dübendorf 2005

Bolognesi, A.; Casadio, A.; Ciccarello, A.; Maglionico, M.; Artina, S. (2008): Experimental study of Roadside Gully Pots Efficiency in Trapping Solids Washed off During Rainfall Events. Proceedings 11<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK 2008

Brombach, H.; Fuchs, S. (2002): Datenpool gemessener Verschmutzungskonzentrationen von Trocken- und Regenwetterabflüssen in Misch- und Trennkanalesationen. Abschlussbericht, ATVDVWK-Forschungsfond-Vorhaben 1/01, ATV-DVWK, Hennef

Brunner, G. P. (1977): „Straßen als Ursachen der Verschmutzung von Regenwasserabflüssen – Ein Überblick über den Stand der Forschung“. *Wasserwirtschaft* 67, (4), S. 98 ff.

BSUG (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit) (2008a): „Technischen Regeln zum schadlosen Einleiten von gesammeltem Niederschlagswasser in oberirdische Gewässer (TRENNOG) vom 17. Dezember 2008

BSUG (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit) (2008b): „Technischen Regeln zum schadlosen Einleiten von gesammeltem Niederschlagswasser in das Grundwasser (TRENGW) vom 17. Dezember 2008

Büchner, H.; Opfermann, B. (1989): Belastung des Abflusses von Dachflächen im Bereich der Freien und Hansestadt Hamburg. Umweltbehörde Amt für Umweltschutz, Fachamt für Gewässer- und Bodenschutz, Hamburg

BUNR (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2002): Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24. Juli 2002

Butler, D.; Clark, P. (1995): Sediment Management in Urban Drainage Catchments. CIRIA (Construction Industry Research Information Association) Report 134, London 1995

BWK (Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau) (2004): Merkblatt 3: Ableitung von immissionsorientierten Anforderungen an Misch- und Niederschlagswassereinleitungen unter Berücksichtigung örtlicher Verhältnisse. 2. Auflage, Pfullingen, Juli 2004.

Charlesworth, S.M. und Lees, J.A. (1999): The Distribution of the Heavy Metals in Deposited Urban Dusts and Sediments, Coventry, England. Environmental Geochemistry and Health 21 (1999), S. 97 - 115

Colandini, V. (1997). Effets des structures reservoirs à revêtement poreux sur les eaux pluviales: qualités des eaux et devenir des métaux lourds. Dissertation. L'Université de Pau et des pays de l'adour, Pau, 24. Januar 1997

Deutsches Kupferinstitut Düsseldorf (o.J.): Kupfer und Co. Aus: [http://www.kupferinstitut.de/front\\_frame/frameset.php3?client=1&parent=13&idcat=13&lang=1&sub=yes](http://www.kupferinstitut.de/front_frame/frameset.php3?client=1&parent=13&idcat=13&lang=1&sub=yes)

DIBt (Deutsches Institut für Bautechnik) (2011): Zulassungsgrundsätze für Niederschlagswasserbehandlungsanlagen. Teil 1: Anlagen zum Anschluss von Kfz-Verkehrsflächen bis 2.000 m<sup>2</sup> und Behandlung des Abwassers zur anschließenden Versickerung in Boden und Grundwasser. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, Fassung Februar 2011

Dierkes, C. (2010): Untersuchungen einer Behandlungsanlage für Straßenabflüsse an der Bremer Straße in Hamburg Harburg über einen Zeitraum von drei Jahren. Im Auftrag von 3P Technik Filtersysteme GmbH, Donzdorf, 2010

Dierschke, M; Welker, A. (2013): Feine Feststoffe (PM<sub>63</sub>) in Dachabflüssen. gwf Wasser Abwasser, (154), Nr. 11, S. 1242-1249

DIN EN 872 (2005): Wasserbeschaffenheit – Bestimmung suspendierter Stoffe – Verfahren durch Abtrennung mittels Glasfaserfilter; Deutsche Fassung EN 872: April 2005

DIN 38 409, Teil 2 (1987): Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H) Bestimmung der abfiltrierbaren Stoffe und des Glührückstandes (H 2), März 1987

Dobner, I.; Holthuis J.-U. (2011): Praxiserprobung und technische Optimierung eines neuartigen Hochleistungs-Pflanzenfilterverfahrens zur Behandlung belasteter Niederschlagswässer. AiF-Vorhaben-Nr: 15508 N/1 und N/2; Bremen, Februar 2011

Drapper, D. (1998): Road Runoff Water Quality in South-east Queensland. Progress Report, July 1998, unpublished, report for Dept. of Main Roads, Qld. Zitiert in [Loyd und Wong 1999]

Drapper, D.; Tomlinson, R., Williams, P. (1999): An Investigation of the Quality of Stormwater Runoff from Road Pavement; a South-East Queensland Case Study. 8ICUSD, Sydney, Australien, 30. August - 3. September 1999

Drapper, D.; Tomlinson, R.; Williams, P. (2000): Pollutant concentrations in road runoff: Southeast Queensland case study. Journal of Environmental Engineering, April 2000, S. 313-320

Dreiseidler, A.; Baumbach G. (1999): Studie zur Korngrößenverteilung (< PM10 und < PM2,5) von Staubemissionen - Stand der Erkenntnisse hinsichtlich Emissionsfaktoren für PM10 und PM2,5 hinsichtlich verschiedener Quellen; Vorstellung diverser Messtechniken zur Messung von Staubemissionen. Forschungsbericht Nr. 29744 853 im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin.

Driscoll, E.; Shelley, P.; Strecker, E.W. (1990): Pollutant Loadings and Impacts from Highway Stormwater Runoff, Volume 1-4, FHWA/RD-88-006-9, Federal Highway Administration, Woodward-Clyde Consultants, Oakland, CA, 1990)

Düring, I.; Nitzsche, E.; Moldenhauer, A.; Stockhause, M.; Lohmeyer, A. (2004): Berechnung der KFZ-bedingten Feinstaubemissionen infolge Aufwirbelung und Abrieb für das Emissionskataster Sachsen. Im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, Projekt Nr. 2546, Dresden, November 2004

DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall) (2007): „Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser“, DWA-Regelwerk Merkblatt M 153, Hennef, August, 2007.

DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall) (2010): Entwicklung von Prüfverfahren für Anlagen zur dezentralen Niederschlagswasserbehandlung im Trennverfahren. Abschlussbericht, angefertigt von der TU Kaiserslautern, FG Siedlungswasserwirtschaft; der Fachhochschule Münster; Fachbereich Bauingenieurwesen und des Instituts für Wasserforschung GmbH, Dortmund. Im Auftrag der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück, Juni 2010

EEA (European Environment Agency, EU) (2003): Emission Inventory Guidebook, SNAP Code 070700, August 2003



EDI (Eidgenössisches Departement des Innern) (1983): Richtlinien für die Untersuchung von Abwasser und Oberflächenwasser - Allgemeine Hinweise und Analysemethoden, Kap. 7, EDI-Verlag, 1983

Engelhard, C.; Fach, S.; Rauch, W. (2012): Langzeitverhalten der hydraulischen und stofflichen Leistungsfähigkeit von Muldenversickerungen im Sommer- und Winterbetrieb. Endbericht einer Studie an der Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Bau fakultät, Innsbruck, Januar 2012

E.ON Kraftwerke GmbH (2011): Neubauprojekt Kraftwerk Datteln Block 4 – Umweltmonitoringbericht. Zusammenfassung – 9. Bericht, Berichtsjahr 2011, 2. Halbjahr

ESS (Environmental Sciences Section) (1993): Method 340.2: Total Suspended Solids, Inorganic Chemistry Unit. Wisconsin State Lab of Hygiene. Madison, June 1993

Eyckmanns-Wolters, Rebecca; Kemper, Mike; Fuchs, Stephan (2012): Wirkung von Regenbecken in Trenn- und Mischsystemen. Wassertage Münster „Bewirtschaftung und Behandlung von Niederschlagsabflüssen in Siedlungsgebieten - Stand und Entwicklungen“, 28. Und 29. August 2012

Faller, M.; Reiss, D. (2005): Runoff behavior of metallic materials uses for roofs and facades – a 5-year field exposure study in Switzerland. Material Corrosion 56 (4), S. 244 - 249

Fenz, R.; Nowak, O. (1998): Wechselwirkung zwischen Kanal, Kläranlage und Gewässer bei Regenwetter. Wiener Mitteilungen, Band 145, S. 1-44

Ferreira-Pereira, S.: Belastungsmerkmale von Parkplätzen zur Berechnung der Feststoffkonzentration in Parkplatzabflüssen. Bachelorarbeit an der FH Frankfurt, Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft und Hydromechanik, Juni 2013

FES (Friedrich-Ebert-Stiftung e.V.) Hrsg. (1995): Innovative Technologie für den ruhenden Verkehr in Stadtzentren und verdichteten Wohngebieten. Gesamtstädtische Parkraumkonzepte. Tagung am 14. November 1994 in Jena

FGSV (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen) (2002): „Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wasserschutzgebieten (RiStWag)“. Köln, Ausgabe 2002

FGSV (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen) (2005): „Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS), Teil: Entwässerung (RAS-Ew)“. Köln, Ausgabe 2005

Fitschen T. (2000): Straßenabwasser – Reinigung mit der Pilotanlagen Halenreihe. Abschlussbericht im Auftrag der Freien und Hansestadt Hamburg, Umweltbehörde Amt für Umweltschutz – Gewässer und Bodenschutz, Hamburg, November 2000

FNB (Forum Nachhaltiges Bauen) (o.J.): Zinkblech – Ökobilanz. Aus: <http://www.nachhaltiges-bauen.de/baustoffe/Zinkblech>

Förster, J. (1990): Roof Runoff: A source of pollutants in urban storm drainage systems? Proceedings "5th International Conference on Urban Storm Drainage". Osaka, Japan, S. 469-474

Förster, J.; Herrmann, R. (1996): Eintrag und Transport von organischen Umweltchemikalien über verschiedene Dächer in das Kanalsystem. In: Stoffaustrag aus Kanalisationen. Hydrologie bebauter Gebiete. Forschungsbericht Deutsche Forschungsgemeinschaft, Weinheim, S. 24-42

Förster, J. (1998): The influence of location and season on the concentrations of macroions and organic trace pollutants in roof runoff. Proceedings of 19th Biennial International Conference IAWQ. Vancouver, Canada, S. 80-87

Förster, J.; Knoche, G. (1999): Quality of roof runoff from green roofs. Proceedings "8th International Conference on Urban Storm Drainage", Sydney, Australia, S. 1.312-1.318

Fuchs, S., Lambert, B.; Grotehusmann, D. (2010a): Eigenschaften und Behandlung von Regenabflüssen aus Trennsystemen; zentrale Behandlung. Hauraton Seminar „Dezentrale Behandlung von schadstoffbelastetem Niederschlagswasser auf Verkehrsflächen“ am 6.10.2010 in Frankfurt

Fuchs, S.; Lambert, B.; Grotehusmann, D. (2010b): Neue Aspekte in der Behandlung von Siedlungsabflüssen. Umweltwiss Schadst Forsch (2010) 22, 661-667, Springer-Verlag online

Fuchs, S. (2013): Persönliche Mitteilung. Leiter des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung, Bereich Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütewirtschaft am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Furumai, H.; Balmer, H.; Boller, M. (2002): Dynamic behavior of suspended pollutants and particle size distribution in highway runoff. Water Science and Technology Vol 46 No 11–12 pp 413–418, 2002

Gaskell, P.; Guymer, I.; Maltby, L. (2009): The effects of highway derived sediment on ecology - Diffuse Pollution From Road Runoff – Research Into Practice, Symposium at the University of London, 12 May 2009

Gehrig, R., Hill, M., Buchmann, B., Imhof, D., Weingartner, E., Baltensperger, U. (2003): Verifikation von PM10-Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. Abschlussbericht der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) und des Paul Scherrer Institutes (PSI) zum Forschungsprojekt ASTRA 2000/415. Juli 2003

Geiger-Kaiser, M.; Jäger, P. (2005): Wirksamkeit von Retentionsfilterbecken zur Reinigung von Straßenoberflächenwässern. Reihe Gewässerschutz – Reinigung von Straßenabwässern. Amt der Salzburger Landesregierung, Band 11, Salzburg, 2005

Gerth, W.-P.; Roos, M.; Augter, G. (2008): Aktualisierung der Frostdimensionierung im Straßenbau. Heft 1002 der Forschungsberichte aus dem Forschungsprogramm des

Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung und der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Bonn, 2008

Gerwig, H. (2005): Korngrößendifferenzierte Feinstaubbelastung in Straßennähe in Ballungsgebieten Sachsens. Eigenforschungsprojekt des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie 1.4.2003 - 31.12.2004

Glenn, D.; Liu, D.; Sansalone, J. (2002): Influence of chemistry, hydrology and suspended solids on partitioning of heavy metals to particles – considerations for in-situ control of urban stormwater quality. Proceedings "9th International Conference on Urban Storm Drainage", Portland, USA

Görisch S. (2012): Kaum Reifenabrieb im Feinstaub. Echo-Online - Wissen und Technik. 17. Januar 2012. Aus:

<http://www.echoonline.de/ratgeber/wissenschaftundtechnik/steinstaub20120117./Kaum-Reifenabrieb-im-Feinstaub;art478,2528542>

Götz, M. (2007): Gefährdungen und Schutzmaßnahmen im Straßenbau. Tiefbau 5/2007, S. 303 - 309

Golwer, A. (1991): Belastung von Böden und Grundwasser durch Verkehrswege. Forum Städte-Hygiene, 42 (9-10), S. 266-275

Gromaire-Mertz, M.C.; Garnaud, S.; Gonzalez, A.; Chebbo, G. (1999): Characterisation of Urban Runoff Pollution in Paris. Wat. Sci. Tech. Vol. 398, No. 2, pp 1 - 8

Gromaire, M.C.; Garnaud, S.; Saad, M.; Chebbo, G. (2001): Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers. Water Research, Vol. 35, No. 2, S. 521-533

Grotehusmann, D.; Kasting, U. (2002): Untersuchung über die Beschaffenheit der Oberflächenabflüsse von Parkflächen bei Tank- und Rastanlagen. Im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen. FE 05.123/2000/GGB, März 2002

Grotehusmann, D.; Rüter, J.; Lambert, B.; Fuchs, S. (2009): Schlussbericht des Untersuchungsprogrammes „RBF Adlershof“ Phase 1 und 2, Dezember 2005 bis November 2008, im Auftrag der Berliner Wasserbetriebe, Juni 2009, unveröffentlicht

Grotehusmann, D.; Rüter, J.; Lambert, B.; Fuchs, S. (2010): Schlussbericht des Untersuchungsprogrammes „RBF Halensee“ Inbetriebnahme und messtechnische Begleitung, Februar 2009 bis Januar 2010, im Auftrag der Berliner Wasserbetriebe, Januar 2010, unveröffentlicht

Grotehusmann, D.; Lambert, B.; Fuchs, S.; Graf, J. (2013): Konzentrationen und Frachten organischer Schadstoffe im Straßenabfluss. Schlussbericht zum BAST Forschungsvorhaben FE-Nr. 05.152/2008/GRB, Hannover, Stand 2013, unveröffentlicht

Grottker, M. (1987): Runoff Quality from a Street with Medium Traffic Loading. The Science of the Total Environment, 59 (1987) S. 457 - 466

Grotz, W. und Langer, D. (2007): Immissionsprognose Kohlekraftwerk Brunsbüttel, Gutachten Nr. M71 413/1 im Auftrag der SüdWestStrom Kraftwerk GmbH & Co. KG, Planegg, 2007. Aus:

[http://www.wirbrunsbuettel.de/2umwelt/Antragsdokumente%20SW/4%20Anlagen-/Anlage%208%20Immissionsprognose%20M71413\\_01\\_BER\\_4D.pdf](http://www.wirbrunsbuettel.de/2umwelt/Antragsdokumente%20SW/4%20Anlagen-/Anlage%208%20Immissionsprognose%20M71413_01_BER_4D.pdf)

Gruber, P. (1981): Der chemische und mineralogische Aufbau der Stäube im Linzer Raum. Naturk. Jb. D. Stadt Linz: 27, 1981, S. 169 - 281

Grüning , H., Giga, A., Sosinka, K.; Quarg-Vonscheidt, J. (2011): Untersuchungen zum Schadstoffrückhalt und dauerhaften Betrieb des Systems „FiltaPex“ im Vergleich zu einem Regenklärbecken. Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Auftrag der WSW Energie & Wasser AG und der Pecher Technik GmbH, Erkrath, Mai 2011

GSA (Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft des Kantons Bern - Gewässer- und Bodenschutzlabor) (2006): Innerorts sollte Straßenabwasser gereinigt werden. GSA Informationsbulletin 3/2006. S. 6 - 15

Gunawardena, J.M.A. (2012): Relating Vehicle Generated Pollutants to Urban Stormwater Quality. Doctoral Thesis at the Science and Engineering Faculty Queensland University of Technology, Brisbane, April 2012

Hager, W.: Staubniederschlag 1998/99 (2002): Bestimmung der Niederschlagsmengen und Staubinhaltsstoffe (Detailergebnisse, Tabellen und Stationsbeschreibungen) Grüne Reihe der Stadt Linz, Österreich - Bericht Nr. 3/2002.

Hatt, B.E.; Fletcher, T.D.; Deletic, A. (2009): Pollutant Removal Performance of Field-scale Stormwater Biofiltration Systems. Water Science & Technology – WST 59.8, 2009,. S. 1567 – 1576.

Hauraton (2012): Prospekt: Aquabau - das Programm für ein nachhaltiges Regenwassermanagement Ausgabe 3.6. Aus: [http://www.hauraton.com/media/Downloads/03-Hauraton\\_Katalog\\_AQUABAU\\_3.6.pdf](http://www.hauraton.com/media/Downloads/03-Hauraton_Katalog_AQUABAU_3.6.pdf)

Hausmann, G. (2009): Verteilung von Tausalzen auf der Fahrbahn. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen – bast – Heft V 180, Bergisch Gladbach, 2009

Helmreich B.; Hilliges, R.; Schriewer, A.; Athanasiadis, K. (2005): Schadstoffe aus Niederschlagsabflüssen und deren Bewertung, Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft, TU München, Nr. 185, 2005

Helmreich, B. (2010): Stoffliche Betrachtung der dezentralen Niederschlagswasserbehandlung. Berichte aus der Siedlungswasserwirtschaft, Bd. 199, Technische Universität München, 2010

Helmreich, B. (2012): Einfluss der Verkehrsstärke und anderer Randbedingungen auf die stoffliche Belastung von Versickerungsanlagen, 11. DWA Regenwassertage in Berlin, 11./12. 6. 2012

Herrera Environmental Consultants (2007): Untreated Highway Runoff in Western Washington. White Paper prepared for Washington State Department of Transportation, Seattle, May 2007

Hewitt, C. N.; Rashed, M. B. (1992): Removal rates of selected pollutants in the runoff waters from a major rural high-way. *Water Research*, Vol. 26, No. 3, S. 311-319

Hillenbrand, T., Touissant, D., Böhm, E., Fuchs, S., Scherer, U., Rudolphi, A., Hoffmann, M., Kreißig, J., Kotz, Ch. (2005): Einträge von Kupfer, Zink und Blei in Gewässer und Böden – Analyse der Emissionspfade und möglicher Emissionsminderungsmaßnahmen. UBA-Texte 19/05, Umweltbundesamt

Hilliges, R. (2007): Entwicklung eines dezentralen Behandlungssystems für hochbelastete Verkehrsflächenabläufe im urbanen Raum. *Berichte aus Siedlungswasserwirtschaft* 193, TU München

Hilliges, R.; Helmreich, B.; Horn, H.; Bischof, F.; Dierkes, C. (2008): Entwicklung und Optimierung eines mehrstufigen Reinigungssystems für Straßen- und Parkplatzabläufe in urbanen Gebieten zur Abflusdämpfung (Hochwasserschutz). Abschlussbericht eines Projektes, gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), Az.: 22338

HLUG (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie) (o.J.): Feinstaub (PM10) - Eigenschaften - Quellen - gesundheitliche Bewertung - Immissionen, Wiesbaden. Aus: [http://www.hlug.de/fileadmin/dokumente/luft/faltblaetter/PM10\\_Broschue-re.pdf](http://www.hlug.de/fileadmin/dokumente/luft/faltblaetter/PM10_Broschue-re.pdf)

HLUG (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie) (2009): Umweltatlas Hessen: Staubniederschlag, Wiesbaden, 2009. Aus: [http://atlas.umwelt.hessen.de/servlet/-Frame/atlas/luft/ik/qualitaet/schwermetalle\\_staub/sm.htm](http://atlas.umwelt.hessen.de/servlet/-Frame/atlas/luft/ik/qualitaet/schwermetalle_staub/sm.htm)

Holthuis, J.-U.; Obner, I., Tegge, K.-T., Warrelmann, J.; Mahro, B. (2012): Praxistest eines neuartigen, bepflanzten Bodenfilters zur Behandlung von Straßenabflüssen. Teil 1: Wasseruntersuchungen. *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 2012 (59), Nr. 11, S. 1030 – 1039

Horwath, J.A.; Bannermann, R.T. (2009): Pollutant Loading to Stormwater Runoff from Highways: Impact of Highway Sweeping Program. Phase II, Madison, Wisconsin. Wisconsin Department of Transportation Research, Development & Technology Transfer. Final Report No- 0092-04-04, Januar 2009

Huang, J.; Tu, Z.; Du, P.; Li, Q.; Lin, J. (2011): Analysis of Rainfall Runoff Characteristics from a Subtropical Urban Lawn Catchment in South-east China. *Front. Environ. Sci. Engin. China*. Research Article. Higher Education Press and Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2011

Hürlimann, J.; Fässler, S.; Gerhardt, A.; Steiner, M. Wyss, S.; (2011): Straßenabwasser in der Schweiz. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Zug, Dezember 2011

Hurlebusch, R. (1986): Möglichkeiten des Schmutzrückhaltes bei unterschiedlichen Straßenabläufen, Diplomarbeit am Institut für Wassertechnik, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover

Huss-Marp, J. (2000): Untersuchung zur Bedeutung der relativen Luftfeuchte für die Allergenfreisetzung aus Pollen. Dissertation an der Fakultät für Medizin der Technischen Universität München, 14.06.2000

Huwe, C. (2011): Niederschlagswasserbehandlungsanlagen im Winterbetrieb. Aus: [http://www.sfslocher.biz/internet/sfsmedien.nsf/7FCAD0B84BF4F53DC12570B20061B517/\\$FILE/Winterstabilit%C3%A4t\\_Bericht\\_Sept11.pdf](http://www.sfslocher.biz/internet/sfsmedien.nsf/7FCAD0B84BF4F53DC12570B20061B517/$FILE/Winterstabilit%C3%A4t_Bericht_Sept11.pdf)

IARC (International Agency for Research on Cancer) und NORA (National Occupational Research Agenda (2009): Identification of research needs to Views and Expert opinions of an IARC/NORA expert group meeting, Lyon, France, 30 June – 2 July 2009. IARC Technical Publication No. 42

Illgen, M. (2000): Überprüfung von Standard-Abflussbeiwerten durch Niederschlag-Abfluss-Simulation. Diplomarbeit am Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft der Universität Kaiserslautern, 2000

IM und UM (2008): Gemeinsame Verwaltungsvorschrift des Innenministeriums und des Umweltministeriums über die Beseitigung von Straßenoberflächenwasser (VwV-Straßenoberflächenwasser) vom 25. Januar 2008 - Az.: 63-3942.40/129 und 5-8951.13

- Ergänzende Festlegungen für die Anwendung der RiStWag, Ausgabe 2002 in Baden Württemberg
- Technische Regeln zur Ableitung und Behandlung von Straßenoberflächenwasser. Januar 2008

Kanton Basel Stadt (2007): Nachhaltige Regenwasserentsorgung. Umweltbericht 2007. Aus: <http://umweltberichtbeiderbasel.ch/index.php?id=215&type=0&title=-Nachhaltige-Regenwasserentsorgung&type=98>

Kanton Luzern (2013): Verkehrszählung Kanton Luzern, 2011. Aus [http://www.vif.lu.ch/strassenverkehrszaehlung\\_2011\\_def.pdf](http://www.vif.lu.ch/strassenverkehrszaehlung_2011_def.pdf)

Kari, G.; Herrmann, R. (1989): Abspülung von organischen Spurenschadstoffen und Schwermetallen aus einem städtischen Einzugsgebiet: Ganglinienanalyse, Korngrößenzuordnung und Metallspeziesauftrennung. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 33, Nr. 4/5, S. 172-183

Kaufmann, P. (2006): Der Straßenwasser-Filterschacht – ein Forschungsprojekt der Berner Fachhochschule. Vortrag am VSA-Kanalisationsforum. Bern, 2006. Aus: [http://www.vsa.ch/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/Verbandsberichte/2006\\_565-570/569\\_13\\_Kaufmann.pdf](http://www.vsa.ch/fileadmin/user_upload/Redaktion/Verbandsberichte/2006_565-570/569_13_Kaufmann.pdf)

Kaufmann, P. (2008a): Abwasser von Hochleistungsstraßen. Berner Strategie für Reinigung. gwa - Fachzeitschrift des Schweizerischen Vereins des Gas- und Wasserfaches SVGW und des Verbandes Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute VSA, 7/2008, S. 509 – 515

- Kaufmann, P. (2008b): Straßenabwasser – Filterschacht. Schlussbericht des Forschungsauftrags ASTRA 2005/202 der Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau, Biel und Burgdorf, Juli 2008
- Kayhanian, M.; Singh, A.; Suverkropp, C.; Borroum, S. (2003): Impact of Annual Average Daily Traffic on Highway Runoff Pollutant Concentrations. *Journal of Environmental Engineering* 129(11). S. 75–990
- Kayhanian, M.; McKenzie, E.R.; Leatherbarrow, J.E.; Young, T.M. (2012): Characteristics of road sediment fractionated particles captured from paved surfaces, surface run-off and detention basins. *Science of the total Environment*, 439 (2012) p. 172 - 186
- Kern, U.; Wüst, W.; Daub, J.; Striebel, T.; Herrmann, R. (1992): Abspülverhalten von Schwermetallen und organischen Mikroschadstoffen im Straßenabfluss. *GWF-Wasser/Abwasser*, Jahrg. 133, Heft 11, S. 567-574
- Klein, H. (1982): Die Beschaffenheit der Niederschlagsabflüsse von Autobahnen. *Wasserwirtschaft*, Jahrg. 72, Heft 2 , S. 37-43
- Kobencic, R. (2002): Verunreinigung des Regenwasserabflusses von Dachflächen., Diplomarbeit an der TU Graz am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, November 2002
- Kocher, B.; Wessolek, G. (2003): Verlagerung straßenverkehrsbedingter Stoffe mit dem Sickerwasser. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 864, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abt. Straßenbau, Bonn, 2003
- Kocher, B. (2011): Rückhalteleistung von Böden. Vortrag am Seminar „Dezentrale Behandlung von Niederschlagsabflüssen“ am 12. Mai 2011 an der FH Frankfurt
- Kölle, W. (2010): Wasseranalysen – richtig beurteilt. Wiley-VCH-Verlag GmbH & Co KGaA, 3. Auflage, Weinheim, 2010
- Kostis, E. (2012): Berechnung von Konzentrationen abfiltrierbarer Stoffe (AFS<sub>fein</sub>) in Niederschlagswasserabflüssen in Abhängigkeit der angeschlossenen Flächen. Bachelorarbeit an der FH Frankfurt, Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft und Hydromechanik, Juni 2012
- Kreiling, J. (2012): Belastung von Abfiltrierbaren Stoffen (PM63) in Niederschlagswasserabflüssen und Verifizierung einer Berechnungsmatrix anhand von Messdaten. Masterarbeit im Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft und Hydromechanik. Studiengang Infrastrukturmanagement der Fachhochschule Frankfurt am Main und der Technischen Hochschule Mittelhessen, Frankfurt, 2012
- Kurpjuweit, K. (2010): Straßenschaden auf der A 113 "Betonkrebs" nagt an neuer Autobahn. Der Tagesspiegel online vom 03.09.2010. Aus: <http://www.tagesspiegel.de/berlin/verkehr/strassenschaden-auf-der-a-113-betonkrebs-nagt-an-neuer-autobahn/1917286.html>



LAI (Länderausschusses für Immissionsschutz) (2004): Bewertung von Schadstoffen, für die keine Immissionswerte festgelegt sind - Orientierungswerte für die Sonderfallprüfung und für die Anlagenüberwachung sowie Zielwerte für die langfristige Luftreinhalteplanung unter besonderer Berücksichtigung der Beurteilung krebserzeugender Luftschadstoffe. Leipzig, 21. September 2004

Lambert, B. (2010): Eigenschaften und Behandlung von Regenabflüssen kleiner Einzugsgebiete, Park- und Hofflächen. Vortragsmanuskript, Hauraton-Seminar „Dezentrale Behandlung von Niederschlagsabflüssen“ im Herbst 2010 in Frankfurt

Lambert, B. (2011): Prüfung von dezentralen Straßenabflussbehandlungsverfahren im Feld. Vortrag am Seminar „Dezentrale Behandlung von Niederschlagsabflüssen“ am 12. Mai 2011 an der FH Frankfurt

Lamprea, K.; Ruban, V. (2008): Micro Pollutants in Atmospheric Deposition, Roof Runoff and Storm Water Runoff of a Suburban Catchment in Nantes, France. 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK, 2008

Landesumweltamt Brandenburg (2002): Staubniederschlag und Niederschlagsdeposition im Land Brandenburg. Studien und Tagungsberichte des Landesumweltamtes Brandenburg, Bd. 36, Potsdam, 2002

LANUV (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW) (2009a): Schwermetalleintrag an ländlichen Stationen. Aus: <http://www.lanuv.nrw.de/umweltindikatoren-nrw/index.php?indikator=19&aufzu=1&mode=indi>

LANUV (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW) (2009b): Umwelt - Luft - Immissionen - Berichte und Trends - Staubniederschlag. Aus: <http://www.lanuv.nrw.de/luft/immissionen/staub/staub.htm>

LANUV (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW) (2011): Hoher Eintrag von Schwermetallverbindungen auf Böden und Oberflächen im Umfeld bestimmter Industrieanlagen. Pressemitteilung vom 26. Juli 2011, Recklinghausen/Essen

LANUV (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW) (2012a): Messergebnisse der Staubniederschlagsmessungen. Jahresmittel und Monatswerte 2010 und 2011. Aus: <http://www.lanuv.nrw.de/luft/immissionen/staub/messergeb.htm>

LANUV (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW) (2012b): Messnetz der Staubniederschlagsmessungen. Aus: <http://www.lanuv.nrw.de/luft/immissionen/staub/messnetz.htm>

LANUV (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW) (2012c) : Messergebnisse der Staubniederschlagsmessungen. Schwermetalle und Dioxine. Aus <http://www.lanuv.nrw.de/luft/immissionen/staub/pdf/Depositionskarten-2011-3kl.pdf>

[http://www.lanuv.nrw.de/luft/immissionen/staub/pdf/SN-jk2011dioxine\\_PCB.pdf](http://www.lanuv.nrw.de/luft/immissionen/staub/pdf/SN-jk2011dioxine_PCB.pdf)

Lau, S.-L.; Khan, E.; Stenstrom, M.K. (2001): Catch basin inserts to reduce pollution from stormwater. *Water, Science & Technology*, Vol. 44, No.7, S. 23-34

Lau, S.-L.; Stenstrom, M. K. (2005): "Metals and PAHs adsorbed to street particles". *Water Research*, 39, (17), S. 4083 – 4092

Legret, M. und Pagotto, C. (1999): Evaluation of Pollutant Loadings in the Runoff Waters from a Major Rural Highway. *The Science of the Total Environment* 235 (1999), S. 143 - 150

Lehmhaus, J.; Eckermann, U.; Pommerening, C. (1998): Atmosphärische Stoffeinträge in Schleswig-Holstein. Sonderbericht Nr. 8 der Lufthygienischen Überwachung Schleswig-Holstein, Staatliches Umweltamt Itzehoe, Mai 1998

LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt) (2000): Grundsatzuntersuchung über die Ermittlung der Korngrößenverteilung im Abgas verschiedener Emittenten (< PM<sub>2,5</sub> und < PM<sub>10</sub>). Projekt I. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz/TÜV Süddeutschland. Dezember 2000.

LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt) (2003): Lufthygienischer Bericht 2003. Aus: [http://www.lfu.bayern.de/luft/lufthygienische\\_berichte/doc/lufthyg\\_jahresbericht\\_2003.pdf](http://www.lfu.bayern.de/luft/lufthygienische_berichte/doc/lufthyg_jahresbericht_2003.pdf)

LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt) (2005): Lufthygienischer Bericht 2005. Aus: [http://www.lfu.bayern.de/luft/lufthygienische\\_berichte/doc/lufthyg\\_jahresbericht\\_2005.pdf](http://www.lfu.bayern.de/luft/lufthygienische_berichte/doc/lufthyg_jahresbericht_2005.pdf)

LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt) (2007): UmweltWissen: Umweltmedium Boden. Aus: [http://www.lfu.bayern.de/umweltwissen/doc/uw\\_67\\_umweltmedium\\_boden.pdf](http://www.lfu.bayern.de/umweltwissen/doc/uw_67_umweltmedium_boden.pdf)

LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt) (2010): Lufthygienischer Bericht 2010. Aus: [http://www.lfu.bayern.de/luft/lufthygienische\\_berichte/doc/lufthyg\\_jahresbericht\\_2010.pdf](http://www.lfu.bayern.de/luft/lufthygienische_berichte/doc/lufthyg_jahresbericht_2010.pdf)

LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt) (2012a): Einträge: Niederschlagssammler - Messung der Schwermetalleinträge mit Niederschlagssammlern (Bergerhoff) Aus: [http://www.lfu.bayern.de/umweltqualitaet/umweltbeobachtung/schadstoffe\\_luft/schwermetalle/niederschlagssammler/index.htm](http://www.lfu.bayern.de/umweltqualitaet/umweltbeobachtung/schadstoffe_luft/schwermetalle/niederschlagssammler/index.htm)

LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt) (2012b): Nasse, trockene und Gesamt-Deposition. Einträge aus dem Niederschlag und Messmethoden. Aus: [http://www.lfu.bayern.de/umweltqualitaet/umweltbeobachtung/schadstoffe\\_luft/eutrophierung\\_versauerung/deposition/index.htm](http://www.lfu.bayern.de/umweltqualitaet/umweltbeobachtung/schadstoffe_luft/eutrophierung_versauerung/deposition/index.htm)

LfUMN (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg) (o.J.): Verkehrsbedingte Emissionen und Immissionen. Fachdokumentation Boden, Karlsruhe. Aus: <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/20057/lba190002.html?COMMAND=DisplayBericht&FIS=199&OBJECT=20057&MODE=BER&RIGHTMENU=null>

- Lindgren, A. (1996): Asphalt Wear and Pollution Transport. The Science of the Total Environment, Vol. 189/190, pp. 281-286.
- Loyd, S. D.; Wong, T. H. F. (1999): „Particulates, Associated Pollutants and Urban Stormwater Treatment“. Proceedings of the 8. International Conference on Urban Storm Drainage, S. 1833 -1840, Sydney, 30. August – 3. Sept. 1999
- LUA Saarland (Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz) (2009): Luftgütemessungen in Saarbrücken-Eschberg, Saarbrücken, August 2009
- LUA Brandenburg (Landesumweltamt Brandenburg) (2009): Luftqualität in Brandenburg - Jahresbericht 2008, Potsdam, September 2009
- LULG (Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Sachsen) (2010): Luftqualität in Sachsen, Jahresbericht 2010
- Luo, H.; Li, M., Xu, R.; Fu, X.; Huang, G.; Huang, X. (2012): Pollution Characteristics of Urban Surface Runoff in a Street Community. Sustain. Environ. Res. 22 (1), S. 61 – 68, 2012
- Lygren, E.; Gjessing, E.; Berglind, L. (1984): Pollution transport from a highway. The Science of the Total Environment, (33), S. 147-159
- Maniquiz, M. C.; Choi, J.; Lee, S.; Cho, H.J.; Kim, L.-H. (2010): Appropriate Methods in Determining the Event Mean Concentration and Pollutant Removal Efficiency of a Best Management Practice. Environmental Engineering Research, 2010, December, 15(4), S. 215 – 223
- Mantel-V (2012): Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen oder das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzstoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material. Bundesministerium für Umwelt, Natur-schutz und Reaktorsicherheit. Entwurf 31.10.2012
- Mar, B.W.; Horner, R.R.; Ferguson, J.F.; Spyridakis, D.E.; Welch, E.B. (1982): Summary: Washington State Highway Runoff Water Quality Study, 1977 – 1982. WA-RD-39 17. Washington State Department of Transportation, Olympia, Washington, 1982
- Mattheß, G. (1990): Die Beschaffenheit des Grundwassers. Lehrbuch der Hydrogeologie, Band 2. 2. Auflage. Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart, 1990
- McQueen, A.D. (2008): Characterization of Campus Parking Lot Stormwater and Remediation of Risks Using Constructed Wetland Treatment Systems, Masterthesis at the Graduate School of Clemson University, South Carolina, USA, December 2008
- Michaud, Joy P. (1994): Measuring Total Suspended Solids and Turbidity in lakes and streams. A Citizen's Guide to Understanding and Monitoring Lakes and Streams. State of Washington, Department of Ecology. Aus: <http://www.ecy.wa.gov/programs/wq/plants/management/joysmanual/4tss.html>
- MKULNV (2012): Niederschlagswasserbeseitigung – Abschlussbericht „Dezentrale Niederschlagswasserbehandlung in Trennsystemen – Umsetzung des Trennerlas-

ses“, Schreiben des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen vom 20.04.2012

Möller, D. (2009): Feinstaubbelastung: Ursachen und Gesundheitsgefährdung. Forum der Forschung. BTU Cottbus, Eigenverlag, Nr. 22, Cottbus 2009, S. 117 -126

Moy, F.; Crabtree, B.; Simms, T. (2002): The Long Term Monitoring of Pollution from Highway Runoff. R&D Technical Report, P2-038/TR1. Environment Agency, Bristol, 2002

MUNLV (Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, NRW) (2004): Anforderungen an die Niederschlagsentwässerung im Trennverfahren, RdErl. vom 25.05.2004

Muschack, W. (1989): Straßenoberflächenwasser - eine diffuse Quelle der Gewässerbelastung. Vom Wasser, 72, S. 267 - 282

Nadler, A.; Meißner, E. (2008): Bodenkundliche Untersuchungen im Rahmen des Entwicklungsvorhabens „Versickerung des Niederschlagswassers von befestigten Verkehrsflächen“. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hrsg., Augsburg, 2008

Neary, V.S.; Neel, T.C.; Dewey, J.B. (2002): Pollutant washoff and loading from parking lots in Cookeville, Tennessee. Proceedings "9th International Conference on Urban Storm Drainage", Portland, USA

Nielsen, M.; Winther, M.; Illerup J.B.; Mikkelsen, M. H (2003): Danish emission inventory for particulate matter (PM). Research Notes from NERI (National Environmental Research Institute, Ministry of the Environment, Denmark) No. 189, Kopenhagen, 2003

NMUEK (Niedersächsisches Ministerium für Umwelt und Klimaschutz) (2010): Umweltbericht 2010: Staubdeposition. [http://www.mu1.niedersachsen.de/portal/live.php?navigation\\_id=26592&article\\_id=89308&\\_psmand=10](http://www.mu1.niedersachsen.de/portal/live.php?navigation_id=26592&article_id=89308&_psmand=10)

Nolting, B. (2008): Untersuchungen zur Filtration und anschließenden Versickerung von Niederschlagswässern von Zinkdächern (am Beispiel des Altenheims) Wahlscheid. Abschlussbericht im Auftrag des MUNLV, NRW, Januar 2008

Owens, D.W.; Jopke, P. Hall, D.W.; Balousek, J.; Roa A. (2000): Soil Erosion from Two Small Construction Sites, Dane County, Wisconsin. USGS Fact Sheet FS 109-00, August 2000

Pennington, S.L.; Webster-Brown, J.G. (2008): Stormwater runoff quality from copper roofing, Auckland, New Zealand. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 2008, Vol. 42, 99 – 108

Pfeifer, R. (1998): Schmutzstoffrückhalt durch chemisch-physikalische Regenwasserbehandlung im Trennsystem. Schriftenreihe des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft (ISWW) der Universität Karlsruhe, Band 92, Karlsruhe, 1998

- Reinstorf, F. (2007): Modelle und Methoden zur Entscheidungsfindung in der Grundwasserbewirtschaftung. Habilitationsschrift an der Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
- Renschen, D. (2010): Messprogramm zur Ermittlung des möglichen Beitrags emissionsgeminderter Feinstaubkehrmaschinen an der Einhaltung anspruchsvoller Immissionsgrenzwerte für Staubpartikel. Abschlussbericht Vorhaben FKZ 340 01 008. Gefördert aus Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Essen, Oktober 2010
- Rosauer, V. (2010): Abschätzung der herstellungsbedingten Qualität und Lebensdauer von Asphaltdeckschichten mit Hilfe der Risikoanalyse. Dissertation an der Technischen Universität Darmstadt im Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie, Darmstadt 2010
- Rossi, L.; Kryenbuehl, L.; Froelich, J.-M.; Fischer, Y.; Khim-Heang, S.; Reyfer, G.; Vioget, P. (1997): Étude de la contamination induite par les eaux de ruissellement en milieu urbain. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 1996, 1997, S. 179 - 202
- Rossi, L. (1998): Qualité des eaux de ruissellement. Thèse de doctorat no. 1789. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse
- Rossi, L.; Krejci, V.; Kreikenbaum, S. (2004a): Anforderungen an die Abwassereinleitungen. gwa Nr. 6, S. 431 – 438
- Rossi, L.; Kreikenbaum, S.; Gujer, W.; Fankhauser, R. (2004b): Gesamte ungelöste Stoffe (GUS) bei Regenwetter. Teil 6 des Projektes „Storm: Abwassereinleitung aus Kanalisationen bei Regenwetter“. EAWAG, BUWAL, 2004
- Rudin, M.; Kaufmann, P. (2006): Behandlung von stark verschmutztem Straßenabwasser. Straße und Verkehr Nr. 7-8, Juli/August 2006. S. 45 – 50
- Rumpf, T. (1987): Schmutzrückhalt von Straßenabläufen bei unterschiedlichen Gebietsstrukturen, Diplomarbeit am Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover
- Sansalone J. J.; Buchberger, S. G. (1996): "Characterization of Solid and Metal Element Distributions in Urban Highway Stormwater". In: 7th International Conference on Urban Storm Drainage, Hannover, 1996, S. 253 ff
- Sartor, J. D.; Boyd G. B. (1972): Water Pollution Aspects of Street Surface Contaminants. EPA- R2-72- 081. U.S. Government Printing Office, 1972
- Schmitt, T. G. (2012): Weiterentwicklung des DWA-Regelwerks für Regenwetterabflüsse – ein Werkstattbericht. KA – Abwasser, Abfall (59) Nr. 3, 192-199
- Schmitt, T. (2013): Belastung von Trenngebietsabflüssen mit feinen Feststoffen. Masterarbeit im Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft und Hydromechanik. Studiengang Infrastrukturmanagement der Fachhochschule Frankfurt am Main und der Technischen Hochschule Mittelhessen, Frankfurt, Dezember 2013

- Schönwiese, C.-D.; Trömel, S. (2011): Langzeitänderungen des Niederschlags in Deutschland. Aus: Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle? Hrsg. Lozán, J. L.; Graßl, H.; Hupfer, P.; Karbe, L.; Schönwiese C.-D.. 3. Auflage, 2011
- Schütt, P.; Schuck, H. J.; Stimm, B. (2002): Lexikon der Baum- und Straucharten. Nikol, Hamburg 2002, ISBN 3-933203-53-8, S. 390
- Schulz, F., LANU Schleswig-Holstein (2001): Niederschlags- und Regenwasserbeschaffenheit in Schleswig-Holstein. Persönliche Mitteilung
- Schulze, E. (2002): Räumliche und zeitliche Analyse von kontinuierlichen Luftschadstoffmessungen in Berlin. Einfluss von Regen und Luftfeuchte auf die PM<sub>10</sub>-Emission und -Immission. Diplomarbeit an der Technischen Universität Dresden, Institut für Geographie, Lehrstuhl für Landschafts- und Geoökologie. Dresden, 2002
- Schumacher, J. (2013): Belastung von Parkplatzabflüssen unter besonderer Berücksichtigung feiner Feststoffe. Bachelorarbeit an der FH Frankfurt, Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft und Hydromechanik, September 2013
- Schumann, W. (1985): Der neue Steine- und Mineralienführer, BLV Verlagsgesellschaft, München 1985
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, Berlin (o.J.a): Digitaler Umweltatlas Berlin. Kap. 04.08 Langjährige Niederschlagsverteilung und Abflussbildung durch Niederschläge. Aus: [http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/d408\\_07.htm](http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/d408_07.htm)
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, Berlin (o.J.b): FIS-Broker Sachdatenanzeige Gesamtabfluss aus Niederschlägen 2005 (Umweltatlas). Aus: <http://fb-inter.stadt-berlin.de/fb/index.jsp>
- SES (Eigenbetrieb Stadtentwässerung Stuttgart) (2012): Persönliche Mitteilung Herr Dessauer, Tiefbauamt Eigenbetrieb Stadtentwässerung Stuttgart, Landeshauptstadt Stuttgart, 2012
- Shaheen, D.G. (1975): "Contributions of Urban Roadway Usage to Water Pollution". Environmental Protection Technology Series, Washington D.C., 1975
- Sharma, D.; Gupta R.; Singh, R. K.; Kansal, A. (2012): Characteristics of the event mean concentration (EMCs) from rainfall runoff on mixed agricultural land use in the shoreline zone of the Yamuna River in Delhi, India. Appl. Water Sci (2012) S. 55 – 62, veröffentlicht in: Springerlink.com
- Shelley, P.E.; Driscoll, E.D.; Sartor, J.D. (1987): Probabilistic Characterization of Pollutant Discharges from Highway Stormwater Runoff. The Science of the Total Environment, 59, S. 401-410
- Sommer, H. (2007): „Behandlung von Straßenabflüssen, Anlagen zur Behandlung und Filtration von Straßenabflüssen in Gebieten mit Trennsystem – Neuentwicklungen und Untersuchungen“. Dissertation an der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie der Universität Hannover, 2007.

Stadt Duisburg (2012): Messnetz für Staubniederschlag. Aus: <http://www.duisburg.de/micro2/umwelt/luft/luftreinhaltung/staubniederschlag/102010100000344764.php>

Stadt Frankfurt am Main (2013): Verschmutzung des öffentlichen Straßenraums. Bauaufsicht Frankfurt. Aus: [http://www.bauaufsicht-frankfurt.de/service/haeufig\\_gestellte\\_fragen\\_faq/ich\\_bin\\_nachbar\\_und\\_moechte\\_wissen/ob\\_ich\\_den\\_baustellen-schmutz\\_ertragen\\_muss.html](http://www.bauaufsicht-frankfurt.de/service/haeufig_gestellte_fragen_faq/ich_bin_nachbar_und_moechte_wissen/ob_ich_den_baustellen-schmutz_ertragen_muss.html)

Stadt Herne (2009): Merkblatt zur Bekämpfung von Staubemissionen durch Baustellen, Stand September 2009

Statistisches Bundesamt (2010): Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung, 2009. Fachserie 3, Reihe 5.1. Wiesbaden, Oktober 2010

Statistisches Bundesamt (2012): Zahlen und Fakten: Flächennutzung. Aus: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltoekonomischeGesamtrechnungen/Flaechennutzung/Tabellen/Bodenflaeche.html?nn=50654>

Stein, R. (2008): Auswirkungen optimierter Straßenabläufe auf Feststoffeinträge in Kanalisationen. Dissertation an der Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, April 2008

Striebel, T.; Gruber, A. (1997): Schwermetalle in Straßenstäuben und Schlammtopfsedimenten in Bayreuth: Konzentrationsbereiche, Einfluß der Verkehrsbelastung, Bindungsformen. Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft, 57, S. 325-331

Temme C. (2009): Durchführung von Staubniederschlagsmessungen und Analyse von Staubinhaltsstoffen an drei Standorten in der Wilstermarsch. Im Auftrag des Landesamtes für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, Hamburg, Juni, 2009

Thomas, P. R.; Greene, G.R. (1993): Rainwater quality from different roof catchments, Water, Science & Technology, Vol. 28, No. 3-5, S. 291-299

Tiefenthaler, L.L.; Schiff, K.C.; May, S.M. (2001): Characteristics of Parking Lot Run-off Produced by Simulated Rainfall. Southern California Coastal Water Research Project. Technical Report 343, Westminster, July 2001

TLUG (Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie) (2009): Umweltbilanz Thüringen 1989 bis 2009

TLUG (Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie) (2010): Staubniederschlagsbelastung in Thüringen im Jahr 2010. Aus: [http://www.tlug-jena.de/de/tlug-uw\\_bericht/2011/luft/sondermessprogramme/](http://www.tlug-jena.de/de/tlug-uw_bericht/2011/luft/sondermessprogramme/)

Trimbacher, C.; Neinavaie, H. (2002): Studie zur Ermittlung der Herkunft von Stäuben an sechs ausgewählten Messpunkten in Graz. Im Auftrag des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung 1 a, Referat für Luftgüteüberwachung, Wien 2002



- Tügel, H. (2013): Neue Ökonomie – es reicht. *Geo*, Heft 07/2013, S. 60 - 72
- UBA (Umweltbundesamt) (2005): Schwebestaub in Österreich. Fachgrundlagen für eine kohärente österreichische Strategie zur Verminderung der Schwebestaubbelastung. Bericht im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreich, BE-277, Wien, Februar 2006
- UBA (Umweltbundesamt) (2006): Statuserhebung zur Belastung durch Staubbiederschlag sowie Blei und Cadmium im Staubbiederschlag im Raum Arnoldstein im Jahr 2002. Im Auftrag der Kärntner Landesregierung, Wien, Februar 2006
- UBA (Umweltbundesamt) (2009): Hintergrund: Feinstaubbelastung in Deutschland, Pressestelle UBA, Dessau-Roßlau, Mai 2009
- UBA (Umweltbundesamt) (2013): Nasse Deposition saurer und säurebildender Regeninhaltsstoffe an den Stationen des Luftmessnetzes des Umweltbundesamtes. Aus: <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=3597>, Dessau-Roßlau, März 2013
- UMEG (Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg), 2004: Hintergrundwerte für Atmosphärische Depositionen (Stand 03.2004)
- Vaze, J.; Chiew, H.S. (2002): Experimental Study of Pollutant Accumulation on an Urban Road Surface. *Urban Water* 4 (2002) S. 379 – 389
- VDI (Verein Deutscher Ingenieure) (2010): Messung atmosphärischer Depositionen - Probenahme mit Bulk- und Wet-only-Sammlern – Grundlagen. VDI Technische Regel 4320 Blatt 1: 2010-01
- VDI (Verein Deutscher Ingenieure) (2012): Messung atmosphärischer Depositionen - Bestimmung des Staubbiederschlags nach der Bergerhoff-Methode. VDI Technische Regel 4320 Blatt 2: 2012-01
- VDZ (Verein Deutscher Zementwerke e.V) (2005): Zement-Merkblatt Betontechnik B 3 9.2005: Betonzusätze Zusatzmittel und Zusatzstoffe, Düsseldorf 2005
- VDZ (Verein Deutscher Zementwerke e.V) (2006): VDZ-Tätigkeitsbericht 2003-2005, Kap. 6: Umweltverträglichkeit von Zement und Beton, S. 134
- Verworn, H.-R. (1993): Abflussbildungsansätze für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung. *SuG - Zeitschrift für Stadtentwässerung und Gewässerschutz* 24/1993
- Wang, T. S.; Spyridakis D. E.; Mar B. W.; Horner R. R. (1982): Transport, Deposition, and Control of Heavy Metals in Highway Runoff. WA-RD-39.10. Washington State Department of Transportation, Olympia, Washington, 1982
- Watson, J. G. und Chow, J. C. (2000): Reconciling Urban Fugitive Dust Emissions Inventory and Ambient Source Contribution Estimates: Summary of Current Knowledge and Needed Research, DRI Document No. 6110.4F.

Weeber H.; Rees M. (1999): Kostenfaktor Erschließungsanlagen. Bauforschung für die Praxis, Band 50, ISBN 978-3-8167-4249-4, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart/Berlin 1999

Weckwerth, G. (2002): Bremsen ist umweltschädlich. Protokolle Universität Köln. <http://uni-protokolle.de/nachrichten/id/10547/>

Welker, A. (2005): Schadstoffströme im urbanen Wasserkreislauf – Aufkommen und Verteilung, insbesondere in den Abwasserentsorgungssystemen. Habilitationsschrift, Januar 2004. Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, Schriftenreihe Bd. 20, 2005

Welker, A. (2013): Schadstoffminimierung im urbanen Wassersystem. Proceedings Fachtagung "Siedlungswasserwirtschaft 20..40..60". Schriftenreihe Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft, TU Kaiserslautern. Band 36, S. 67-90

Welker, A.; Dierschke, M. (2013): dezentrale Niederschlagswasserbehandlung – Status Quo und Neuere Entwicklungen. Proceedings der 13. DWA-Regenwassertage, Freiburg 2013

Wöllper, F. (2004): Flächennutzung: Ansprüche und Wirklichkeit. Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg 11/2004

Xanthopoulos, C.; Hahn, H.H. (1993): Anthropogene Schadstoffe auf Straßenoberflächen und ihr Transport mit dem Niederschlagsabfluss. Abschlussbericht. Niederschlagsbedingte Schmutzbelastung der Gewässer aus städtischen befestigten Flächen. Phase 1 - Teilprojekt 2, Eigenverlag des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft, Universität Karlsruhe

Zobrist, J; Müller, S.R.; Amman, A.; Bucheli, T.D.; Mottier, V; Ochs, M.; Schoenenberger, R.; Eugster, J.; Boller, M. (2000): Quality of roof runoff for groundwater infiltration. Water Research, Vol. 34, No. 5, S. 1.455-1.462

### **Bildquellen:**

Dachrinnenreinigung Seyffarth (2013): Beispielbilder. Steffen Seyffarth, Geibelstraße 222, 09127 Chemnitz. Aus: <http://www.dachrinnenreinigung-seyffarth.de/Referenz.html>

Ebert, M. (2009): Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines Dieselrußagglomerats in 12.934-facher Vergrößerung. TU Darmstadt, Umweltmineralogie, ddp. Aus: <http://www.sueddeutsche.de/panorama/bildstrecke-fruehere-bilder-des-tages-1.84601-32>

FS-Dienstleistungen (2012): Dachrinnenreinigung. Frank Schungen. Kapellenerstraße 38, 47239 Duisburg. Aus: <http://fs-dienstleistungen.de.tl/Dachrinnenreinigung-.htm>

Hagen, R. (2011): Lilienpollen. Aus: Beobachter Natur: Forschung und Wissen; Wenn Würmer zum Monster werden. Foto: Hagen, R. FEI Company ([www.fei.com](http://www.fei.com)); September 2011; Aus: [http://www.beobachter.ch/natur/forschung-wissen/technologie-innovation/artikel/rasterelektronenmikroskop-bilder\\_wenn-wuermer-zum-monster-werden/](http://www.beobachter.ch/natur/forschung-wissen/technologie-innovation/artikel/rasterelektronenmikroskop-bilder_wenn-wuermer-zum-monster-werden/)

Hauraton GmbH & Co. KG (o.J.): Aquabau. Das Programm für ein nachhaltiges Regenwassermanagement. Ausgabe 3.6. Aus: [http://www.hauraton.com/media/Downloads/03-Hauraton\\_Katalog\\_AQUABAU\\_3.6.pdf](http://www.hauraton.com/media/Downloads/03-Hauraton_Katalog_AQUABAU_3.6.pdf)

IM (Innenministerium Baden-Württemberg) (2011): Land- oder forstwirtschaftliche Fahrzeuge im Straßenverkehr - Vorschriften für den Betrieb auf öffentlichen Straßen. 2. Auflage, 3-2011. Aus: [http://www.gib-acht-im-verkehr.de/top\\_news/download/aspm-2\\_lof\\_broschuere-gesamt.pdf](http://www.gib-acht-im-verkehr.de/top_news/download/aspm-2_lof_broschuere-gesamt.pdf)

Markert, G. (2012): aus: Märkische Oderzeitung: Riesenliste für Reparaturen, 6.3.2012. [http://www.moz.de/bild-ansicht/dg/0/3/1012272/?tx\\_rsmdailygen\\_pi1-\[cimg\]=1012999767](http://www.moz.de/bild-ansicht/dg/0/3/1012272/?tx_rsmdailygen_pi1-[cimg]=1012999767)

Paraselene (2012): Kiefernpollen, Bildergalerie Pollen. Dr. Eva Seidenfaden, Nikolaus-Mommer-Str. 78, 54296 Trier. Aus: [www.parselene.de](http://www.parselene.de)

SWR (o.J.): Tatort Mensch. Kurse: 6.1 Allergien. Sonnenblumenpollen. Foto aus: [http://www.planet-schule.de/tatort-mensch/deutsch/kurse/kurs6/popup\\_pollen.html](http://www.planet-schule.de/tatort-mensch/deutsch/kurse/kurs6/popup_pollen.html)

Universitätsklinikum des Saarlandes und Medizinische Fakultät der Universität des Saarlandes (o.J.): Was sind Pollen? Pollenwarndienst der Klinik für Innere Medizin V - Pneumologie, Allergologie, Beatmungs- und Umweltmedizin. Aus: [http://www.uniklinikum-saarland.de/einrichtungen/kliniken\\_institute/medizinische\\_kliniken/innere\\_medizin\\_v/patienten\\_informationen/pollenwarndienst/was\\_sind\\_pollen/](http://www.uniklinikum-saarland.de/einrichtungen/kliniken_institute/medizinische_kliniken/innere_medizin_v/patienten_informationen/pollenwarndienst/was_sind_pollen/)

## Anhang:

### Ermittlung von befestigten Flächenanteilen in Siedlungsgebieten

#### 1. Frankfurt

In einer Bachelorarbeit an der FH Frankfurt wurden insgesamt 12 ländliche und städtische Einzugsgebiete im Frankfurter Raum mit Hilfe von GIS-Daten, der amtlichen Liegenschaftskataster-Informationssystem (ALKIS) sowie Orthofotos und Satellitenbildern hinsichtlich der versiegelten Flächenanteile ausgewertet [Kostis, 2012]. Als Ergebnis stellten sich die Verteilungen nach Tabelle A-1 heraus, wobei die größte Schwierigkeit in der Abschätzung der jeweils unversiegelte Anteil des Einzugsgebietes darstellte.

Tabelle A-1: Flächenanteile versiegelter Flächen im Frankfurter Raum [Kostis, 2012]

|                              | Ländliches<br>Einzugsgebiet<br>% | Städtisches<br>Einzugsgebiet<br>% |
|------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Dachflächen                  | 37 (33 bis 43)                   | 35 (29 bis 46)                    |
| Verkehrsflächen              | 42 (36 bis 50)                   | 34 (30 bis 40)                    |
| sonstige versiegelte Flächen | 21 (14 bis 25)                   | 31 (19 bis 39)                    |

#### 2. Kaiserslautern

Zwei weitere Einzugsgebiete in der Innenstadt von Kaiserslautern wurden anhand von Rahmenkarten, google-Satellitenaufnahmen und Ortsbegehungen ausgewertet. Diese beiden Gebiete wurden aufgrund der geringen Feinstaubbelastung (2004: 22 µg/m<sup>3</sup>) und der Verkehrsbelastung der Straßen unter 2.000 DTV als Referenzgebiet eines nicht behandlungsbedürftigen städtischen Einzugsgebietes gewählt, vgl. Bild A-1.

Von dem etwa 2,6 ha großen Gebiet 1 um die Bismarckstraße sind ca. 23,5% unbefestigt. Die befestigten Flächen teilen sich folgendermaßen auf:

|                            |        |
|----------------------------|--------|
| Straße:                    | 33,5 % |
| Dach:                      | 52 %   |
| Befestigte Höfe/Terrassen: | 14,5 % |



Bild A-1: Referenzgebiete in der Innenstadt von Kaiserslautern mit < 2.000 DTV. Links Gebiet 1: 2,6 ha, rechts Gebiet 2: ca. 1 ha [Quelle: google earth, 2013]

Ein weiteres etwa 1 ha großes innerstädtisches Gebiet in Kaiserslautern (Gebiet 2, Friedrichstraße) mit etwas mehr Grünfläche ergab bezogen auf die befestigte Fläche:

- Straße: 39%
- Dach: 50%
- Befestigte Höfe/Terrasse: 11%

Weitere Flächenanteile aus Messprogrammen sind nachfolgend zusammengestellt.

### 3. Wuppertal

Eine Bestandsaufnahme der an ein RKB angeschlossenen Flächen in Wuppertal-Cronenberg ergab ( $A_{u}$  gesamt 9,47 ha) nur 23% Verkehrsflächen für Kategorie I und sogar nur 3% für Kategorie II [Grüning et al., 2011], wobei sich hier unter sonstige Flächen eventuell auch Parkplätze verbergen.

Tabelle 0-2: Anteil der einzelnen an ein RKB angeschlossenen Flächen in Wuppertal-Cronenberg [Grüning et al. 2011]

|                              | Kategorie I | Anteil | Kategorie II | Anteil | I und II | Anteil |
|------------------------------|-------------|--------|--------------|--------|----------|--------|
|                              | ha          | %      | ha           | %      |          | %      |
| Dachflächen                  | 2,5         | 47     | 0,71         | 25     | 3,21     | 39     |
| Verkehrsflächen              | 1,22        | 23     | 0,07         | 3      | 1,29     | 16     |
| sonstige versiegelte Flächen | 1,63        | 30     | 2,02         | 72     | 3,65     | 45     |
| Summe                        | 5,35        |        | 2,80         |        | 8,15     |        |

#### 4. Basel

Die Auswertung der in Bild A-2 dargestellten Flächenanteile in der Stadt Basel ergab:

Straße: 18 % (21 %)

Dach: 55 % (64 %)

Plätze: 27 % (16 %)

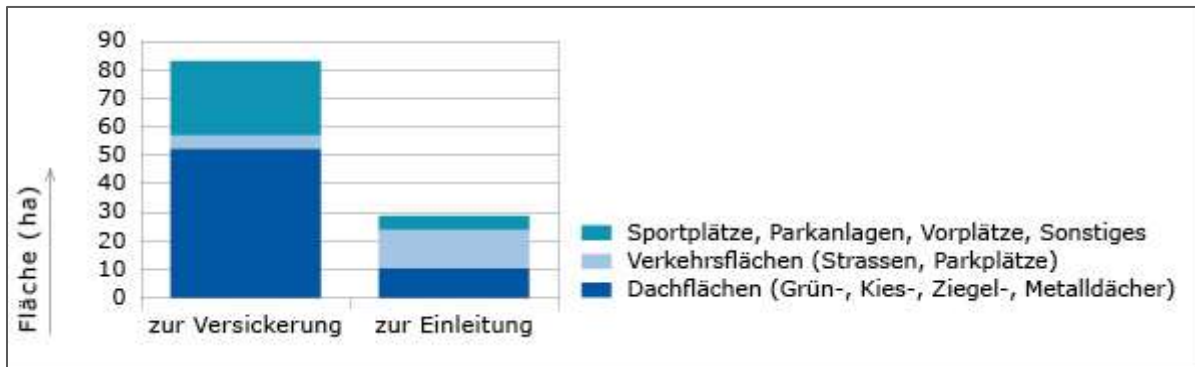


Bild A-2: Herkunft des Regenwassers nach Art der Flächen in Basel [Kanton Basel Stadt, 2007]

Die Werte in Klammern ergeben sich unter Annahme von 50% nicht befestigter Fläche bei den Plätzen.

#### 5. Marais, Paris

Die Auswertung der Anteile Verkehrsfläche/Hof/Dachfläche im Marais in Paris lag bei 22,4 % Verkehrsfläche, 23,2 % Höfe, öffentliche Plätze und Gärten sowie 54,4 % Dachflächen [Gromaire et al. 2001].

#### 6. Wohngebietstypen

Die Bilanz zu Flächen verschiedener Wohngebietstypen [Weeber und Rees, 1999] ergab, die unversiegelten Freiflächen jeweils herausgerechnet, Flächenanteile gemäß Tabelle A-3.

Tabelle A-3: Flächenbilanz verschiedener Wohngebietstypen (ohne unversiegelte Flächen) [Weeber und Rees, 1999]

|                    | Dachfläche | Verkehrsfläche | versiegelte Freifläche |
|--------------------|------------|----------------|------------------------|
| Bebauungstyp       | [%]        | [%]            | [%]                    |
| Einzelbebauung     | 44         | 36             | 20                     |
| Reihenhausbebauung | 45         | 28             | 27                     |
| Zeilenbebauung     | 39         | 26             | 35                     |
| Blockbebauung      | 47         | 35             | 18                     |
| Punktbebauung      | 34         | 18             | 48                     |





## Lebenslauf Martina Dierschke

- 1981 - 1989 Studium an der TH Karlsruhe mit Abschluss Diplom, Fachrichtung Bauingenieurwesen mit dem Vertiefungsschwerpunkt Wasserbau/ Siedlungswasserwirtschaft
- 1989 - 1997 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft der Universität Kaiserslautern
- seit 1994 Autorin und Mentorin an der Universität Koblenz/Landau im Fernstudiengang „Angewandte Umweltwissenschaften“
- seit 1998 Freiberufliche Mitarbeiterin in verschiedenen Ingenieurbüros, beim TÜV Saarland Sulzbach, in Industriebetrieben sowie an der Universität Kaiserslautern
- seit 2010 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft der Fachhochschule Frankfurt