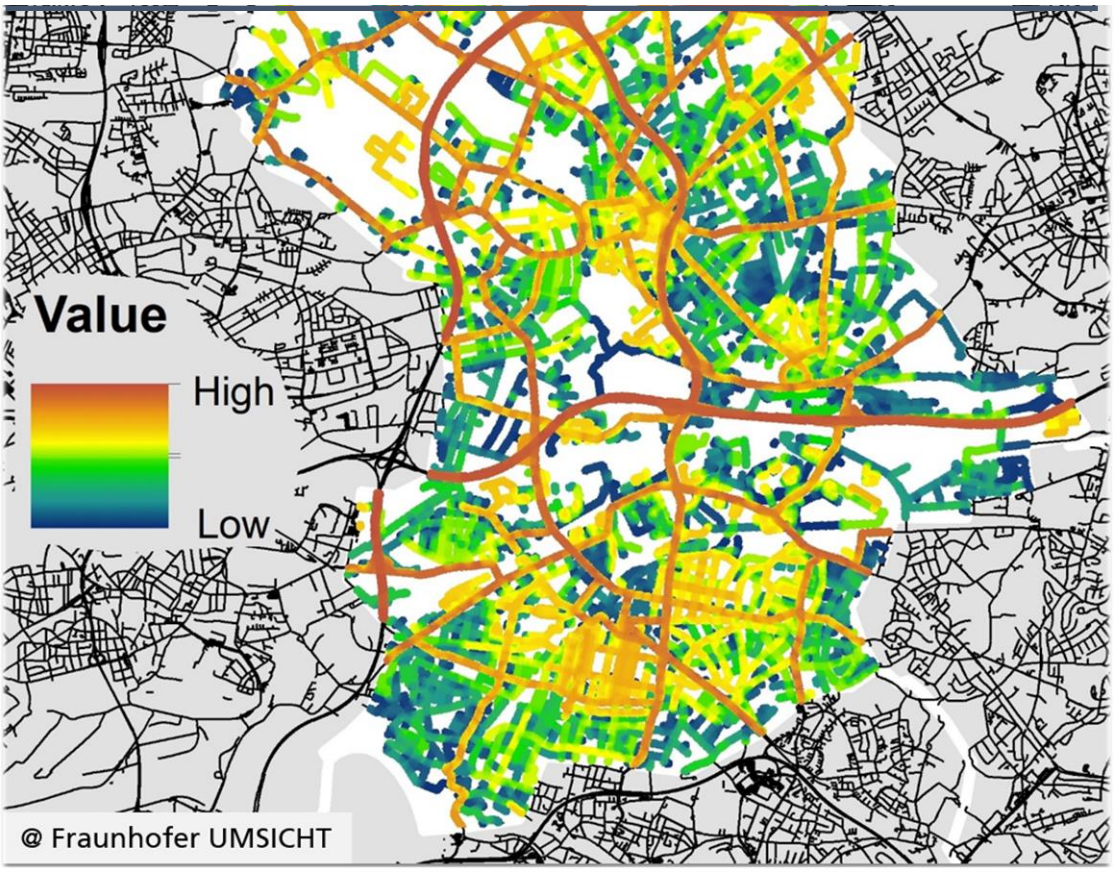
SCHLUSSBERICHT | 19F2050A-C

TWM TyreWearMapping

Reifenabrieb – ein unterschätztes Umweltproblem?

Digitales Planungs- und Entscheidungsinstrument zur Verteilung, Ausbreitung und Quantifizierung von Reifenabrieb in Deutschland

TyreWearMapping



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur

mFUND
Das Startkapital für die Mobilität 4.0

PROJEKTPARTNER:

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT | Oberhausen |Teilvorhaben 19F2050A

iMA Richter & Röckle GmbH & Co.KG | Freiburg | Teilvorhaben 19F2050B

Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. SIEKER mbH | Hoppegarten | Teilvorhaben 19F2050C

LAUFZEIT:

01.11.2017 bis 31.07.2020

Schlussbericht erstellt am: 08 Januar 2021

KURZZUSAMMENFASSUNG

Reifenabrieb wird seit Jahren im Kontext verschiedener Umweltprobleme kontrovers diskutiert: als Mitverursacher der Feinstaubbelastung in Städten, als Emittent von nanopartikulärem Ruß und aktuell als eine der größten Quellen von Mikroplastik in der Umwelt.

Während zahlreiche Studien zu Emissionsfaktoren und Vorhersagemodellen für die Ausbreitung von Reifenabrieb in der Atmosphäre veröffentlicht wurden – allerdings ohne Bezug zu Verkehrsdatenmodellen -, ist die Ausbreitung von Reifenabrieb über die Straßenabläufe kaum untersucht.

TyreWearMapping nimmt sich dieser Problematik an und verknüpft geographische Daten und Verkehrsdaten, Straßentypen und Fahrsituationen, um die räumliche Verteilung, die Ausbreitung und den Verbleib von Reifenabrieb entlang von Straßen, in der Atmosphäre und in der aquatischen Umwelt zu modellieren.

Konkret integrierte das Projektteam ein Verkehrsdatenmodell und ein probabilistisches Modell zum TWM-Modell, das die Reifen-Verschleißintensität auf einem bestimmten Streckenabschnitt auf Basis von physikalisch-empirischen Beziehungen aus den Eigenschaften des Straßenabschnitts plausibel abschätzt.

Es wurde eine Methodik zur Ermittlung der Verkehrsstärken durch vorhandene Datensätze, ergänzende Quellen und die Abschätzung in Wohn-, Gewerbe- und Mischgebieten entwickelt, die eine realitätsnahe Beschreibung potenzieller Verkehrsverhältnisse ermöglicht und in einzigartige, deutschlandweite Verkehrsdatenmodelle umgesetzt wurde.

Zudem wurde ein methodisches Vorgehen für die schnelle Depositionsberechnung entwickelt und auf die einzelnen Bundesländer angewandt. Die Analysen zeigen auf, wo Hotspots liegen und wieviel Reifenabrieb im Umfeld abgelagert wird.

Exemplarisch für die Ausbreitung in der aquatischen Umwelt wurden die in den Einzugsgebieten der Panke und der Wupper entstehenden Reifenabriebmengen und deren Stoffpfade berechnet und bilanziert. Die Quellemissionen wurden als Input für eine Niederschlagsabflusssimulation genutzt. So wurden Entstehung- und Eintrag-Hotspots von Reifenabrieb im Einzugsgebiet identifiziert sowie die Pfade und Eintragsmengen quantifiziert.

Diese siedlungswasserwirtschaftliche Betrachtung ist nur ein Beispiel für den vielschichtigen Funktionsumfang der entwickelten Planungs- und Entscheidungsinstrumente, die es ermöglichen, zielgerichtete verkehrs- und umweltplanerische Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung von Reifenabrieb umzusetzen und den Einfluss neuer Mobilitätsszenarien abzuschätzen.

INHALT

I. Kurze Darstellung 1
I.1 Aufgabenstellung 1
I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 2
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 2
I.4 Stand des Wissens und der Technik 3
I.4.1 Allgemeines 3
I.4.2 TyreWearMapping 4
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 8
I.5.1 Assoziierte Partner und (Geo)Datenbereitsteller 8
I.5.2 Kommunen 8
I.5.3 Kooperationen mit anderen Forschungsprojekten 8
I.5.4 Internationale Kooperationen 9
II. Eingehende Darstellung 10
II.1 Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse 10
II.1.1 Sachdaten zur Entstehung und Verbreitung von Reifenabrieb 10
II.1.2 Verkehrsdatenmodell | TWM-Modell Part I 15
II.1.3 Probabilistisches Modell | TWM-Modell Part II 30
II.1.4 TWM-Modell 36
II.1.5 Modellierung der atmosphärischen Ausbreitung von Reifenabrieb 46
II.1.6 Modellierung der Quellemissionen in den Einzugsgebieten 84
II.1.7 Verbleib von Reifenabrieb in den Einzugsgebieten Wupper und Panke 90
II.1.8 Planungs- und Entscheidungstools, Nutzerintegration, ... 134
II.1.9 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse 136
II.1.10 Fazit und Ausblick 139
II.1.11 Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele 140
II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 142
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 142
II.4 Voraussichtlicher Nutzen 142
II.5 Fortschritte im Themengebiet bei anderen Stellen 144
II.6 Veröffentlichungen 144
II.6.1 Erfolgte Veröffentlichungen 144
II.6.2 Geplante Veröffentlichungen 145
III. Quellenverzeichnis 146

I. KURZE DARSTELLUNG

I.1 Aufgabenstellung

Reifenabrieb ist Mikroplastik-Spitzenreiter bei der Emission und bleibt ein Umweltproblem von globalem Ausmaß. Ein bis 1,5 Kilogramm Reifenabrieb produziert jede/r Deutsche durchschnittlich im Jahr. [UMSICHT, 2018] Die EU-Kommission prüft bereits strategische Optionen, um die Freisetzung von Reifenabrieb zu minimieren [European Commission-2018]. Ist Deutschland darauf vorbereitet?

Wasserwirtschaftsverbänden fehlen belastbare, flächendeckende Verkehrsdaten zur Umsetzung der bevorstehenden Novellierung des technischen Regelwerks. Kommunen sehen sich mit einer der größten verkehrstechnisch bedingten Umweltemission neben den KFZ-Abgasen konfrontiert ohne eine verlässliche Datengrundlage zur Planung von Vermeidungs- und Entsorgungsmaßnahmen. Verkehrsplanungssoftware kann zwar häufig Abgas- nicht jedoch Reifenemissionen berechnen.

Kein anderer Emissionspfad von Mikroplastik ist so sehr an Verkehrssituationen und Geodaten gebunden. Umso verwunderlicher erscheint es, dass *TyreWearMapping (TWM)* die erste umfassende Studie zur Reifenabriebthematik in Deutschland werden sollte, die sich nicht mit Mengenermittlung und Morphologie befasst, sondern zeigen sollte, wo verkehrsbedingte Hotspots sind und Politik, Behörden und Gesellschaft handeln müssen.

Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) verfügt über umfangreiche Mobilitäts-, Geo- und Wetterdaten, die als „Open Data" zugänglich sind. In *TyreWearMapping* sollten diese Daten angewandt werden, um Freisetzung, räumliche Verteilung und Ausbreitung von Reifenabrieb in Luft und Wasser für Deutschland zu modellieren und zu visualisieren.

Das Thema Reifenabrieb ist sehr vielschichtig: Wieviel und welche Fahrzeuge setzen welche Mengen an Reifenabrieb frei? Wie und wo verteilt sich der Reifenabrieb? Wo gibt es „Hot Spots" für Reifenabrieb? Verkehrsmodelle und probabilistische Datenmodelle sollten entwickelt werden, die große Mengen an Daten mit teils geringer Robustheit und unsicheren Annahmen sinnvoll verarbeiten können. Beide Modelle sollten zu einem Reifenabriebmodell für Deutschland integriert werden – dem TMW-Modell.

In *TyreWearMapping* sollte ein neuer methodischer Ansatz für die Ausbreitungsrechnung auf Basis neuronaler Netze entwickelt werden, der es auch bei den vorliegenden komplexen Zusammenhängen erlaubt, die atmosphärische Ausbreitung von Reifenabrieb dynamisch für ein großes Modellgebiet wie Deutschland zu berechnen.

Letztendlich sollte das TWM-Modell als digitales Planungs- und Entscheidungstool zur Unterstützung bei der Erneuerung und dem Bau neuer Verkehrsnetze und sekundärer Infrastruktur umgesetzt werden, welches unter Beteiligung externer Akteure fortlaufend weiterentwickelt wird.

Exemplarisch sollten zwei unterschiedliche Flusseinzugsgebiete in höherer Auflösung betrachtet werden: A) Das Einzugsgebiet der Wupper in Nordrhein-Westfalen, und B) das Einzugsgebiet (EZG) der Panke, einem Nebenfluss der Spree, in Berlin. Während die Panke durch ein innerstädtisches Einzugsgebiet fließt, ist das Einzugsgebiet der Wupper eher heterogen und im Oberlauf sehr ländlich geprägt. Die beiden Einzugsgebiete in West und Ost ergänzen sich somit aufgrund ihres divergierenden Umfelds sowie ihrer unterschiedlichen Größe und Bebauung sehr gut.

Das TWM-Modell sollte für die Gebiete um Wupper und Panke mit Messdaten verifiziert werden, was – wie nachfolgend noch näher erläutert – während der Dauer des Forschungsprojekts nicht möglich war, da zwar in Aussicht gestellt, aber dennoch keine zuverlässige oder gar standardisierte Messmethodik verfügbar war.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Projektpartner SIEKER, iMA und Fraunhofer UMSICHT brachten sowohl die (software)technischen als auch personellen Voraussetzungen mit, um das Projekt inhaltlich und zeitlich nach Plan zu bearbeiten. Die erforderlichen Sach-, Verkehrs- und Geodaten wurden – soweit vorhanden – akquiriert und Datenlücken durch begründete und dokumentierte Modellannahmen geschlossen.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

TyreWearMapping wurde wie geplant durchgeführt. Abbildung 1 zeigt die Arbeitsschwerpunkte und Struktur des Forschungsvorhabens sowie die Verteilung der Arbeiten unter den Partnern.

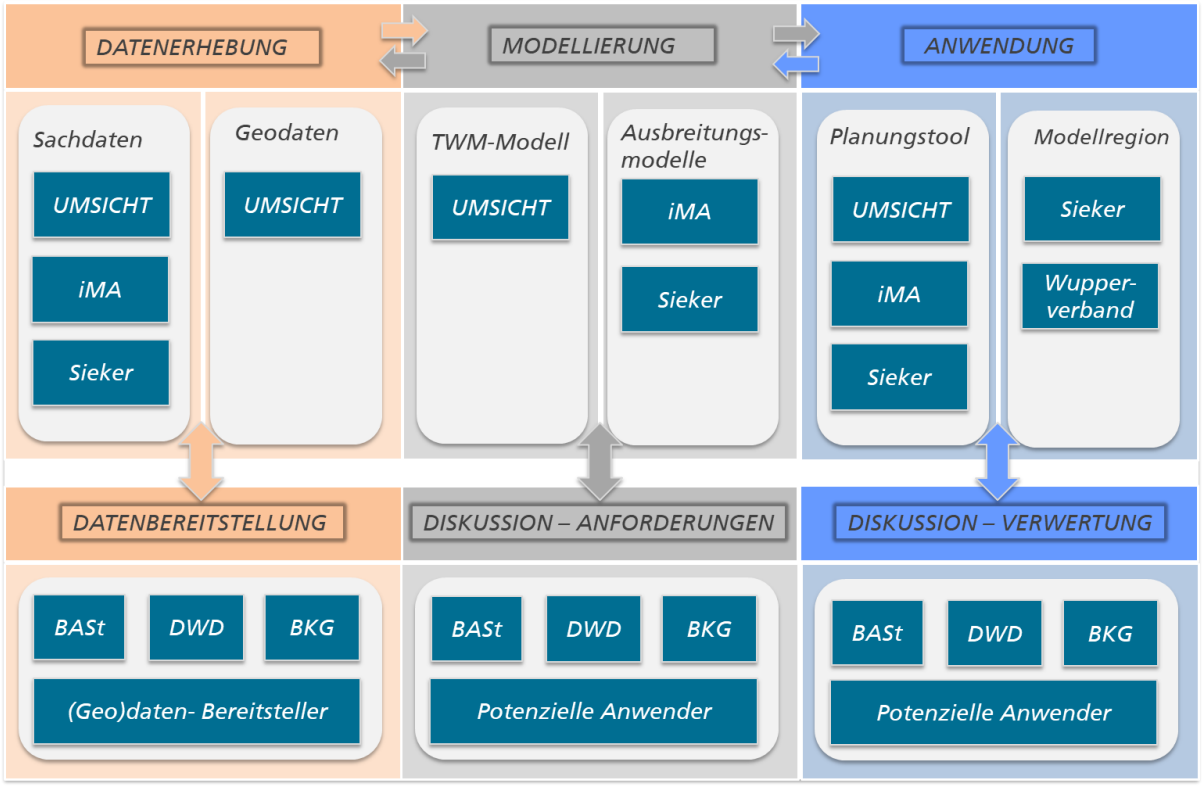


Abbildung 1: Arbeiten und Projektstruktur von *TyreWearMapping*

Zuerst erfolgte die Erfassung von Sach- und Geodaten als Basis für das TWM-Modell, das eine GIS- und probabilistische Modellierung zur Berechnung und Visualisierung der Verteilung von Reifenabrieb entlang der Verkehrswege in Deutschland umfasst. Die Modelle und Daten bildeten die Grundlage für die anschließenden siedlungswasserwirtschaftlichen Betrachtungen zur Ausbreitung von Reifenabrieb in den Einzugsgebieten Wupper und Panke sowie zum atmosphärischen Transport von Reifenemissionen für gesamt Deutschland.

Die in *TyreWearMapping* entwickelten Modelle sind Planungs- und Entscheidungstools für die Verkehrs- und Umweltplanung, um beispielsweise Hotspots zu ermitteln. Zur Definition von Nutzeranforderungen, Präzisierung des Funktionsumfangs sowie Bewertung der Planungsinstrumente wurden die dem BMVI nachgelagerten Behörden DWD, BKG und BASt sowie Stakeholder aus Kommunen, Behörden, Reifen und Automobilindustrie, Analytik und Forschungsinstitutionen in zwei interaktiven Workshops – vor Ort und virtuell - eingebunden.

Infolge der lückenhaften Datenlage zum Verkehr hat die Erstellung der Verkehrskarten für die einzelnen Bundeländer mehr Zeit in Anspruch genommen als erwartet, so dass der erfolgreiche Projektabschluss sich um drei Monate verzögert hat.

I.4 Stand des Wissens und der Technik

I.4.1 Allgemeines

Experten prognostizieren, dass weltweit 3,2 Milliarden Reifen in 2022 produziert werden. Als Folge des Mikroplastik Diskurs in der Gesellschaft und Wissenschaft ist der nutzungsbedingte Abrieb von Reifen immer mehr in den Fokus der Öffentlichkeit gelangt.

Er entsteht durch die Abrasion von Fahrzeugreifen beim Fahren und ist in der Umwelt allgegenwärtig; Reifenabrieb befindet sich in der Luft, an Fassaden und auf Oberflächen. Ein Großteil der Oberflächen, auf denen sich Reifenabrieb ablagert und niederschlägt, bilden die Verkehrsflächen und dessen nähere Umgebung (unbefestigte Flächen, z.B. Bankette, Böschungen). Zur Verkehrsfläche gehören in Deutschland Straßen, Wege und Plätze.

Es wird geschätzt, dass in Europa 1.327.000 t/a, davon in Deutschland 133.000 t/a an Reifenabrieb verkehrsbedingt in die Umwelt gelangen [Wagner et al.-2018]. Die BASt[3] gibt eine Reifenabriebsrate pro Fahrzeug in Abhängigkeit von Fahrweise, Straßenart usw. von 53 bis 200 mg/km für PKW und von bis zu 1.500 mg/km für Sattelzüge an.

Reifenabrieb wird als Mikroplastik klassifiziert und verursacht mit 57 % mehr als die Hälfte der gesamten Mikroplastikemissionen [Bertling et al.-2018].

Einen umfassenden Überblick über die Reifenproblematik generell bietet die Veröffentlichung von [Baensch-Baltruschat et al.-2020].

Reifenabrieb wird durch Niederschläge abgeschwemmt und gelangt mit dem Straßenablaufwasser, ebenso durch Auswaschung von Feinstaubpartikeln aus der Luft direkt in die Gewässer. In Gebieten mit Trennsystemen (getrennte Ableitung von Schmutz- und Regenwasser) werden die Schadstoffe mit dem Niederschlagswasser häufig ohne vorherige Behandlung direkt in die Gewässer eingetragen. In Gebieten mit einer Mischkanalisation werden die Niederschlagsabflüsse zwar zur Kläranlage geleitet, dort aber teils, z. B. bei Starkregenereignissen, als „Mischwasserabschläge“ über Regenüberläufe direkt in die Gewässer geleitet.

Während zahlreiche Studien zu Emissionsfaktoren und Vorhersagemodellen für die Ausbreitung von Reifenabrieb in der Atmosphäre veröffentlicht wurden z. B. [Evangeliou et al.-2020], [Ten Broeke et al.-2008], [Panko et al.-2018], ist die Ausbreitung von Reifenabrieb über die Straßenabläufe direkt in die Oberflächengewässer oder nach Passage durch die Kläranlage kaum untersucht. Messungen zeigen, dass die Konzentration an partikulären Stoffen in Regenwasserabläufen an Autobahnen um 85 % durch Sedimentationsbecken reduziert werden kann [Borg Olesen et al.-2019], [Kole et al.-2017]. Jedoch ist es nahezu unmöglich geeignete und maßvolle technische Maßnahmen zur Entfernung von Reifenabrieb zu planen, wenn die Hotspots für Reifenabriebemissionen nicht bekannt sind.

[Unice et al.-2019] berechnet die Ausbreitung von Reifenabrieb im Einzugsgebiet der Seine mittels hydrologischen Transportmodellen. Ihre Modellabschätzungen zeigen, dass ungefähr 2 % des Reifenabriebs, der im Einzugsgebiet freigesetzt wird, die Flussmündung erreicht. Eine aktuelle Studie aus der Schweiz [Sieber et al.-2019] schätzt, dass seit 1988 ca. 219±22 kt Reifenabrieb in der Schweiz in der Umwelt akkumuliert wurde.

Demgegenüber fokussiert sich *TyreWearMapping* mehr auf geographische Daten und Modelle in Abhängigkeit von Verkehrsdaten, Straßentypen, Fahrsituationen usw., um die Verteilung, die Ausbreitung und den Verbleib von Reifenabrieb entlang von Straßen, in der Atmosphäre und aquatischen Umwelt zu modellieren.

Eigenschaften von Reifenabrieb

Den größten Anteil in der Reifenzusammensetzung haben Gummi (synthetisches und natürliches) mit 40-50% und Ruß, Siliziumdioxid und Kalk mit 30-35% [Sommer et al.-2018a]. Diese und weitere Materialien gelangen in Form der abgeriebenen Partikel in die Umwelt. So werden ebenfalls Schwermetalloxide Zink und Cadmium, aber auch Blei, Chrom, Kupfer und Nickel freigesetzt. Bei der Vulkanisation von Reifen wird vorwiegend Zinkoxid eingesetzt, weshalb der Reifenabrieb als stärkste Zinkquelle im Straßenablaufwasser gilt. Das Zinkoxid ist in der Regel durch Cadmium verunreinigt, so dass beim Reifenabrieb zusätzlich Cadmium freigesetzt wird [Kluge-2010]. Weitere Schadstoffe, die vor allem mit den Feinpartikeln in den Wasserkreislauf gelangen sind Salze oder organische Verbindungen (PAK).

Aufgrund der Reibung zwischen Reifen und Straßenoberfläche unterliegen Reifen hohen Materialverlusten während ihrer Lebensdauer, die als Partikel mit Durchmessern von einigen Mikrometern bis Millimetern freigesetzt werden. Diese Partikel bilden spontan Konglomerate mit Straßenabriebpartikeln und Straßenstaub, die als TRWP (Tyre and Road Wear Particle) bezeichnet werden. Gemäß einer Studie von [Wagner et al.-2018] machen jeweils TWP und RWP 50 % der Masse von TRWP aus, so dass sich eine mittlere Dichte von 1,8 g/cm³ berechnet. TRWP besteht vorwiegend aus Reifengummi und Asphalt (20 bis 30 %). Weniger als 10 % TRWP zählt zu der Feinstaubfraktion mit einem Durchmesser kleiner als 10 µm. Gemäß [Sommer et al.-2018b] sind die TRWP Konglomerate wie eine „Wurst" geformt mit einer irregulären Struktur kleinerer und größerer Partikel.

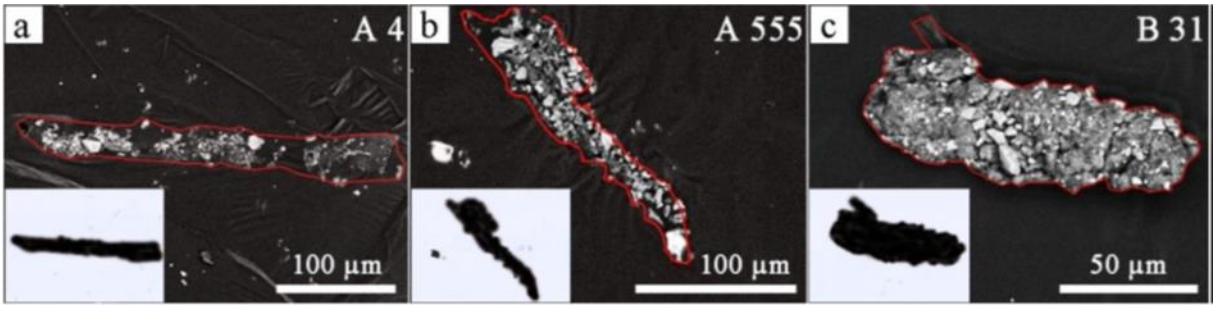


Abbildung 2: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von TRWP von einer Autobahn [15]

I.4.2 TyreWearMapping

Die Zusammenhänge zwischen den auf ein Fahrzeug wirkenden Kräften in Abhängigkeit der Fahr- sowie Straßensituation und dem Abrieb der Reifen sind äußerst komplex. Zum besseren Verständnis des anschließenden TWM-Modells werden die Grundlagen in diesem Abschnitt erläutert.

Kräfte auf ein Fahrzeug

„Die Reifen sind die einzigen Verbindungspunkte zwischen Fahrzeug und der Straße."

Diese aus der Werbung bekannte Aussage beschreibt zutreffend die Tatsache, dass die Reifen alle auf das Fahrzeug einwirkenden Kräfte auf die Straße übertragen müssen. Die Kräfte in Längs- und Querrichtung müssen differenziert betrachtet werden, da diese sehr unterschiedliche Auswirkungen auf das Abriebsverhalten der Reifen haben.

Zwischen Reifen und Straße herrscht ein dynamischer Kontaktzustand, bei der eine Kraftübertragung immer auch einen Schlupf bewirkt; Reifen und Straße legen nicht exakt dieselbe Wegstrecke zurück, sondern es ergibt sich eine Relativbewegung. Diese ist maßgeblich für den Abrieb verantwortlich. Abbildung 3 zeigt den Zusammenhang zwischen übertragener Kraft (hier dargestellt als Reibwert, d.h. geteilt durch die wirkende Normalkraft) und dem auftretenden Schlupf. Zu Beginn ist der Zusammenhang nahezu linear; bei einem Schlupf von ca. 10 % wird die maximale Kraftübertragung erreicht. Bei „üblichen" Reifen und Straßenbelägen wird in Extremsituationen ein

maximaler Reibwert von eins erreicht. Für größeren Radschlupf sinkt der Reibwert wieder. Im normalen Fahrbetrieb werden typischerweise nur kurzzeitig Werte bis zu ca. 0,2 erreicht (Anfahren, Bremsen, Kurvenfahrt).

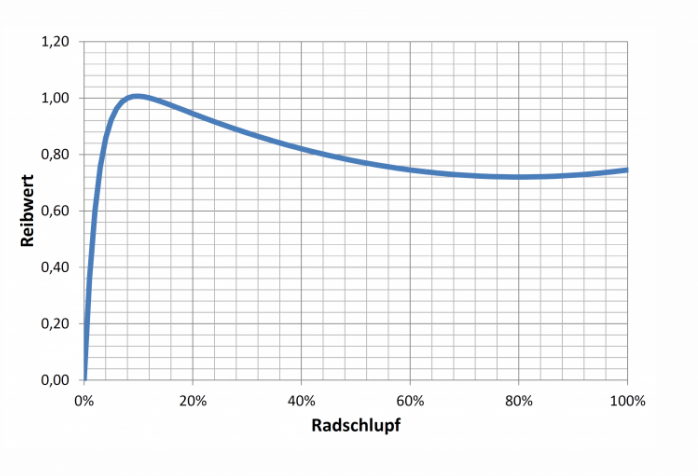


Abbildung 3: Abhängigkeit des Reibwerts in Abhängigkeit des (longitudinalen) Radschlupfs (prinzipielle Darstellung)

Am Fahrzeug greifen verschieden Kräfte an.

- Längskräfte
    - Luftwiderstand
    - Abrollwiderstand
    - Steigung und Gefälle
    - Beschleunigung und Verzögerung

- Querkräfte
    - Ausgleich von Querneigung
    - Fliehkraft in Kurven

Die folgende Abbildung 4 zeigt die Kräfte in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit, wobei Abrollwiderstand, Steigung und Gefälle sowie Ausgleich der Querneigung unabhängig von der Geschwindigkeit sind. (Die Herleitung der Zusammenhänge ist in Abschnitt II.1.3 dargestellt.)

Die Gesamtkraft ist die Kraft, die der Motor aufbringen muss, um das Fahrzeug auf ebener Strecke mit konstanter Geschwindigkeit anzutreiben; sie setzt sich aus Roll- und Luftwiderstand zusammen und ist für den Kraftstoffverbrauch verantwortlich. Erst bei ca. 50 km/h erreicht der Luftwiderstand die Größe des Rollwiderstands; wohingegen bei 200 km/h der Rollwiderstand praktisch bedeutungslos ist.

Die untersten drei horizontalen Linien bezeichnen die Kräfte durch konstante Steigungen (1 %, 4 %, 8 %). Es ist zu erkennen, dass eine 8 %ige Steigung einer Rollgeschwindigkeit von 160 km/h entspricht.

Die übrigen horizontalen Linien entsprechen Beschleunigungen, die aber nur kurzfristig auftreten (sollten).

Die gekrümmten gefächerten Linien sind die Querkräfte bei Kurvenfahrt bei verschiedenen Radien. Es ist zu erkennen, dass die Querkräfte schnell sehr hohe Werte annehmen.

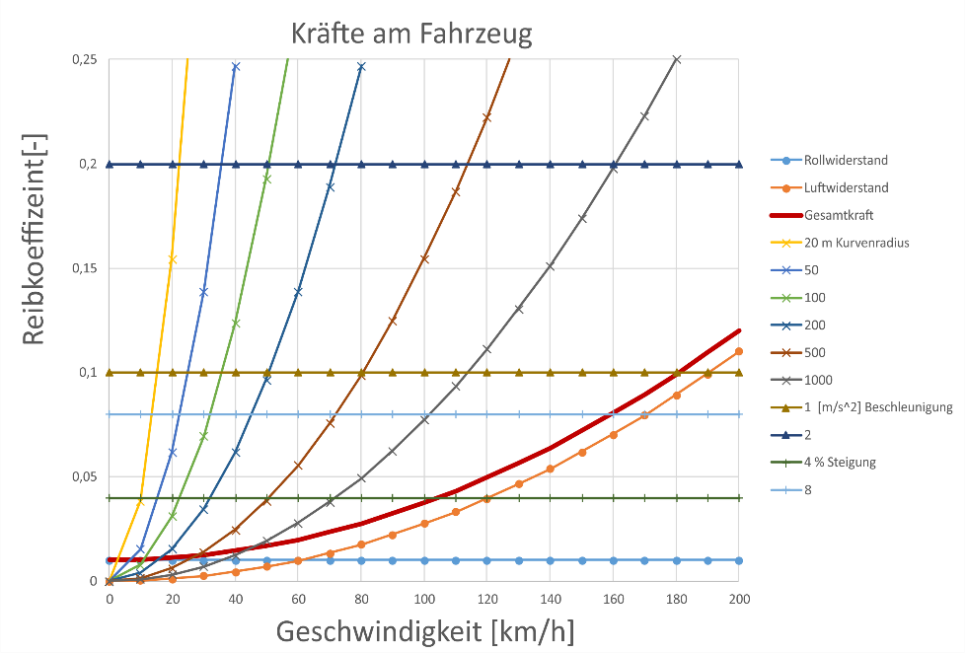


Abbildung 4: Kräfte am Fahrzeug bei verschiedenen Geschwindigkeiten (dargestellt als Reibkoeffizient, d.h. im Verhältnis zur Gewichtskraft des Fahrzeugs.

Abbildung 5 zeigt die Verschleißintensität der Fahrsituation gemäß dem entwickelten Modell (vgl. Abschnitt II.1.3). In diesem Modell dominieren die Kurvenkräfte nochmals weitaus stärker.

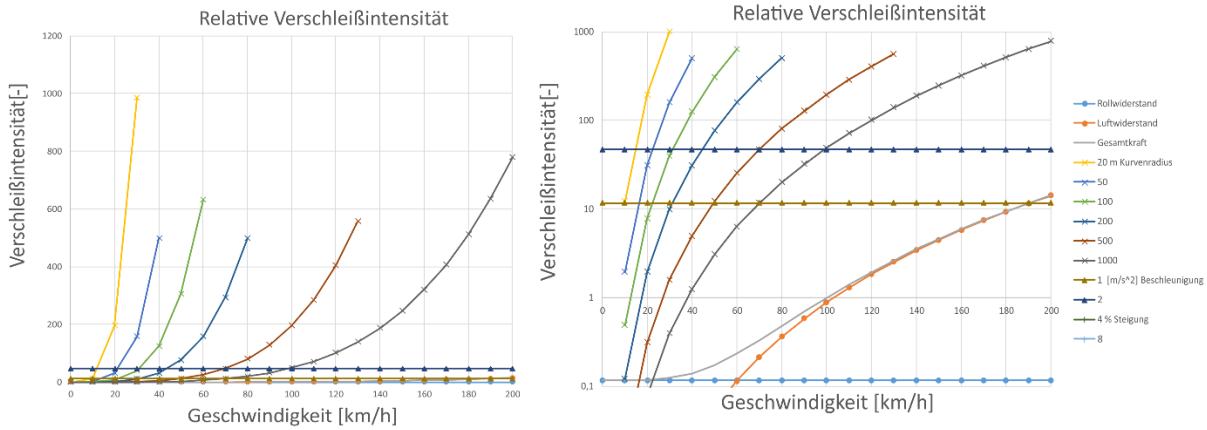


Abbildung 5: Verschleißintensität verschiedener Fahrsituationen: linear Darstellung (links), halblogarithmische Darstellung (rechts)

Reifenabrieb

Das Abriebsverhalten von Fahrzeugreifen wird bereits seit Jahrzehnten intensiv untersucht, ohne abschließend verstanden zu sein. Ziel der frühen Untersuchungen ist eine lange Produkthaltbarkeit zu erreichen – weniger die Vermeidung von Mikroplastik Emissionen.

In einem frühen Übersichtsartikel gibt [Veith-1992] an, dass der Verschleiß im Wesentlichen proportional zur Reibenergie ist, also Reibkraft multipliziert mit der Schlupfstrecke. Empirisch werden exponentielle Ansätze gefunden.

$$m = const.F^a \quad \text{mit} \quad 2 < a < 4.$$

Hierbei weisen Beläge mit starker Mikrostruktur die niedrigen Exponenten auf und glatte Straßen den hohen Exponenten, d.h. auf schleißenden Straßen ist der Einfluss des Fahrverhaltens geringer als auf glatten Straßen. Trotzdem ist der Verschleiß auf Straßen mit hoher Mikrostruktur wesentlich höher, da der konstante Faktor wesentlich höher ist.

Reibung und Verschleiß sind eine Systemeigenschaft, d.h. sie sind nicht spezifisch für einen Stoff, sondern hängen von der Reibpaarung (und gegebenenfalls noch von Zwischenstoffen, z.B. Sand, Wasser) ab. Deshalb hat die Straßenoberfläche einen wesentlichen Einfluss auf den Reifenabrieb; diese wird als Textur beschrieben, die sich über viele Längenskalen erstreckt [Klempau-2003]:

- Mikro-Textur (10^{-3} bis 10^{-1} mm)
- Makro-Textur (10^{-1} bis 10^{1} mm)
- Mega-Textur (10^{1} bis 10^{3} mm)
- Unebenheit (> 10^{3} mm)

Für den Verschleiß ist im Wesentlichen die Mikrotextur verantwortlich. In Deutschland sind überwiegend verschiedene Arten von Asphalt-Oberflächen verbaut, wie z.B. der Drainage-Asphalt. Darüber hinaus kommen auf Fernstraßen Betonoberflächen und im städtischen Bereich (Wohnstraßen, Parkplätze) Pflasterflächen zum Einsatz. Die Textur der Oberflächen verändert sich mit der Zeit durch Verwitterung und Fahrbetrieb.

Die Textur ist in dem vorliegenden Modell (noch) nicht berücksichtig worden, da

- flächendeckende Informationen über das Straßenbaumaterial und den aktuellen Zustand nicht zur Verfügung stehen sowie
- kein quantitatives Modell für den Zusammenhang zwischen Oberflächenbeschaffenheit und Schleißwirkung gefunden werden konnte.

Das Wetter, insbesondere Niederschläge, hat einen großen Einfluss auf das Abriebsverhalten. Ein Flüssigkeitsfilm zwischen Reifen und Straße verhindert zum einen die Adhäsion und kühlt vor allem die Reifenoberfläche, so dass der Verschleiß abnimmt.

[Bascunana-1986] beschreibt den Temperatureinfluss auf den Abrieb: Bei höheren Temperaturen ist der Abrieb generell größer; die Abhängigkeit war bei allen verwendeten Reifen in etwa gleich stark ausgeprägt. Der Einfluss des Wetters ist bekannt, aber es konnte kein quantitatives Modell identifiziert werden, so dass der Wettereinfluss nicht im Modell berücksichtig wird.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Bei der Modellierung und Evaluation des Wuppereinzugsgebiets hat der Wupperverband die Projektpartner mit seiner Expertise und vor allem GIS-Daten unterstützt. Im Gegenzug erhält der Wupperverband die finalen Datensätze von *TyreWearMapping* zur Integration in die eigenen GIS-Systeme. Außerdem haben verschiedene nachgelagerte Behörden des BMVI und das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie das Projekt mit Geo-, Sach- und Wetterdaten unterstützt sowie sich in Workshops aktiv eingebracht. TWM kooperiert mit potentiell anwendenden Kommunen und hat sich national und international in Arbeitsgruppen und mit anderen Forschungsprojekten sehr gut vernetzt.

I.5.1 Assoziierte Partner und (Geo)Datenbereitsteller

Der **Wupperverband (WV)** wurde 1930 gegründet und betreibt 12 Talsperren, 11 Klärwerke und eine Schlammverbrennungsanlage. Im Rahmen seiner umfangreichen Aufgaben im Bereich der Wasserwirtschaft ist der Wupperverband mitwirkend an der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie und dem geforderten Erreichen des guten Zustands der Gewässer beteiligt. In einigen Abschnitten der Wupper werden die Grenzwerte für Zink und Kupfer regelmäßig überschritten, was auch eine Folge des Eintrags von Reifenabrieb ist. Um langfristig sicherzustellen, dass die Qualitätsnormen eingehalten werden, sind Planungstools zum Aufkommen und Verbreitung von Reifenabrieb als relevanter Schadstoff bei der Planung der Wasser- und Abwasserinfrastruktur für den Wupperverband sehr hilfreich. Der WV hat sich aktiv an Diskussionen zu Nutzeranforderungen und potenziellen Verbreitungswegen der Projektergebnisse beteiligt.

Der **Deutsche Wetterdienst (DWD)** ist für die Erfüllung der meteorologischen Erfordernisse aller Wirtschafts- und Gesellschaftsbereiche in Deutschland zuständig. Der involvierte Geschäftsbereich Forschung und Entwicklung fördert als fachlicher Infrastrukturbereich alle Aktivitäten des Deutschen Wetterdienstes durch die zentrale Bearbeitung von Forschungs- und Entwicklungsaufgaben auf dem Gebiet der Meteorologie. Der DWD unterstützte das Projekt mit der Bereitstellung von Wetterdaten für die Ausbreitungsmodellierungen.

Die **Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** ist die praxisorientierte, technisch-wissenschaftliche Forschungseinrichtung des Bundes auf dem Gebiet des Straßenwesens. Sie widmet sich den vielfältigen Aufgaben, die aus den Beziehungen zwischen Straße, Mensch und Umwelt resultieren. Die BASt hat Verkehrszählungsdaten für die Modellierungen zur Verfügung gestellt.

Das **Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG)** gehört zum Geschäftsbereich des Bundesministeriums des Innern und ist ein modernes Kompetenz- und Dienstleistungszentrum des Bundes. Es stellt geodätische Bezugssysteme und geotopographische Referenzdaten für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland bereit und entwickelt die dazu notwendigen Technologien. Zum Projektbeginn wurde mit dem Antragsteller eine Lizenzvereinbarung getroffen, um alle relevanten Geodaten zu Landnutzung und Verkehrswegen für das Projekt bereitzustellen.

I.5.2 Kommunen

Bei der Nutzerintegration waren die Diskussionen mit den Kommunen **Oberhausen** und **Berlin** sehr hilfreich. Die Ideen für ein übergeordnetes Datenportal mit Modellierungsplattform – auch dynamische Modelle und neue Verkehrsszenarien - werden aktuell auf europäischer Ebene und beim BMBF weiterverfolgt.

I.5.3 Kooperationen mit anderen Forschungsprojekten

Seit Beginn von *TyreWearMapping* gab es in drei Arbeitstreffen und diversen Telefonaten einen intensiven Wissensaustausch mit dem BMBF-Projekt *RAU* (Reifenabrieb in der Umwelt, [BMBF-2017]). Während sich *TyreWearMapping* mit der Modellierung der Verteilung und Ausbreitung

von Reifenabrieb in der Umwelt befasst, verfolgt *RAU* einen praktischeren Ansatz, der unter anderem Messungen von Reifenabrieb im Straßenverkehr und neue Filtersysteme für Reifenabrieb umfasst. Die Messergebnisse von *RAU* werden im Anschluss an *TyreWearMapping* genutzt, um das *TyreWearMapping*-TWM-Modell zu evaluieren. Partner aus beiden Projekten planen eine gemeinsame Veröffentlichung zur probabilistischen Modellierung.

I.5.4 Internationale Kooperationen

Die Ergebnisse von TWM wurden zweimal bei Arbeitstreffen der TRWP Plattform, einer internationalen fach- und institutionenübergreifenden Arbeitsgruppe zum Thema Reifenabrieb in Brüssel (https://www.tyreandroadwear.com/ Stand: 11.01.21) vorgestellt. In der entsprechenden Arbeitsgruppe ist die Projektleiterin von TWM Mitglied. Sie bringt sich aktiv in die Akquise internationaler Forschungsprojekte zur Anwendung der Ergebnisse von TWM in Pilotprojekten mit europäischen Kommunen ein.

II. EINGEHENDE DARSTELLUNG

II.1 Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse

Das geplante Forschungsvorhaben zeichnete sich wie folgt durch ein systematisch methodisches Vorgehen aus: (i) Datenerfassung (BMVI, amtliche Geodaten, EUROSTAT, sonstige Datenbanken und Publikationen); (ii) primäre Datenverarbeitung und -auswertung (TWM-Modell: Verkehrsdatenmodell und probabilistische Modelle zur Verteilung von Reifenabrieb), (iii) sekundäre, geographische Datenauswertung (Ausbreitungsmodelle von Reifenabrieb für Luft und Wasser) und (iv) deren datenbasierte Anwendung für zwei exemplarische Modellregionen (Flusseinzugsgebiete Wupper und Panke) sowie (iv) Planungs- und Entscheidungstools (Stadt- und Verkehrsplanung).

In diesem Abschnitt werden die wesentlichen Ergebnisse von *TyreWearMapping* strukturiert zusammengefasst. Einige Projekt-Highlights zeigt Abbildung 6.

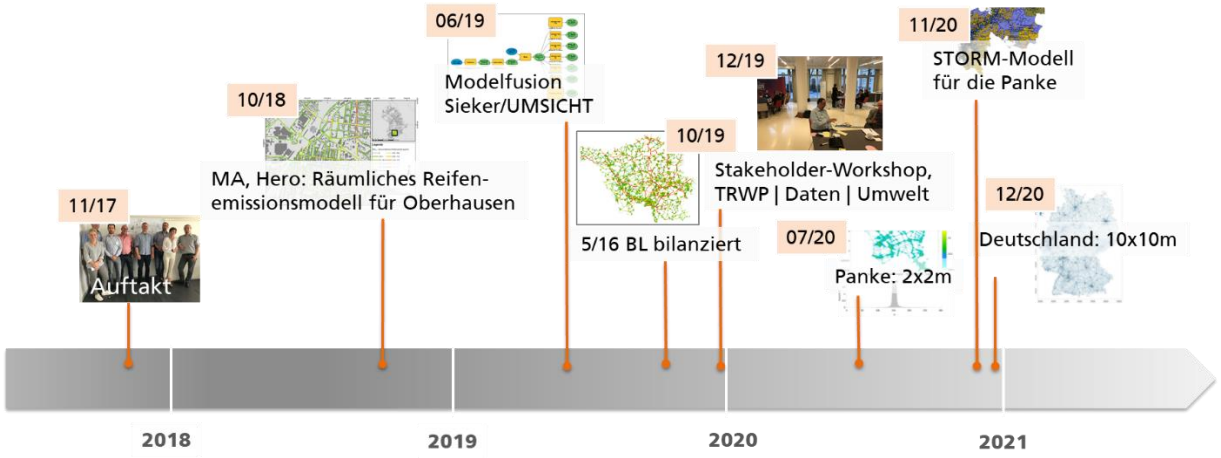


Abbildung 6: Highlights und projektinterne Meilensteine von *TyreWearMapping*

II.1.1 Sachdaten zur Entstehung und Verbreitung von Reifenabrieb

In Vorbereitung zur Ermittlung der Quellemissionen wurde zunächst anhand mehrerer sehr umfangreichen Literaturrecherchen von **Fraunhofer UMSICHT, iMA und SIEKER** ermittelt, welche Faktoren einen Einfluss auf die Entstehung und Ausbreitung vom Reifenabrieb haben (Abbildung 7). Diese wurden im Anschluss klassifiziert (Abbildung 8) und hinsichtlich der Relevanz und Quantifizierbarkeit bewertet (Abbildung 9). Es stellte sich heraus, dass zahlreiche Faktoren zwar für einzelne Fahrzeuge gelten (Beladung, Spureinstellung, Reifenart etc.) jedoch im Mittel über viele Fahrzeuge nicht mehr ausschlaggebend sind, weil sie vielerorts gelten und somit zu einer Art „Basisbelastung“ führen. Die verortbaren und quantifizierbaren Faktoren, die für die dezidierte Berechnung des Reifenabriebs genutzt werden sollen, wurden nach mehrmaliger Abstimmungen sowohl mit den Projektpartnern als auch mit Partnern aus dem parallel laufenden BMBF Projekt *RAU* [BMBF-2017] festgelegt. Das Ergebnis wird in Tabelle 1 dargestellt. Die ermittelten relevanten Faktoren wurden als Basis für weitere Berechnungsschritte festgelegt.

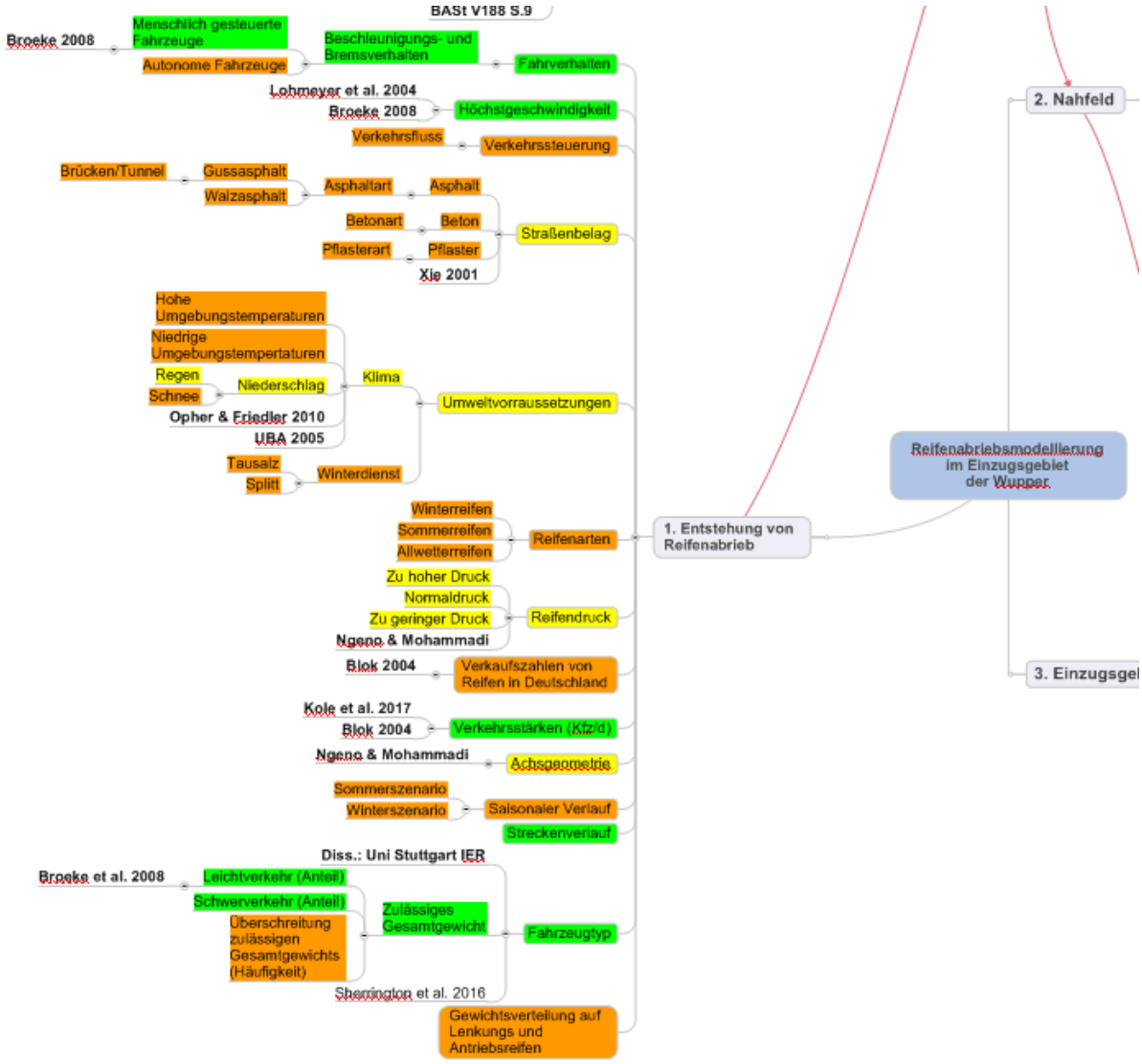


Abbildung 7: Auszug aus Mindmap zur grundlegenden Ermittlung der Faktoren, die an der Entstehung von Reifenabrieb beteiligt sind (Quelle: SIEKER)

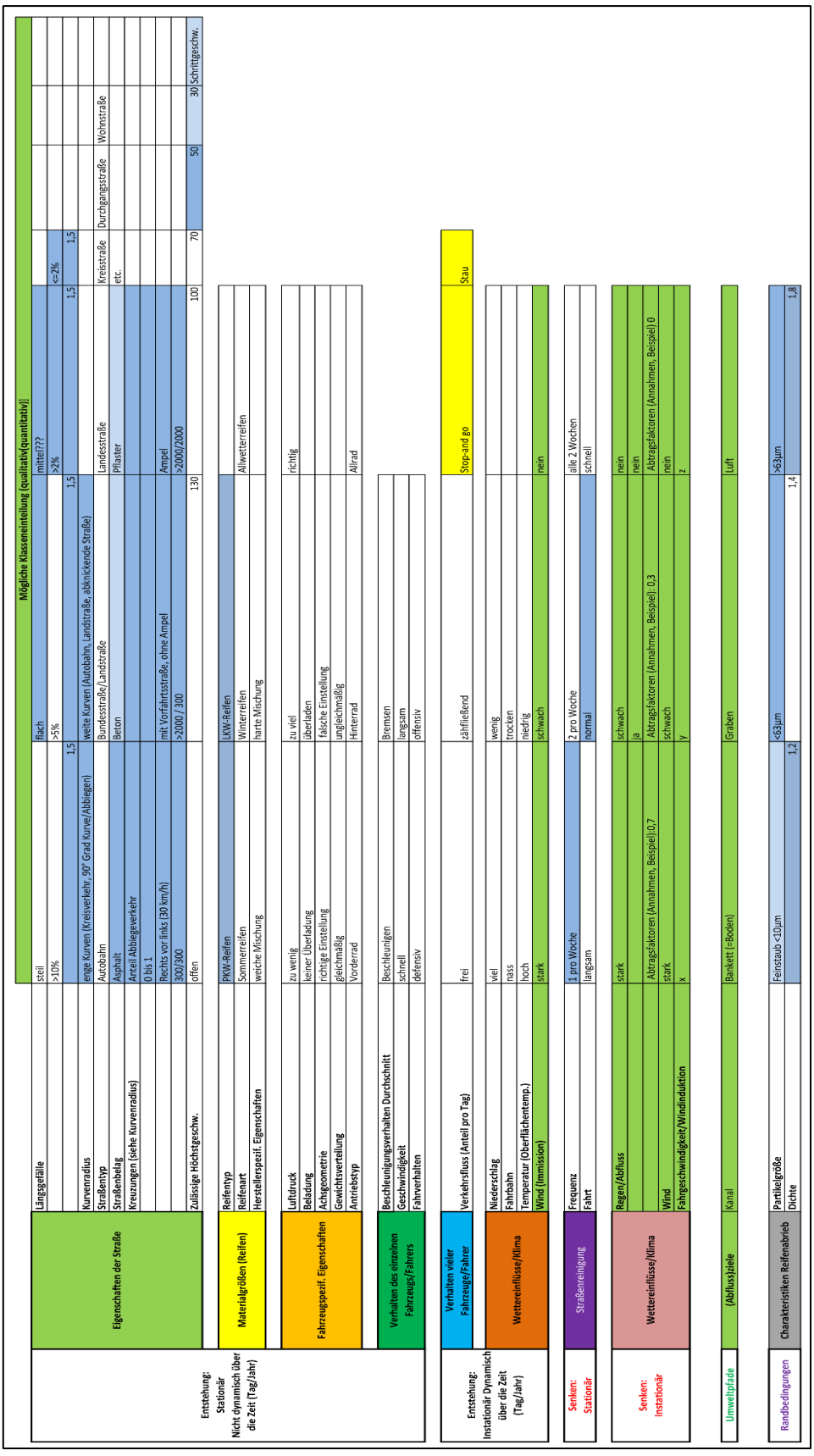


Abbildung 8: Ermittlung von Faktoren auf die Entstehung von Reifenabrieb, Bewertung der Relevanz, mögliche Quantifizierbarkeit (Teil 1 von 2)

			Bewertung der Relevanz und Quantifizierbarkeit				
			Einfluss auf Reifenabrieb	Relevanz Verortung	Ergebnis	Quantifizierbarkeit	vorhandene Daten/Quellen
Entstehung: Stationär Nicht dynamisch über die Zeit (Tag/Jahr)	Eigenschaften der Straße	Längsgefälle	hoch	hoch	hoch	ja (physikalisches Modell), TUB	Geodaten
		Kurvenradius	hoch	hoch	hoch	ja (physikalisches Modell), TUB	Annahmen (jede Straße hat ein Quergefälle)
		Straßentyp	hoch	hoch	hoch	ja (physikalisches Modell), TUB	Geodaten
		Straßenbelag	mittel	mittel	mittel	???	Geodaten
		Kreuzungen (siehe Kurvenradius)	mittel	mittel	mittel	???	nicht flächendeckend, lokal vorhanden
		Kreuzungen (siehe Kurvenradius)	hoch	hoch	hoch	ja (indirekt aus physikalischem Modell),	Geodaten
						Buffer um Kreuzung	
		Zulässige Höchstgeschw.	mittel/hoch	mittel/hoch	mittel/hoch	ja (physikalisches Modell)	Geodaten
	Materialgrößen (Reifen)	Reifentyp	hoch	hoch	hoch	ja (Literatur), über DTV, Zählung	vorhanden (Literatur)
		Reifenart	hoch	niedrig	niedrig		nicht vorhanden
		Herstellerspezif. Eigenschaften	mittel	niedrig	niedrig		nicht vorhanden
	Fahrzeugspezif. Eigenschaften	Luftdruck	hoch	niedrig	niedrig		nicht vorhanden
		Beladung	mittel	niedrig	niedrig		nicht vorhanden
		Achsgeometrie	mittel	niedrig	niedrig		nicht vorhanden
		Gewichtsverteilung	mittel	niedrig	niedrig		nicht vorhanden
		Antriebstyp	mittel	niedrig	niedrig		nicht vorhanden
	Verhalten des einzelnen Fahrzeugs/Fahrers	Beschleunigungsverhalten Durchschnitt	hoch	hoch	hoch	ja (physikalisches Modell)	"Ottonormalfahrer" --> Kreuzungen
		Geschwindigkeit	mittel	hoch	hoch	ja (physikalisches Modell)	"Ottonormalfahrer" --> Zulässig. Höchstgeschw.
		Fahrverhalten	hoch	niedrig	niedrig		nicht vorhanden (ggf. MatSim)
Entstehung: Instationär Dynamisch über die Zeit (Tag/Jahr)	Verhalten vieler Fahrzeuge/Fahrer	Verkehrsfluss (Anteil pro Tag)	hoch	hoch	hoch	MatSim????	nicht vorhanden (ggf. MatSim)
	Wettereinflüsse/Klima	Niederschlag	hoch (Verteilung)	hoch	hoch	schwierig (ggf. Literatur/RAU)	DWD
		Fahrbahn					
		Temperatur (Oberflächentemp.)	hoch (Entstehung)	niedrig	niedrig		nicht vorhanden
		Wind (Immission)	??	??	??	Rödle	???
Senken: Stationär	Straßenreinigung	Frequenz	hoch (Verteilung)	hoch			
		Fahrt				Aus Vorversuchen BSR	
Senken: Instationär	Wettereinflüsse/Klima	Regen/Abfluss	hoch	hoch	hoch	derzeit noch keine Lösung hierfür	???
		Wind	hoch (Verteilung)	hoch	hoch	schwierig (ggf. Literatur/IMA)	DWD
		Fahrgeschwindigkeit/Windinduktion	???	???	???	???	???

Abbildung 9: Ermittlung von Faktoren auf die Entstehung von Reifenabrieb, Bewertung der Relevanz, mögliche Quantifizierbarkeit (Teil 2 von 2)

Tabelle 1: Bereinigte Faktoren für den Reifenabrieb – Festlegung der zu betrachtenden Faktoren für die Ermittlung der Quellemissionen an Reifenabrieb

Straße	Längsgefälle
	Quergefälle (immer vorhanden)
	Kurvenradius
	Straßentyp
	Kreuzungen (siehe Kurvenradius)
	Zulässige Höchstgeschwindigkeit
	DTV
Wetter/Klima	Niederschlag
	Wind (Immission)
Straßenreinigung	Reinigungsintervall
	Reinigungseffizienz
(Abfluss)ziele	Zentrale/ dezentrale Entwässerung
Reifenabrieb	Partikelgröße
	Dichte

II.1.2 Verkehrsdatenmodell | TWM-Modell Part I

Die Methodik zur für ein Verkehrsdatenmodell wurde im Wesentlichen von **Fraunhofer UMSICHT** entwickelt, während deren Anwendung auf die Ausbreitung des Reifenabriebs in den Flusseinzugsgebieten im nächstfolgenden Abschnitt II.1.3 von SIEKER und UMSICHT gemeinsam umgesetzt wurde.

II.1.2.1 Datengrundlage

Grundlage für die Berechnung von Reifenabriebemissionen sind die Verkehrsmengen der einzelnen Straßenkategorien (Bundesautobahnen, Bundesstraßen, Landesstraßen, Kreisstraßen, Gemeindestraßen). Zur Beschreibung der Verkehrssituation wird meist die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke verwendet (DTV), welche die Anzahl der Fahrzeuge pro 24 h für einen bestimmten Abschnitt darstellt. Zudem hängt die Menge an produziertem Reifenabrieb wesentlich von den Fahrzeugkategorien ab.

Die Daten zu den automatischen Verkehrszählungen, die auf Bundesautobahnen durchgeführt werden, sind flächendeckend als CSV-Datei vorhanden (die Datei kann als Punkt-Shapedatei exportiert werden). Diese beinhalten ausführliche Informationen über die DTV sowie über alle Fahrzeugkategorien (DTV für Kraftfahrzeuge zusammen, relativer Anteil (%) an Lieferwagen, Zweirädern, PKW, PKW mit Anhänger, LKW, Sattelzüge, Busse etc.). Die DTV wird für Werktage (Montag bis Freitag) oder Wochenenden differenziert dargestellt.

Neben automatischen Verkehrszählungen, die kontinuierlich durchgeführt werden, gibt es auch manuelle Straßenverkehrszählungen (SVZ) im Fünfjahresturnus – die letzte war 2015. Manuelle Straßenverkehrszählungen ermitteln Verkehrsmengen für Bundesautobahnen und Bundesstraßen flächendeckend für ganz Deutschland. Den einzelnen Bundesländern wird dabei die Möglichkeit gegeben, die Verkehrszählungen auf das nachgeordnete Straßennetz zu ergänzen (Landesstraßen, Kreisstraßen). Es werden nur abschnittsweise Verkehrsmengen für Landstraßen und Kreisstraßen ermittelt; der größte Anteil des Straßennetzes wird nicht berücksichtigt. Bei manuellen Straßenverkehrszählungen wird lediglich zwischen Leichtverkehr (LV) und Schwerverkehr (SV) unterschieden. Unter LV fallen PKWs (Geländewagen, Krankenwagen, Kleinomnibusse, Wohnmobile), motorisierte Zweiräder (Mofas, Mopeds, Krafträder, Motorroller) sowie Lieferwagen bis 3,5 t zulässiges Gesamtgewicht. Zum SV zählen LKWs mit mehr als 3,5 t zulässiges Gesamtgewicht (Sattelkraftfahrzeuge, Busse).

Die Daten der SVZ 2015 sind einheitlich für alle Bundesländer als Tabellenband im PDF-Format verfügbar; allerdings ohne Koordinaten für die einzelnen Zählstellen, was eine Zuordnung und Darstellung in GIS nicht möglich macht. Frei verfügbare Geodaten über die letzte SVZ aus 2015 gibt es nur für Nordrhein-Westfalen (NRW) und Niedersachsen. Neben Autobahnen und Landesstraßen wurden für NRW auch 3858 km Bundesstraßen und 3966 km Kreisstraßen erfasst sowie 7764 km Landesstraßen in Niedersachsen. Zum Vergleich: Die Gesamtlänge der Landesstraßen beträgt in NRW 11100 km, der Kreisstraßen 9780 km und der Bundesstraßen 4467 km.

Für andere Bundesländer sind lediglich Online-Dienste (mittels WMS: Ein Web Map Service ist eine Schnittstelle zum Abrufen von Auszügen aus Landkarten über das Internet) verfügbar, die die ermittelten Verkehrsmengen in GIS oder in einer Web-Darstellung zeigen. Für Hessen, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein, Rheinland-Pfalz sowie den Stadtstaat Bremen konnten keine frei verfügbaren Geodaten oder WMS-Dienste identifiziert werden. Die Verkehrsmengen sind für diese Bundesländer lediglich als Verkehrsmengenkarten im PDF-Format vorhanden, wobei für einzelne Länder auch Excel-Tabellen verfügbar sind.

Auf Anfrage bei den zuständigen Ämtern konnten für die meisten Bundesländer tabellarische Daten geliefert werden. Wo dies nicht der Fall war, waren die recherchierten Daten die Ausgangsbasis. Auf Grundlage der verfügbaren Basisverkehrsdaten wird ein Verkehrsdatenmodell in GIS für sämtliche Bundesländer entwickelt.

II.1.2.2 Übersicht Modellabfolge

Die einzelnen Prozessschritte der Modellabfolge sind in Abbildung 10 dargestellt; die Methodik der GIS-Modellierung wird jeweils in den nachfolgenden Abschnitten vorgestellt und diskutiert.

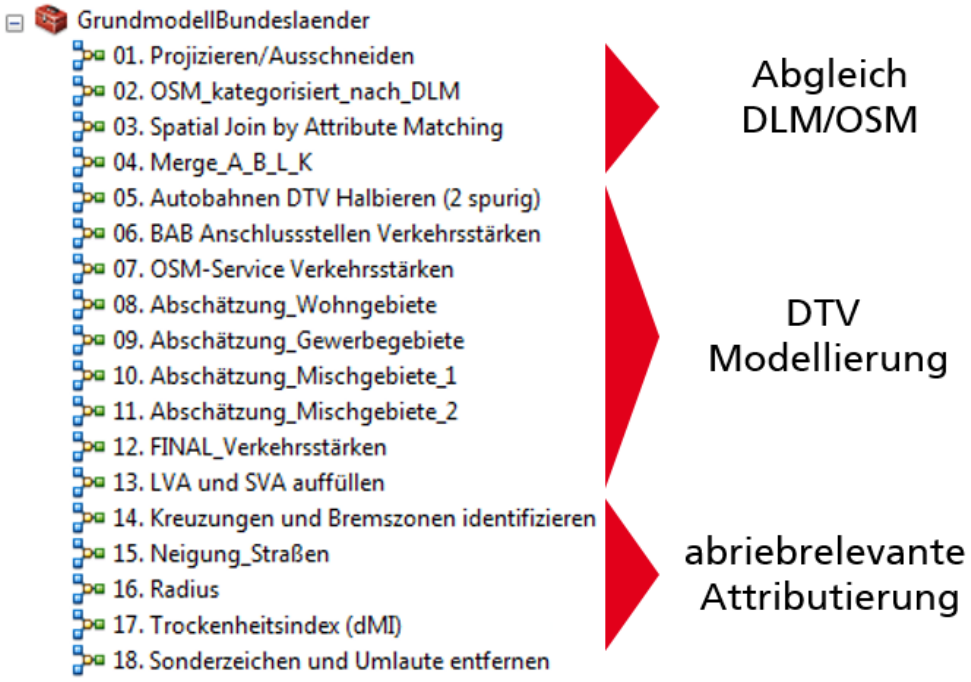


Abbildung 10: Modellabfolge bei der Entwicklung der Verkehrsdatenmodelle in GIS

II.1.2.3 Abgleich DLM und OSM (Modelle 1-4)

In einem ersten Schritt (Modell 01, Abbildung 11) wurden die frei verfügbaren OSM-Daten zunächst projiziert und für die einzelnen Bundeländer ausgeschnitten. Die Modelle mussten auf Ebene von Bundesländern ausgeführt werden, da die Datenmenge ansonsten nicht prozesszierbar gewesen wäre.

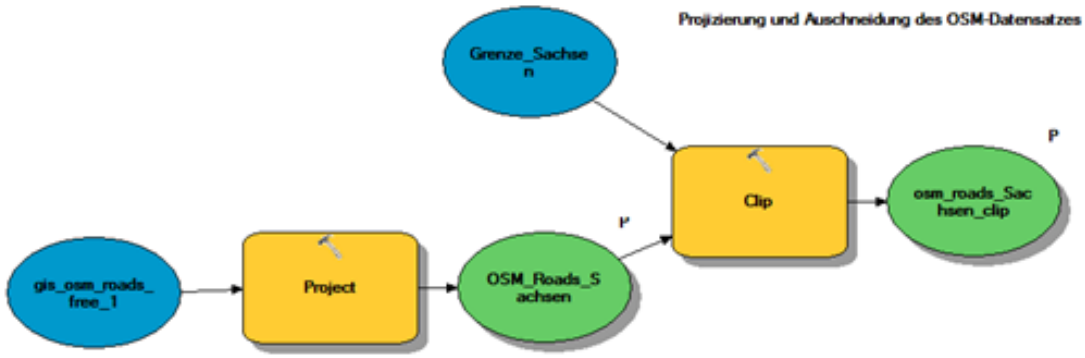


Abbildung 11: Modell 01 zur Projizierung und Ausschneidung des OSM-Datensatzes

Grundsätzlich scheiterten alle Versuche über räumliche Verbindung einen zufriedenstellenden Sachdatenaustausch zwischen den beiden Datensätzen OSM (Open Street Map) und DLM (Digitales Landschaftsmodell) zu generieren. Die Ungenauigkeiten und fehlerhaften Zuordnungen sind wegen der Größe der Daten und vieler Überschneidungen (hierbei sind Kreuzungen gemeint, die eine genaue automatisierte Zuordnung nicht möglich machen) sehr hoch. Auch durch Umwege (Erstellung von Puffern an Kreuzungen sowie entlang der Straßen, Anwendung von verschiedenen räumlichen Verbindungsmethoden wie „CLOSEST", „INTERSECT", „WITHIN A DISTANCE") war ein zufriedenstellendes Ergebnis nicht zu erreichen.

Aus diesem Grund erfolgte die Definierung der Straßenkategorien hauptsächlich über die bereits vorhandenen Informationen im OSM-Datensatz, vor allem über die Spalte „fclass", sowie über die Spalte „ref", welche die Kennzeichnungen verschiedener Straßenkategorien – Autobahnen, Bundesstraßen, Landesstraßen/ Staatsstraße und Kreisstraßen (z.B. A1, B224, L101, S2, K8) beinhaltet. Durch Vergleich dieser Kennzeichnungen mit den definierten Straßenkategorien im Basis-DLM-Datensatz wurde festgestellt, dass die Unterschiede relativ gering ausfallen und, im Vergleich mit der Spatial Join-Methode, ein viel genaueres Ergebnis erzielt werden konnte.

Insgesamt werden im OSM-Datensatz 26 Straßenkategorien unterschieden. Im Basis-DLM-Datensatz sind es nur sieben Kategorien. Durch visuelle Interpretation wurden die einzelnen Straßenkategorien der beiden Datensätze verglichen, um somit eine Kategorisierung der OSM-Daten gemäß der Kategorisierung der Basis-DLM Daten zu erreichen. Das Modell zur Definierung der Straßenkategorien ist in Abbildung 12 dargestellt.

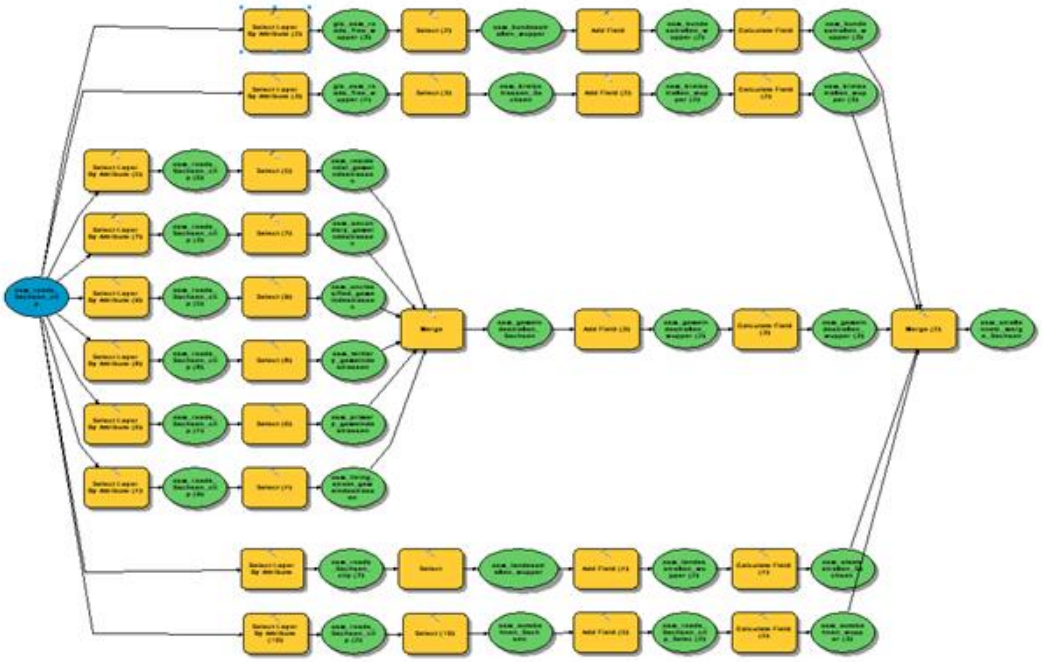


Abbildung 12: Modell 02 zur Definierung der OSM-Straßenkategorien nach Basis-DLM Straßenkategorien

Beginnend mit den Autobahnen wurde erkannt, dass die beiden Straßenkategorien im OSM-Datensatz „motorway“ und „motorway_link“ den Autobahnen aus dem Basis-DLM-Datensatz entsprechen. Diese beiden Kategorien wurden dementsprechend zusammengefügt und als neue Kategorie „Autobahnen“ definiert. Vorteilhaft für die späteren Berechnungen war auch die Möglichkeit, Autobahnauffahrten sowie Abfahrten separat oder mittels Abfragen auszuwählen, was beim Basis-DLM-Datensatz nicht der Fall war. Bundesstraßen, Landesstraßen sowie Kreisstraßen wurden über die oben genannte Spalte „ref“ identifiziert und mit den jeweiligen Straßenkategorien aus Basis-DLM verglichen und visuell interpretiert (Abbildung 13). Hierzu wurden SQL-Abfragen verwendet. Dabei ist es wichtig, dass je nach Bundesland die Bezeichnung Landesstraße bzw. Staatsstraße variiert (Beispiel Freistaat Sachsen: Staatsstraße, NRW: Landesstraße). Daher müssen in allen Modellen die Bezeichnung bzw. Abfragen dementsprechend angepasst werden.

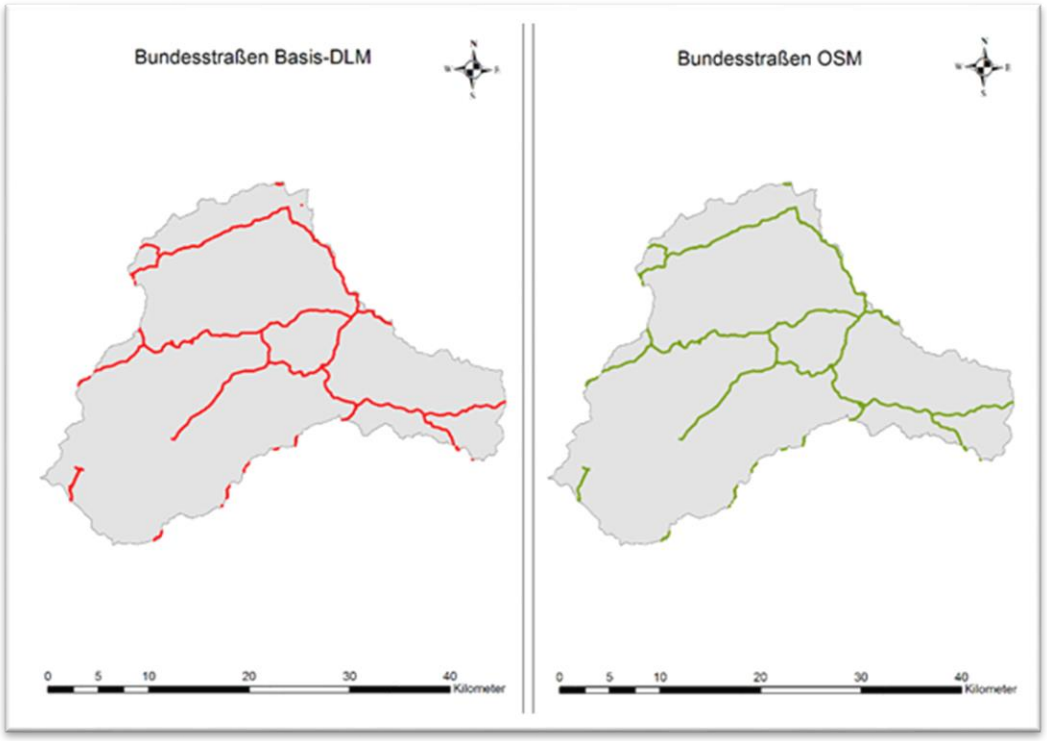


Abbildung 13: Exemplarischer Vergleich der Kategorie Bundesstraßen bei Basis-DLM und des Ergebnisses der SQL-Abfrage bei OSM im Einzugsgebiet der Wupper

Gemeindestraßen sind im OSM-Datensatz durch die Spalte „ref" nicht gekennzeichnet. Lediglich deuten die Kategorien „residential" und „living_street" in der Spalte „fclass" auf Gemeindestraßen hin. Diese können allerdings auch durch die Kennzeichnung in Spalte „ref" als Landesstraßen oder eine andere höherstufige Kategorie schon definiert worden sein (wenn z.B. fclass = residential und ref = L 101). Auch für diesen Abgleich wurden SQL-Abfragen genutzt.

Durch SQL-Abfrage wurden alle Straßen aus dem OSM-Datensatz ausgewählt, die in Spalte „ref" nicht als Autobahn, Bundesstraße, Landesstraße/Staatsstraßen oder Kreisstraße gekennzeichnet sind und die den in Klammern aufgeführten Kategorien aus Spalte „fclass" entsprechen. Durch Vergleich mit Gemeindestraßen aus dem Basis-DLM-Datensatz wurde festgestellt, dass nur die hier aufgeführten Kategorien als Gemeindestraßen definiert werden können.

Andere Straßenkategorien aus OSM wie „track", „track_grade1", „trunk", „trunk_link" usw. wiesen keine oder nur eine sehr geringe Übereinstimmung mit den Gemeindestraßen aus Basis-DLM. Lediglich die Kategorie „service" wies eine etwas höhere Übereinstimmung auf, jedoch mit vielen Abzweigungen, die eher den Kategorien „Attribut trifft nicht zu" und „Ax_Platz" aus Basis-DLM entsprechen. Die Kategorie „service" wurde in Zusammenhang mit Parkplätzen separat betrachtet.

Um die einzelnen neu definierten Straßenkategorien einzeln auswählbar zu machen, wurde eine Spalte „Straßenkategorien" in die neue Datei angelegt. In dieser Spalte sind die neuen Kategorisierungen enthalten, welche den Basis-DLM Kategorien entsprechen (Abbildung 12).

Abbildung 14: Straßenkategorie "track", OSM | Abbildung 15: Straßenkat. "track_grade1", OSM

Nach der Definierung der Straßenkategorien war es notwendig, das Verkehrsaufkommen, welches aus unterschiedlichen Quellen und in unterschiedlichen Formen vorliegt, den neu definierten Straßenkategorien hinzuzufügen. Folgende Schwierigkeiten traten dabei auf:

- keine räumliche Übereinstimmung der OSM-Daten und der vorliegenden Datenquelle,
- die Abschnittslänge der Polylinien in der vorhandenen Datenquelle gleicht nicht der Abschnittslänge der Polylinien im OSM-Datensatz (Abbildung 16),
- durch die fehlende räumliche Übereinstimmung kommt es im Bereich von Kreuzungen zu fehlerhaften Zuordnungen.

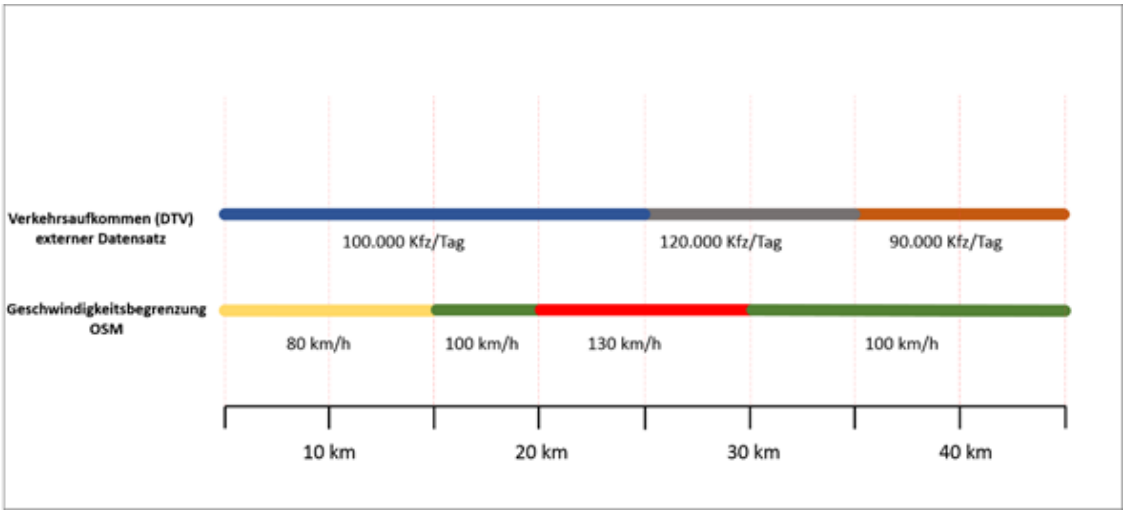


Abbildung 16: Beispiel unterschiedlicher Abschnittslängen verschiedener Attribute (eigene Darstellung)

Durch die fehlende räumliche Übereinstimmung und unterschiedliche Abschnittslängen der zugeordneten Attribute war eine direkte genaue Übernahme der Verkehrswerte nicht möglich. Da u.a. die Geschwindigkeitsbegrenzungen als wichtiger Eingangsparameter für die Ausbreitungsmodellierung zu erhalten sind, mussten die Verkehrswerte den Abschnittslängen der Geschwindigkeitsbegrenzungen zugeteilt werden. Die Übernahme erfolgt in GIS mittels Kombinationen aus räumlichen Verbindungen und Attributabgleichen. Mit dem Modell 03 (Abbildung 17) können Verkehrswerte den OSM-Daten zugeführt werden.

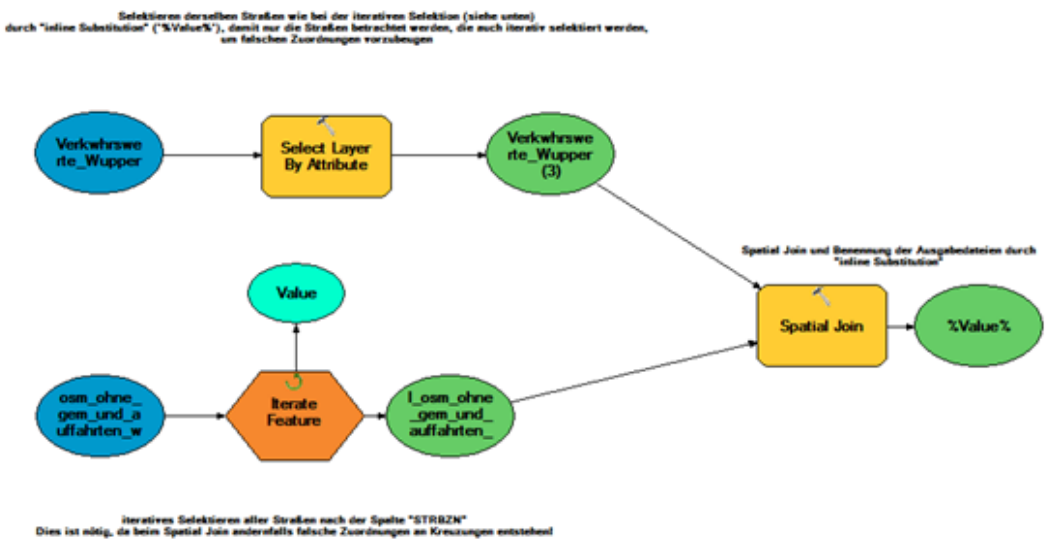


Abbildung 17: Modell 03 Spatial Join by Attribute Matching

Nach Durchführung des Modells ist im Feature-Dataset zu jeder Straßenbezeichnung eine eigene Feature Class zu finden. Anschließend wurden die einzelnen Straßen wieder in einem Datensatz zusammengeführt (Abbildung 18).

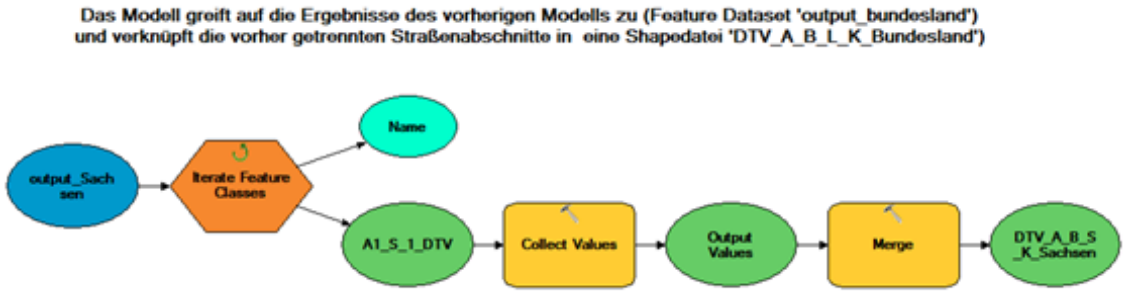


Abbildung 18: Modell 04: Zusammenführen der getrennten Straßen zu einem Datensatz

II.1.2.4 DTV Modellierung (Modelle 5-13)

Im OSM-Datensatz sind die Autobahnen zweispurig digitalisiert, während im Verkehrswerte-Datensatz nur eine Straßenlinie vorliegt. Bei der Übernahme der DTVs aus dem Verkehrswerte-Datensatz wird bei den Autobahnspuren des OSM-Datensatzes die gesamte Verkehrsstärke beider Linien zusammengeführt. Da jede Fahrtrichtung im OSM-Datensatz oft verschiedene Geschwindigkeitsbegrenzungen aufweist, konnten die Spuren nicht zu einer zusammengefasst werden. In Modell 05 (Abbildung 19) wurden die DTVs daher halbiert, so dass der gesamte DTV aus dem Verkehrswerte-Datensatz auf beide Spuren des OSM-Datensatzes aufgeteilt wurde.

Es war notwendig, bei allen Bundesländern zu überprüfen, ob Autobahnen in Verkehrswerte-Datensätzen ein- oder zweispurig vorhanden sind. In Berlin z. B. wurde die Autobahn auch für den Verkehrswerte-Datensatz zweispurig digitalisiert. Eine Halbierung war nicht mehr erforderlich.

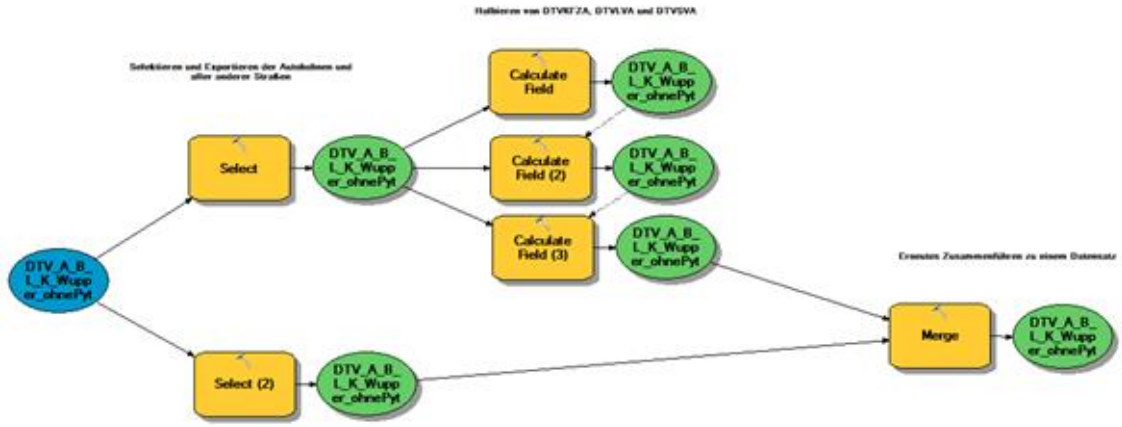


Abbildung 19: Modell 05 Halbierung der Autobahnen

In den vorherigen Schritten wurden Knotenpunkte und Anschlussstellen außer Acht gelassen. Um für diese Straßenkategorien Verkehrsstärken abzuleiten, wurden zunächst für alle Anschlussstellen in einer separaten Feature Class erstellt. Diese wurde verwendet, um die Verkehrsstärken separat zu interpolieren und später mit den anderen Daten zu vereinen. Die einzelnen Straßensegmente wurden zunächst verbunden, damit zusammenhängende Straßen auch eine einheitliche Verkehrsstärke aufweisen. Im nächsten Schritt wurden die verbundenen Linien in Punkte überführt, um später Werte aus Rasterdaten zu beziehen. Als Interpolationsmethode wurde die „Kriging"-Methode gewählt. Im Gegensatz zu anderen Methoden wird bei der Kriging-Methode auch die räumliche Verteilung analysiert und mitbeachtet. In den Ergebnissen wurde eine Abweichung von maximal 30 % zu den gemessenen Verkehrsstärken festgestellt.

Aufgrund der Geschwindigkeitsbegrenzungen, die in den OSM-Daten vorhanden sind, müssen die Werte von den verbundenen Linien der Knotenpunkte auf die Ausgangslinien übertragen werden. Dadurch können die Geschwindigkeitsbegrenzungen, wie in Abbildung 16 gezeigt, erhalten bleiben. Das Modell 06 ist in Abbildung 20 dargestellt.

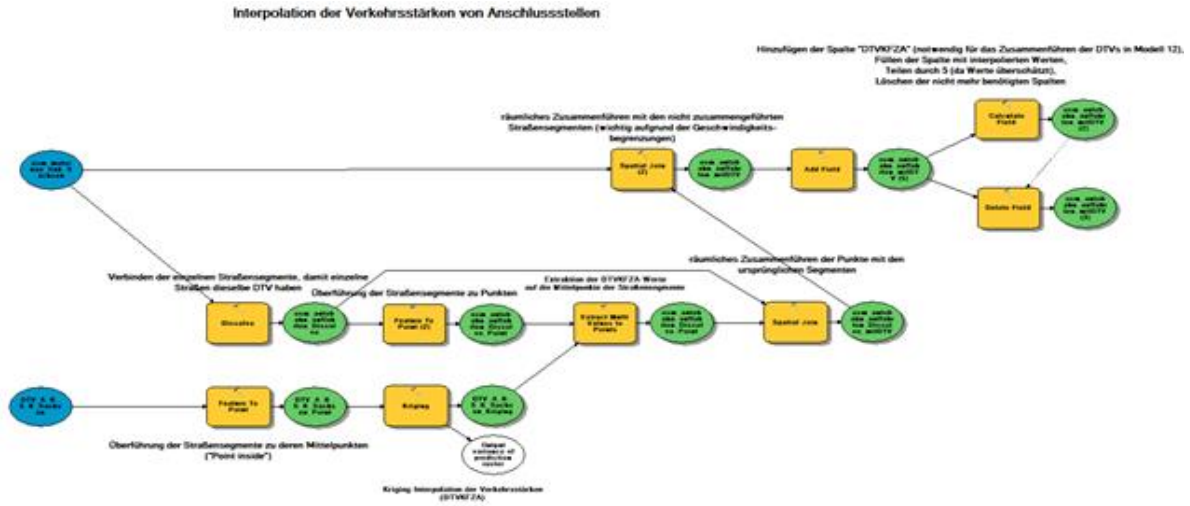


Abbildung 20: Modell 06 Interpolation der Verkehrsstärken von Anschlussstelle

Unter der Kategorie „service" (fclass) des OSM-Datensatzes werden Zufahrtswege beschrieben. Dies können Wege zu Gebäuden aller Art sein, wie z. B. Tankstellen, Strände, Campingplätze, Industriegebiete, Gewerbegebiete und Parkplätze. In Bezug auf Parkplätze wurden die Fahrgassen

auf einem Parkplatz digitalisiert. In Modell 07 wurde die Verkehrsstärke auf Grundlage der Parkplätze, angelehnt an §125 SBauVO (Sonderbauverordnung – Einstellplätze und Fahrgassen), berechnet. Für Zufahrtswege wurde die Verkehrsstärke auf derselben Grundlage berechnet. Ausgehend von der Annahme, dass die Parkplätze beim Bau an der zu erwartenden Verkehrsstärke bemessen wurden, werden die Werte mit keinen Fahrzeugbewegungen multipliziert.

Mit dieser Vorgehensweise wurde für Parkplätze und Zufahrten eine repräsentative Verkehrsstärke ermittelt. Im OSM-Service-Datensatz sind auch Wege um Seen sowie Zugänge zu Bauten vorhanden. Da auf diesen längeren Zufahrtswegen kaum Autos fahren, werden alle Service-Straßen, die länger als 500 m sind, aus der Betrachtung ausgeschlossen. Der Berechnungsvorgang ist in Abbildung 21 dargestellt.

Im letzten Schritt wurden alle Straßen selektiert, die sich mit Gewerbegebieten schneiden und nach der Parkplatzlärmstudie frequentiert. Einige, längere Zufahrtsstraßen werden auch mit diesem Vorgehen überschätzt, sind allerdings nur selten vorhanden. Im Einzugsgebiet der Wupper z. B. machen derartige Straßen weniger als 1 % des „service"-Datensatzes aus.

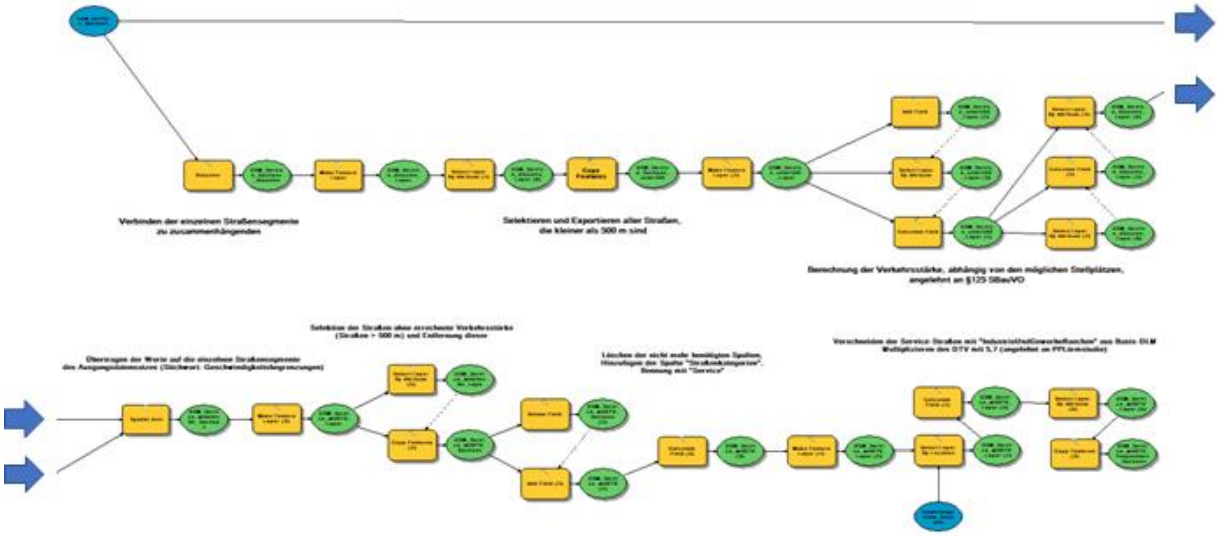


Abbildung 21: Modell 07 Teil 1 und Teil 2 OSM-Service-Straßen

Mit Daten aus Verkehrszählungen allein kann kein Flächendeckendes Geschehen des Verkehrsaufkommens abgebildet werden. Für eine stadtübergreifende Ausbreitungsmodellierung von Reifenabrieb, sind diese Verkehrswerte bei weitem nicht ausreichend. Daher mussten vor allem für Gemeindestraßen umfassende Modellierungen vorgenommen werden. Gemeindestraßen nehmen den größten Anteil des Straßennetzes ein. Hiermit wird die Notwendigkeit verdeutlicht, geeignete Abschätzungsmethoden anzuwenden, welche versuchen das Verkehrsaufkommen auf Gemeindestraßen mittels plausibler Annahmen und empirischer Erhebungen über das Mobilitätsverhalten der Bevölkerung zu definieren. Die Abschätzungen der Verkehrsstärken für Misch-, Wohn- und Gewerbegebiete erfolgte in Anlehnung an „Hinweise zur Schätzung des Verkehrsaufkommens von Gebietstypen" (FGSV, 2006). Von zentraler Bedeutung für das Verkehrsaufkommen ist in diesem Sinne die Zahl der Personen, die ein bestimmtes Gebiet nutzen und durch verschiedene Aktivitäten die an verschiedenen Orten stattfinden Verkehr erzeugen [Hero-2018].

Für die Abschätzung des Verkehrsaufkommens auf Gemeindestraßen, die sich innerhalb von Wohngebieten befinden bzw. diese erschließen ist die Ermittlung der Zahl der Einwohner ausschlaggebend. Für diesen Zweck wurden Geodaten der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder über die Bevölkerung verwendet.

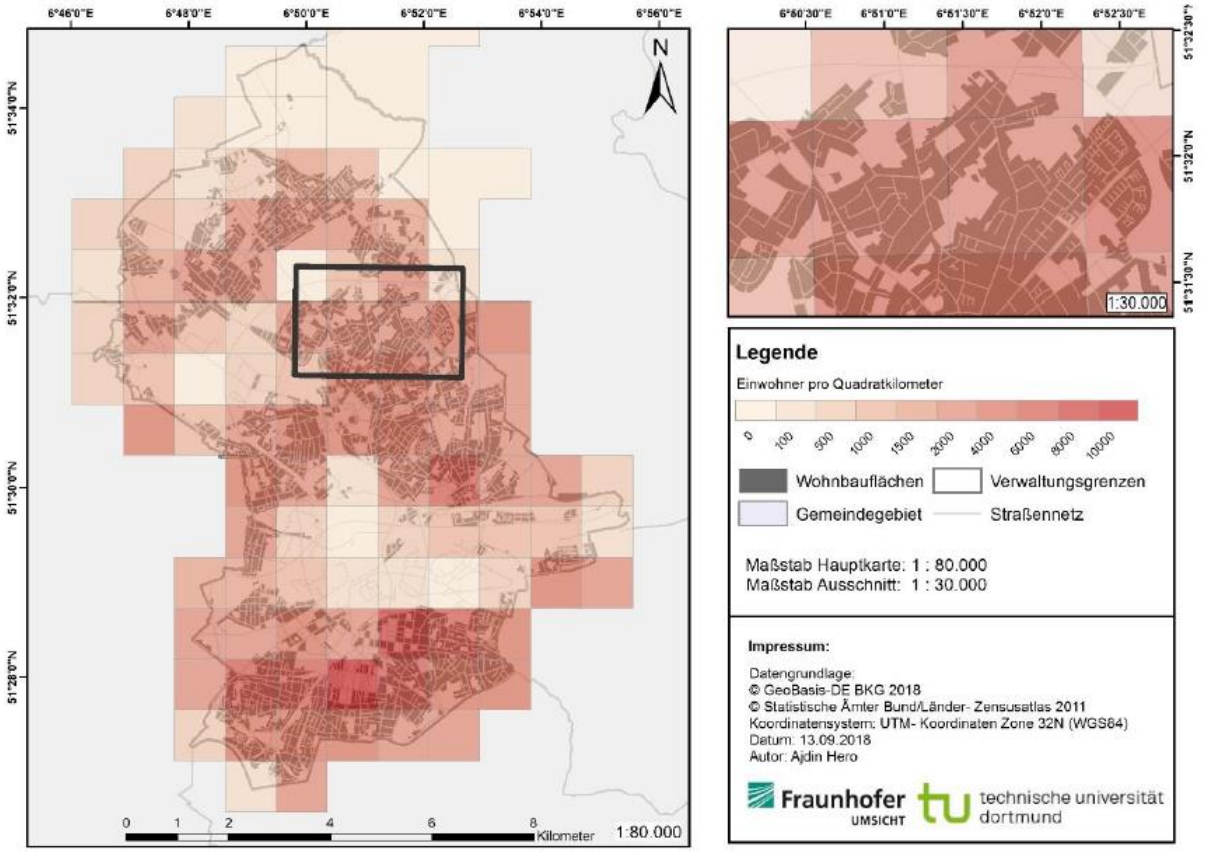


Abbildung 22: Abschätzung des Verkehrsaufkommens in Wohngebieten durch die Identifizierung der Einwohnerzahl

Anders als in Wohngebieten, ist die bestimmende Schüsselgröße für die Abschätzung des Verkehrsaufkommens bei gewerblich genutzten Flächen die Anzahl der Beschäftigten. Aus dieser Schlüsselgröße kann im weiteren Verlauf der Beschäftigten-, Besucher- und Geschäftsverkehr sowie der Lkw-Verkehr abgeschätzt werden.

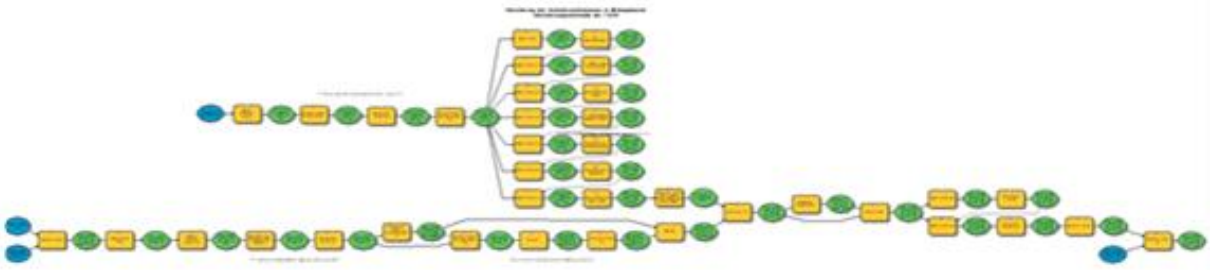


Abbildung 23: Modell 08 Abschätzung Wohngebiete, Modelle 9-11 zur Abschätzung Gewerbegebiete und Mischgebiete sind ähnlich aufgebaut

Die Verkehrserzeugung in Mischgebieten ist neben dem Bewohnerverkehr, durch den Kunden- und Beschäftigtenverkehr der in den Einzelhandelsbetrieben arbeitenden und einkaufenden Menschen gekennzeichnet. Die Abschätzung der Verkehrsstärken innerhalb von Mischgebieten setzt voraus, dass Daten über die einzelnen Dienstleistungsbetriebe vorhanden sind und die Geschossfläche oder Verkaufsfläche bekannt sind. In diesem Fall wurden die Dienstleistungsbetriebe aus den OSM-Daten, die in Tabelle 2 aufgeführt sind übernommen. Neben der Art der Dienstleistung

ist auch die Brutto-Grundfläche oder Verkaufsflächen notwendig, um eine sinnvolle Abschätzung durchzuführen. In diesem Sinne wurden Hausumringe herangezogen.

Tabelle 2: Zuordnung der OSM-Klassen den einzelnen Dienstleistungssektoren (Ausschnitt)

Shapedatei	fclass	Bedeutung
gis_osm_pois_a_free.shp	mall	Einkaufszentrum
	supermarket	Supermarkt/Discounter
	beverages	
	doityourself	Baumarkt
	chemist	Verbrauchermärkte
	clothes	
	shoe_shop	
	sports_shop	
	bicycle_shop	
	toy_shop	
	bookshop	
	outdoor_shop	
	beauty_shop	Kleinflächiger Einzelhandel
	computer_shop	
	convenience	
	florist	
	gift_shop	
	greengrocer	
	jeweler	
	kiosk	
	mobile_phone_shop	
	stationery	
	restaurant	Restaurant
	department_store	Warenhaus

Zuletzt dient Modell 12 dem Zusammenführen der erstellten Feature Classes zu einer finalen Feature Class, die alle Straßenkategorien, die betrachtet wurden, enthält.

In der finalen Feature Class waren für alle Straßen tägliche Verkehrsstärken vorhanden (DTV). Allerdings wiesen einige Straßen noch keinen Wert für den Leicht- bzw. Schwerverkehrsanteil auf. Mit Modell 13 (Abbildung 24) sollten die fehlenden Werte aufgefüllt werden. Zur Durchführung wurden alle Straßenkategorien (Autobahn, Landstraße, Kreisstraße, Gemeindestraße usw.) separat betrachtet, so dass für jede Kategorie aus den vorhandenen Anteilen ein Durchschnittswert bestimmt werden konnte, der zur Berechnung der fehlenden Werte verwendet wird.

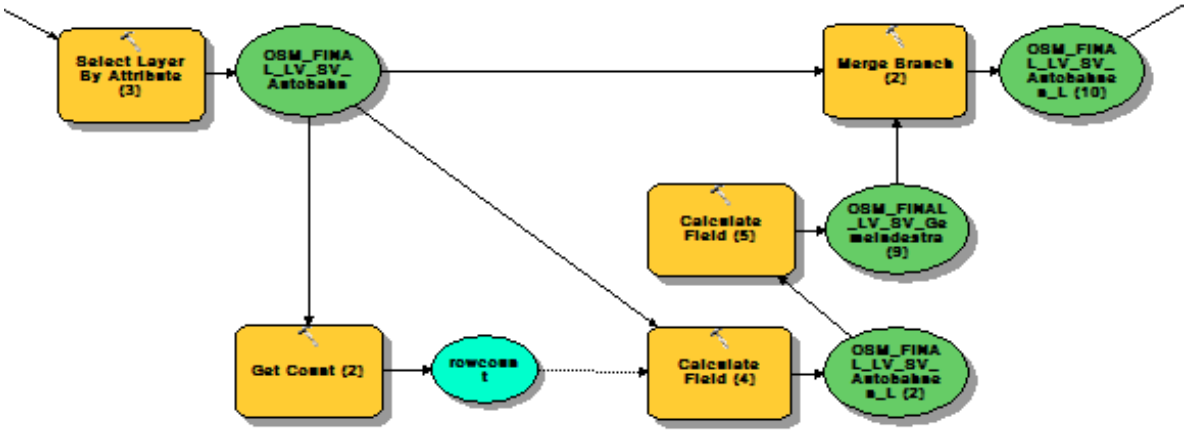


Abbildung 24: „If selection exists-Branch“ in Modell 13

Die Ermittlung der Verkehrsstärken durch vorhandene Datensätze, ergänzende Quellen und durch die Abschätzung in Wohn-, Gewerbe- und Mischgebieten kann als realitätsnahe Beschreibung potenzieller Verkehrsverhältnisse angesehen werden, zumal bei fehlenden Datengrundlagen keine andere Möglichkeit besteht. Die ermittelten Verkehrsmengen bilden somit eine wichtige Quelle für die Ausbreitungsmodellierung.

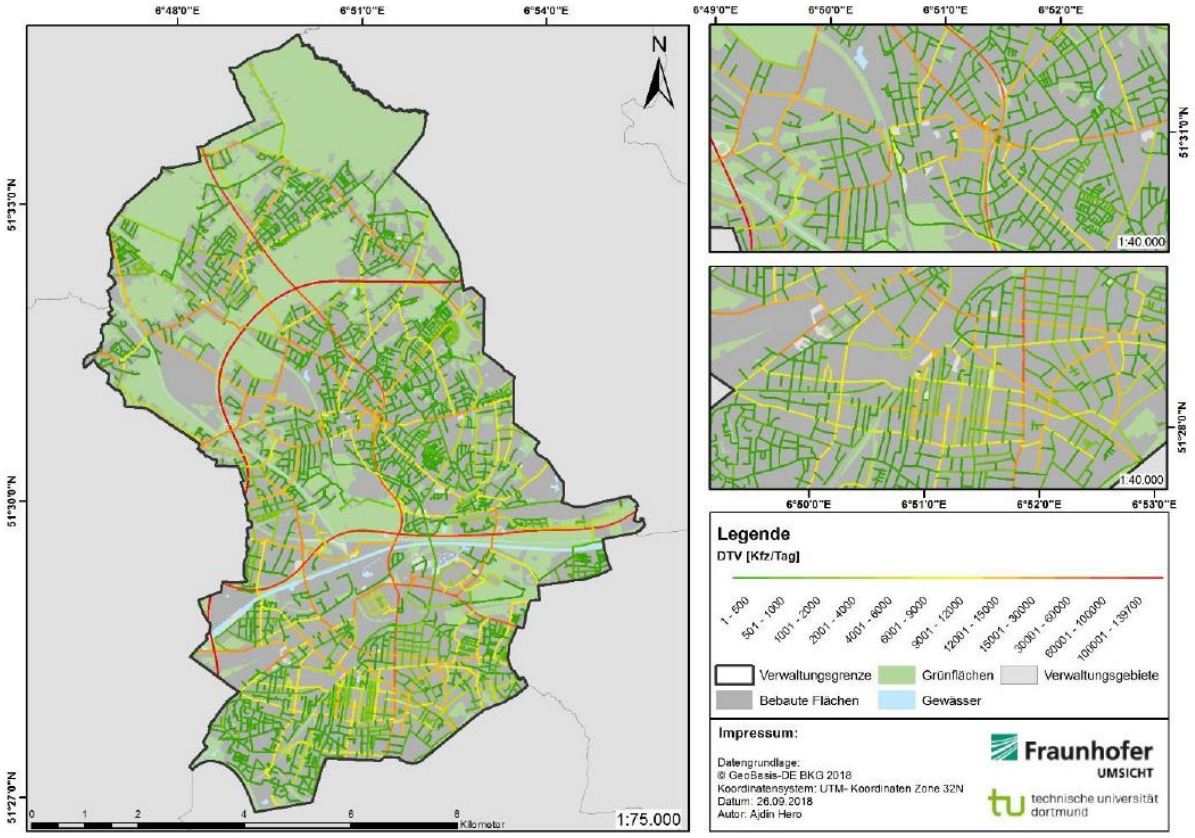


Abbildung 25: Verkehrsstärkenkarte am Beispiel von Oberhausen [Hero-2018]

II.1.2.5 Ergänzung relevanter Attributierungen des Straßendatensatzes für die Modellierung des Reifenabriebs (Modelle 14-18)

Neben den Verkehrsstärken sind weitere Attributierungen des Straßendatensatzes als Eingangsparameter für die Abriebsmodellierung berechnet worden.

Durch Bremsen entsteht ein höherer Reifenabrieb. Daher ist es notwendig, Kreuzungen zu identifizieren und Bremszonen abzuleiten. Das Modell erstellte eine neue Spalte, die angibt, ob an diesem Straßensegment eine „normale Bremsung" stattfindet oder nicht („ja" / „nein"). Dazu wurden, wenn nötig, auch die vorhandenen Straßensegmente in noch genauere, kleinere Segmente zugeschnitten. Autobahnanschlussstellen wurden nicht mitbetrachtet. Auch Straßen, die der Kategorie „service" zugeordnet sind, wurden separat betrachtet, da angenommen wurde, dass alle anderen Straßen im Bezug zu „Service-Straßen" Vorfahrtsstraßen sind und keine Bremsung durch „Service-Kreuzungen" stattfindet. Vor der eigentlichen Berechnung mussten zunächst Kreuzungen identifiziert werden, um anschließend unter Zuhilfenahme der jeweils zulässigen Höchstgeschwindigkeiten für jedes Straßensegment an Kreuzungen Bremszonen zu identifizieren.

Auch die Straßenneigung von einzelnen Straßensegmenten ist eine für die Abriebsberechnung relevante Information (Modell 15). Vor der eigentlichen Berechnung der Straßenneigung mussten Kurven identifiziert und dementsprechend geteilt werden, um einen Radius zu berechnen. Durch die Betrachtung von kleineren Straßensegmenten waren die berechneten Neigungen, basierend auf einem digitalen Geländemodell (DGM), auch genauer. Die Berechnung der Neigung erfolgte über mehrere Schritte, auf Basis des digitalen Geländemodells (DGM) für Deutschland und dem Straßennetz.

Für die anschließende Radiusberechnung mussten drei Bekannten, Anfangspunkt (x1, y1), Mittelpunkt (x2, y2) und Endpunkt (x3, y3) einer Kurve bestimmt werden. Das in Abbildung 26 dargestellte Modell wurde hierfür im GIS integriert.

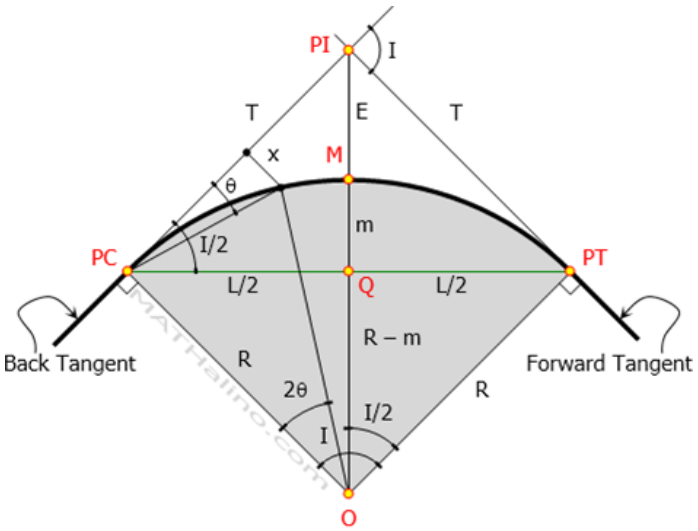


Abbildung 26: Visuelle Darstellung der Elemente einer horizontalen Kurve

Da die Menge des Abriebs auch von der jeweiligen Fahrbahnfeuchte abhängig ist, wurde mit dem Trockenheitsindex (dMI) ein Wert für die Straßensegmente berechnet, um innerhalb Deutschlands eine Differenzierung im Modell abbilden zu können. Die Rasterdaten des Trockenheitsindexes können frei vom DWD als ASCII-Rasterdatensatz für ganz Deutschland bezogen werden. Es wurde der Datensatz mit dem 30jährigen Mittel (1981-2010) verwendet. In Modell 18 wurde jedes Straßensegment mit einem dMI-Wert verschnitten (Abbildung 27).

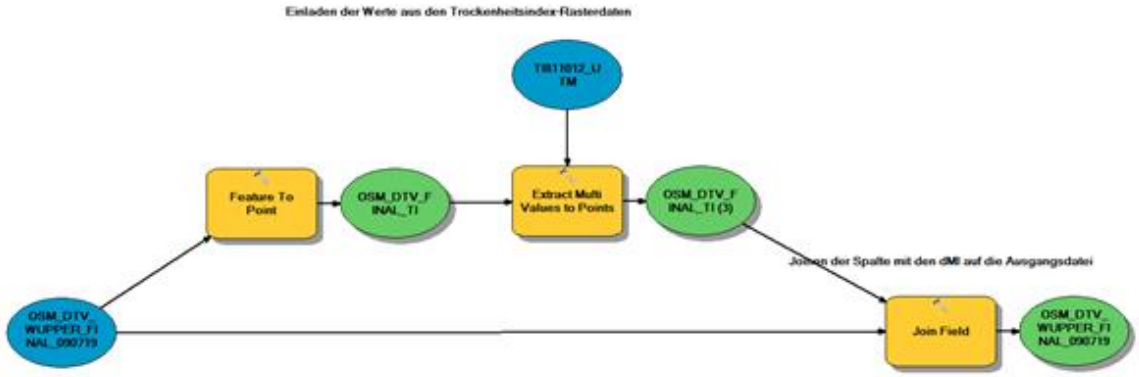


Abbildung 27: Modell 17: Einladen der dMI-Werte aus den Rasterdaten

Abschließend wurden im Modell 18 Sonderzeichen und Umlaute ersetzt. Das Ersetzen erfolgte auf Basis einer Python-Expression mit Unicodes. Im Ergebnis wurden nachfolgende Attribute je Straßenabschnitt im GIS hinterlegt.

Tabelle 3: Finale Tabelle mit Attributen des Straßendatensatzes

Attribut	Beschreibung
OBJECTID	ID (laufende Nummer) des Straßenabschnitts
osm_id	ID, die im ursprünglichen OSM Datensatz vergeben wurde
code	Numerischer Code der Straßenklassifizierung (=fclass)
fclass	Straßenklassifizierung aus OSM (motorway, residential …)
Name	Straßenname
ref	Referenznummer (A40, L224 …)
oneway	"F" nur in eine Richtung befahrbar, "T" nur in Gegenrichtung des Linienverlaufs befahrbar (sehr selten), „B" in beide Richtungen befahrbar
maxspeed	maximal erlaubte Geschwindigkeit in km/h
layer	relative Fahrbahnebene (-5, …0… ,5)
bridge	verläuft die Straße auf eine Brücke? „t"=True, „F" = false
tunnel	verläuft die Straße in einem Tunnel? „t"=True, „F" = false
Straßenkategorie	Straßenklassifizierung aus Basis-DLM
gridcode	Zellenwerte des Eingabe-Rasters (das ehem. Feld VALUE)
DTVLVA	Anzahl Fahrzeuge Leichtverkehr
DTVSVA	Anzahl Fahrzeuge Schwerverkehr
DTVKFZA	Gesamte Anzahl Fahrzeuge pro Straßenabschnitt
STRBEZ	Abkürzung von Straßenname; z.B. B229
STRKL	Abkürzung von Straßenkategorie; z.B. B
STRNR	Abkürzung von Straßennummer; z.B. 229
Bremsung	Attribute „ja", „nein": Ist der Straßenabschnitt Teil einer Bremszone in Kreuzungsnähe
Neigung_Prozent	Prozent Neigung des Abschnitts in Prozent
Neigung_Grad	Grad
RadiusM	Krümmung des Straßenabschnitts
dMI	Trockenheitsindex nach de Martonne, dMI = P/(T+10), Einheit: mm/°C
Shape_Length	Länge des Straßenabschnitts in Meter

II.1.3 Probabilistisches Modell | TWM-Modell Part II

Unter dem Begriff probabilistisch werden in der Literatur verschiedene Ansätze verwendet; z.B. Monte-Carlo Simulationen. Das Projektteam von **Fraunhofer UMSICHT**, das mit Unterstützung von SIEKER (Einzugsgebiet Panke) das probabilistische Modell entwickelt hat, verstand darunter in diesem Forschungsprojekt, dass die gesamte Menge Reifenabrieb relativ genau aus den Verkaufsmengen der Reifen oder aus durchschnittlichen Laufleistungen bekannt ist. Aus *Verteilungen* für Verkehr, Fahrsituation, Wetter, Straßenbelag usw. und Modellen, die den wahrscheinlichen Reifenabrieb über physikalisch-empirische Relationen mit der dortigen Fahrsituation verknüpfen, wurden jedem Straßenabschnitt Reifenabriebsintensitäten zugeordnet.

In dem Projekt wurden durchschnittliche Abriebsraten von

- 110 mg/km für PKW und
- 900 mg/km für LKW

angesetzt. Dies führte, mit den bekannten Laufleistungen der einzelnen Fahrzeugkategorien zu Gesamtabriebsmengen von

- 64208 to/a für PKW
- 53682 to/a für LKW,

die in guter Übereinstimmung mit Daten aus der Literatur liegen, z. B. [Essel et al.-2015: 111 000 to/a], [Kocher-2010: 128 094 to/a]. Ziel des Modells war es also, nicht die Gesamtmengen zu errechnen, sondern die bekannte Gesamtmenge auf die einzelnen Straßenabschnitte aufzuteilen.

Der individuelle Verschleiß wird unter anderem durch folgende Faktoren beeinflusst: Luftdruck im Reifen, (verstellte) Achsgeometrie, individueller Fahrstil, Reifenfabrikat. Solche individuellen Faktoren wurden in diesem Modell nicht berücksichtigt, da nur das Kollektiv der gesamten Fahrzeugflotte betrachtet wurde, so dass die individuellen Unterschiede im Mittelwert aufgehen.

Das Modell wurde als ein eigenständiges Python Programm realisiert. Die Kommunikation mit der GIS Software (Ein- und Ausgabe) erfolgte über CSV Dateien und eine eindeutige Object-ID für jeden Straßenabschnitt. Dies hatte den Vorteil, dass sehr schnell Kalibrierungs-Berechnungen für das gesamte Bundesgebiet durchgeführt wurden konnten; die Laufzeit auf einem „Büro-PC" betrug nur ca. 15 min; der Speicherbedarf war minimal (einige MB), da die Datensätze der Straßenabschnitte einzeln bearbeitet wurden. Allerdings mussten die Daten für die Visualisierung nach jeder Modifikation immer wieder in das GIS eingelesen werden.

II.1.3.1 Eingabevariablen, Standardwerte, und Einheiten

Die verwendeten Variablen sowie Eingabe- und Standardwerte für das Programm sind in Tabelle 4 dargestellt. In der Regel wurden SI-Einheiten verwendet. Bei Abweichungen wird darauf hingewiesen; z.B. *Fahrzeuge pro Tag*, *Jahrestonnen.*

Tabelle 4: Verwendete Formelzeichen und Standardwerte.

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit	Wert LVA	Wert SVA
$a_{fliehmax}$	Max. Querbeschleunigung. Innerorts Außerorts	m/s²	 0,2 0,1	 0,2 0,1
F_{Luft}	Kraft durch Luftwiderstand	N	-	-
F_{Roll}	Kraft durch Rollwiderstand	N	-	-
F_{Neig}	Kraft durch Straßenneigung	N	-	-
F_{Quer}	Querkraft durch Straßen-querneigung	N		
F_{Flieh}	Fliehkraft bei Kurvenfahrt	N		
M	Masse des Fahrzeugs	kg	1400	7500
G	Erdbeschleunigung	m/s²	9,81	9,81
r	Radius der Straße	m	-	-
V	Geschwindigkeit	m/s	-	-
W_{Luft}	Luftwiderstandskennwert	N/(m/s)²	0,534	5
W_{Neig}	Längsneigung der Straße	%	-	-
W_{Quer}	Querneigung der Straße	%	0,015	0,015
W_{Roll}	Rollwiderstandsbeiwert	%	0,01	0,01

II.1.3.2 Korrigieren von Eingabewerten außerhalb des Wertebereichs

Die Eingabewerte für Verkehr, Steigung, Geschwindigkeit wurden von dem GIS System bereitgestellt. Einige der Werte mussten allerdings angepasst werden. Es wurden 2 Fälle unterschieden:

- Die Werte mussten auf ihre Plausibilität geprüft werden und gegebenenfalls auf Standardwerte zurückgesetzt werden, da die sie auf Artefakte in den GIS Modellen zurückgehen.
- Einige Werte wurden an die Fahrsituation angepasst.

Die Details ergeben sich aus den folgenden Darstellungen.

Geschwindigkeit

Üblicherweise fahren die Fahrzeuge mit der maximal erlaubten Geschwindigkeit. Diese wurde gegebenenfalls so reduziert, dass eine maximale Fliehkraft nicht überschritten wurde, da dies für die Insassen als unkomfortabel wahrgenommen wird. Die maximale Fliehkraft innerorts wurde höher angesetzt als außerorts, da innerorts engere Kurvenradien gefahren werden. Allerdings wurden Autobahnen, die innerorts liegen, wie außerorts gerechnet.

Die maximal erlaubte Kurvengeschwindigkeit beträgt:

$$V_{max} = \sqrt{a_{fliehmax} r};$$

die Geschwindigkeit wurde gegebenenfalls auf diesen Wert reduziert.

LKWs haben auf einigen Straßen abweichende Höchstgeschwindigkeiten: Deshalb wurde deren Geschwindigkeit zunächst auf Autobahnen auf 80 km/h und Landstraßen auf 60 km/h gesetzt und dann gegebenenfalls zusätzlich weiter auf die maximale Kurvengeschwindigkeit reduziert.

Radien

Radien unter 5 m ergeben auf normalen Straßen keinen Sinn und weisen auf Artefakte hin. Diese Radien wurden auf unendlich gesetzt, d.h. die Streckenabschnitte wurden als gerade betrachtet.

Steigungen

Steigungen wurden auf 10 % limitiert. Höhere Steigungen sind meist Artefakte des Modells.

II.1.3.3 Berechnung der Einzelkräfte

Widerstandskraft durch Luftreibung

Der Luftwiderstand berechnet sich nach:

$$F_{Luft} = \frac{\rho}{2} c_w A\, V^2$$

Hierbei bezeichnet ϱ die Dichte der Luft, c_w den Luftwiderstandsbeiwert und A die Stirnfläche des Fahrzeugs. Die Konstanten wurden zusammengefasst zu W_{Luft} und an experimentelle Werte angepasst (für PKW: Opel Zafira: Leistungsbedarf 100 kW@ 200 km/h). Der Wert für LKW wurde auf ca. den 10-fachen Wert gesetzt.

$$F_{Luft} = W_{Luft}\, V^2$$

Der Luftwiderstand ist der einzige Widerstand, der nicht die Fahrzeugmasse enthält.

Rollwiderstand

Der Rollwiderstand wurde als Faktor von der Gesamtmasse bzw. von der Gewichtskraft angenommen. Ein typischer Wert ist 1 %.

$$F_{Roll} = W_{Roll}\, m\, g$$

Längskraft aufgrund von Steigung und Gefälle

Diese Kraft lässt sich bei kleinen Winkeln angenähert direkt aus dem Wert der Neigung - angegeben als dezimaler Faktor - und der Gewichtskraft berechnen.

$$F_{Neig} = W_{neig} m\, g$$

Fliehkraft aufgrund von Kurvenfahrt

$$F_{Flieh} = m\, \frac{V^2}{r}$$

Die Geschwindigkeit wurde so begrenzt, dass eine maximale Kurvenbeschleunigung nicht überschritten wird (s.o.).

Querkraft aus Straßenquerneigung

Die Querkraft [Pohrt-2019a] aufgrund von Straßenneigung muss vom Fahrzeug ständig ausgeglichen werden. Die Querneigung wurde als dezimaler Faktor zur Gewichtskraft des Fahrzeugs angegeben.

$$F_{Quer} = W_{quer} m\ g$$

II.1.3.4 Berechnung der Summenkräfte

Die Kräfte gliedern sich in Längskräfte

- Luftwiderstand
- Steigung / Gefälle
- Rollwiderstand

und Querkräfte

- Querneigung der Straße
- Fliehkraft aus Kurvenfahrt

Die Längs- und Querkräfte wurden zunächst unabhängig voneinander addiert. Hierbei war zu beachten, dass die Kräfte sich gegebenenfalls verstärken oder gegenseitig vermindern.

Aus den vorliegenden Daten konnte nicht immer auf die Richtung der Kraft geschlossen werden, so dass Annahmen getroffen wurden.

Längskraft

Bei der Längskraft mussten Steigung und Gefälle unterschieden werden. Die Längskraft kann auf Gefällestrecken negativ werden; dies ist für den Reifenabrieb unerheblich; deshalb wurde der Betrag gebildet.

$$F_{längs,auf} = F_{Roll} + F_{Luft} + F_{Steig}$$

$$F_{längs,ab} = ABS\left(F_{Roll} + F_{Luft} - F_{Steig}\right)$$

Die Verkehrsdaten sind immer auf beide Fahrtrichtungen bezogen. Es wurde davon ausgegangen, dass sich im Tagesmittel der Verkehr gleichmäßig auf beide Fahrrichtungen aufteilt. Da der Zusammenhang zwischen Kraft und Reifenabrieb nicht linear ist, ist eine Aufteilung der Kräfte nötig, weil sich die auf- und abwärts gerichteten Beiträge nicht gegenseitig aufheben.

Bei Einbahnstraßen liegen keine Informationen über die Richtung vor, deshalb wurde immer „aufwärts“ gerechnet.

Querkraft

Auch bei der Querkraft ergaben sich unterschiedliche Fälle, je nachdem, ob die Kräfte aus Querneigung und die Fliehkraft gleich oder gegensinnig wirkten.

Bei Geschwindigkeiten kleiner 60 km/h - überwiegend innerorts - wurde davon ausgegangen, dass die Straßen von der Mitte zu beiden Seiten abfallen, d.h. dass 50 % des Verkehrs gleichsinnige Kräfte erfährt und 50 % gegensinnige.

$$F_{quer,gleich} = F_{kurve} + F_{Quer}$$

$$F_{quer,gegen} = F_{kurve} - F_{Quer}$$

Bei Geschwindigkeiten größer 60 km/h - außerorts und auf Autobahnen - wurde davon ausgegangen, dass alle Kurven überhöht gebaut werden, d.h. Fliehkraft und Querkraft sind entgegengesetzt gerichtet. Dies verminderte den errechneten Reifenabrieb erheblich.

$$F_{quer,gegen} = F_{kurve} - F_{Quer}$$

II.1.3.5 Berechnung des Reifenabriebs

Der Reifenabrieb wächst überproportional mit dem Anwachsen der Kräfte. Je nach Straßenbelag ergeben sich Abhängigkeiten von $F^{1,5}$ bis F^4 (siehe Kap. I.4.2). In dem Grundmodell wurde ein Exponent von 2 gesetzt.

Bei der Belastung wirken sich Querkräfte wesentlich schleißender aus als Längskräfte. Hier wurde ein Faktor q=7 gewählt [Veith-1992].

Aus beiden Kräften wurden die Verschleißintensitäten getrennt berechnet und anschließend addiert.

So wurden für die verschiedenen Fahrsituationen entsprechend der Streckensegmente im GIS-System verschiedene relative Verschleißintensitäten berechnet. Diese Intensitäten wurden dann durch einen für alle Straßen gleichen Kalibrierungsfaktor *k* so angepasst, dass sich im Bundesmittel die vorab gewählten durchschnittlichen Intensitäten ergaben (s.o.). Die Anpassung erfolgte getrennt für PKW- und LKW-Verkehr. Es wurden auch die Abriebsmengen berücksichtigt, die an Kreuzungen durch Start/Stopp und Abbiegen entstehen (s.u.).

Die streckenbezogene Verschleißintensität eines Streckenabschnitts ergibt sich aus:

$$I_{TWP} = k\ \left(\frac{1}{2}\left(F^p_{längs,auf} + F^p_{längs,ab}\right) + \frac{1}{2}q\left(F^p_{quer_gleich} + F^p_{quer_gegen}\right)\right) \quad \text{v< 60 km/h}$$

$$I_{TWP} = k\ \left(\frac{1}{2}\left(F^p_{längs,auf} + F^p_{längs,ab}\right) + q\left(F^p_{quer_gegen}\right)\right) \quad \text{v > 60 km/h}$$

Der Faktor ½ resultiert aus der hälftigen Aufteilung der Verkehrsmenge.

Die streckenbezogene, tägliche Menge des Reifenabriebs ergibt sich durch Multiplikation mit der täglichen Verkehrsmenge n_{DTV}.

$$m'_{TWP} = I_{TWP}\, n_{DTV}$$

Die absolute, tägliche Menge des Reifenabriebs für das Streckenstück ergibt sich durch zusätzliche Multiplikation mit der Streckenlänge *L*

$$m_{TWP} = I_{TWP}\, n_{DTV}\, L$$

Berechnung des Reifenabriebs an Kreuzungen

Die Streckenabschnitte vor und nach Kreuzungen wurden zunächst wie „normale" Strecken berechnet (s.o.). Anschließend wurde der Reifenabrieb durch das Anhalten, Beschleunigen sowie Abbiegen berechnet und zu den Standardwerten addiert. Diese Kräfte sind unabhängig von der tatsächlichen Länge des Streckensegments. Dies kann zu künstlichen Überhöhungen führen, die abgefangen werden mussten.

Bremskraft und Beschleunigungskraft

Im GIS wurden vor jeder Kreuzung Streckenabschnitte definiert, in denen das Kreuzungsverhalten stattfindet. Es wurde gesetzt, dass ein bestimmter Anteil Fahrzeug stoppt und die gleich Anzahl Fahrzeuge im Streckenabschnitt wieder beschleunigen muss. Der Wert für die Verzögerung und die Beschleunigung a_{brems} wurde gleich angesetzt.

$$F_{brems} = a_{brems}\, m$$

Bremsweg

Der Bremsweg s_{brems} ändert sich mit der angenommenen Verzögerung. Dieser muss nicht mit der Streckenlänge übereinstimmen.

$$s_{brems} = \frac{1}{2}\frac{V^2}{a_{brems}}$$

Kurvenkraft beim Abbiegen

Die Kurvenkraft ergibt sich aus der in der Kreuzung gefahrenen Geschwindigkeit und dem Kurvenradius. (Alternativ kann auch die maximale Querbeschleunigung festlegt werden.)

$$F_{biege} = m\,\frac{V^2}{r_{kr}}$$

Reifenabrieb durch Kreuzung

Für die Kreuzungen wurde definiert, dass eine bestimmter Anteil k_{stop} Fahrzeuge anhalten (und anfahren) muss und eine weiterer, unabhängiger Anteil k_{biege} abbiegt. Als Abbiegestrecke wurde ein Viertelkreis angenommen. Die absolute, tägliche Menge an Reifenabrieb ergab sich aus:

$$m_{brems} = k\, F_{brems}^{p}\, k_{stop}\, n_{DTV}\; s_{brems}$$

$$m_{biege} = k\, q\, F_{biege}^{p}\, k_{biege}\, n_{DTV}\, \frac{\pi}{2} r_{kr}$$

Berechnung des Gesamtabriebs für den Streckenabschnitt

Der Gesamtabrieb wurde aus den einzelnen Beiträgen addiert

$$m_{TWP,ges} = m_{TWP} + m_{brems} + m_{biege}$$

Um streckenbezogene Werte oder Intensitäten zu erhalten, mussten diese Gesamtwerte durch Streckenlänge bzw. Streckenlänge und Verkehrsmenge geteilt werden (Es wurde also umgekehrt vorgegangen wie bei den normalen Berechnungen.)

II.1.4 TWM-Modell

II.1.4.1 Integration des TWM-Modells

Das probabilistische Modell und das Verkehrsdatenmodell wurden wie nachfolgend beschrieben zu dem TWM-Modell integriert.

In Abstimmung aller Projektpartner wurde eine Grundkonfiguration festgelegt, um konsistente einheitliche Ergebnisse zu erreichen. Die Standardparameter sind in Tabelle 4 dargestellt. Die Auswirkung der einzelnen Parameter auf die Ergebnisse ist in Abschnitt 40 dargelegt.

Diese Berechnungen liegen auch den gezeigten Ergebnissen in den GIS-Darstellungen zu Grunde.

Abbildung 28 (oben) zeigt die mittleren Abriebsintensitäten aufgeteilt nach Bundesländern. In den folgenden Diagrammen wurden die Namen der Bundesländer wegen besserer Übersichtlichkeit abgekürzt dargestellt: BW - Baden Württemberg, BY - Bayern, B – Berlin, BB – Brandenburg, HB – Bremen, HH – Hamburg, HE - Hessen, MVP – Mecklenburg-Vorpommern, NS – Niedersachsen, NRW – Nordrhein-Westfalen, RP – Rheinland-Pfalz, SL – Saarland, S – Sachsen, SA – Sachen Anhalt, SH - Schleswig Holstein, TH - Thüringen, MW für Deutschland). Das Abriebsverhalten zeigte zum Teil je nach Bundesländern deutliche Unterschiede. Bei PKW haben die großen, (flachen), weniger dicht besiedelten Bundesländer BB, MVP, SA etwas unterdurchschnittliche Werte. Die dicht besiedelten Länder HB, SL, NRW und HE wiesen überdurchschnittliche Werte auf. Allerdings waren die ebenfalls dichtbesiedelten Länder HH und B nicht so stark erhöht. Die Abriebswerte für LKW verhielten sich teilweise anders als bei PKW: Hier waren die Bundesländer B, HB, HH, SL, die sehr dicht besiedelt sind, vergleichsweise sehr hoch.

Die bundesweiten Mittelwerte *MW* sind im TWM-Modell gesetzt (110 bzw. 900 mg/km) und das Modell wurde so kalibriert, dass diese Werte erreicht werden.

Die beiden unteren Diagramme in Abbildung 28 zeigen dieselben Daten, allerdings nach den Bereichen BAB, außerorts, innerorts aufgeteilt.

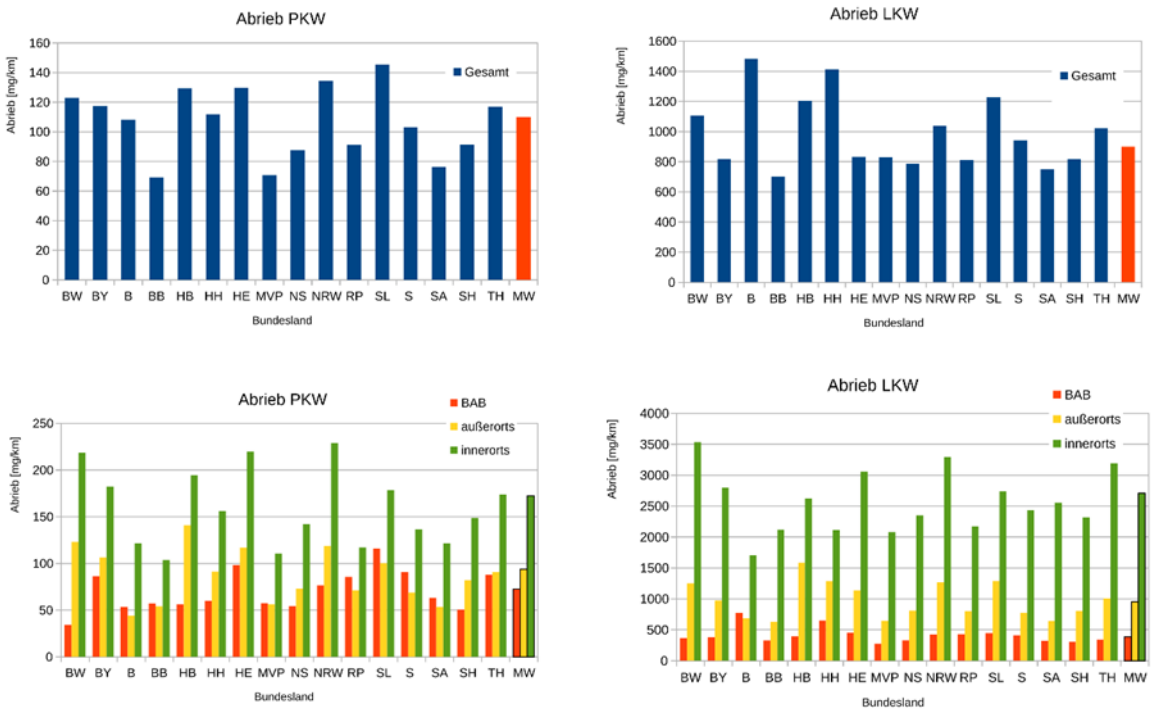


Abbildung 28: Abriebsmengen aufgeteilt nach Bundesländern und Mittelwert (MW) (oben); zusätzlich sind die Werte nach den Fahrsituationen (BAB, außerorts, innerorts) aufgeteilt (unten)

Bei Betrachtung der Mittelwerte über alle Bundesländer (MW, ganz rechts) ist zu erkennen, dass sich die Gewichtung nach Fahrsituation zwischen PKW und LKW deutlich unterscheidet: Bei PKW liegen BAB und außerorts fast gleich auf; innerorts ist ca. doppelt so intensiv wie BAB. Demgegenüber wird in der Literatur für die Niederlande von einer Gewichtung von 1:3,1:6,7 ausgegangen [Blok-2005]. Bei LKW zeigen sich in etwa diese Verhältnisse. (385, 951, 2711 mg/km; entspricht 1:2,5:7,0) Ein möglicher Grund ist, dass in Deutschland kein Tempolimit auf Autobahnen gilt, d.h. die PKW bei den Berechnungen mit Richtgeschwindigkeit 130 km/h fahren und somit der Abrieb im Vergleich zu den Niederlanden deutlich verstärkt ist. Bei PKWs zeigt sich im Vergleich der Bundesländer ein relativ uneinheitliches Bild, bei LKWs ein eher gleichmäßiges.

Bisher wurden Intensitäten dargestellt. Abbildung 29 zeigt die Gesamtabriebsmenge. Es ist zu erkennen, dass die bevölkerungsreichen Bundesländer (NRW, BY, BW) die Zahlen erwartungsgemäß dominieren.

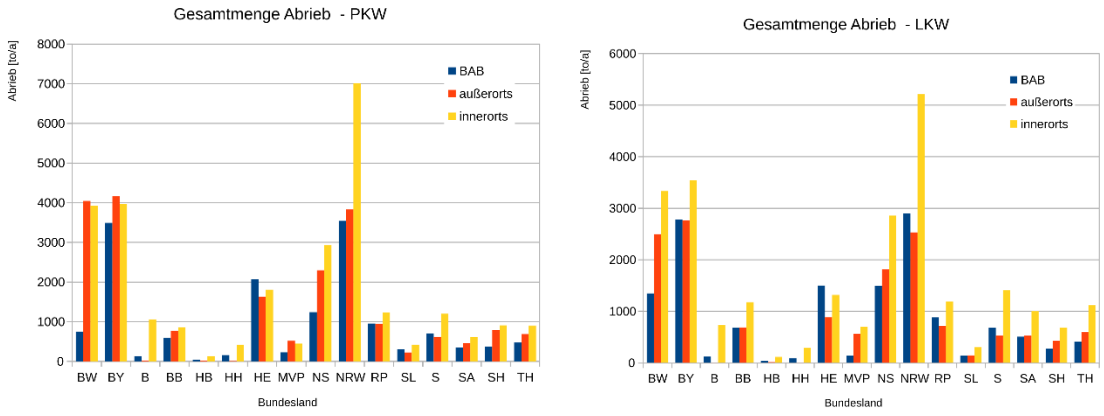


Abbildung 29: Absolute, jährliche Abriebsmengen nach Bundesländern

Anteil verschiedener Kräfte am Reifenabrieb

Die Anteile der verschiedenen Kräfte auf den Reifenabrieb ausgehend von der Grundkonfiguration werden im Folgenden dargestellt. Dies ist deutlich von der Wahl bestimmter Modellparameter abhängig; insbesondere von *Querzahl* und *Potenz* im Kraftgesetz.

Zudem beeinflussen sich die Kräfte teilweise gegenseitig, so dass keine eindeutige Zuordnung möglich ist: Zum Beispiel müssen die Fahrzeuge ständig der Querneigung der Straße (zum Wasserabfluss) entgegenwirken, was einen stetigen Reifenabrieb bewirkt; als Überhöhung von Kurven (Querneigung nach innen) jedoch auch eine Verminderung der zu übertragenden Fliehkräfte und eine Minderung des Reifenabriebs bedeuten kann. Dies hat zur Folge, dass das „Abschalten" der Querneigung gegebenenfalls eine Erhöhung! des Reifenabriebs bewirken kann.

Abbildung 30 zeigt die absoluten Abriebsraten und die normierten Anteile für PKW und LKW. Rollwiderstand und Steigung/Gefälle spielen für den Gesamtabrieb keine Rolle. Auch der Luftwiderstand, der maßgeblich für den Kraftstoffverbrauch ist, spielt für den Reifenabrieb nur eine relativ geringe Rolle (ca. 10%). Die Querneigung hat hier auch nur einen geringen Beitrag. (wegen der Kompensation der Fliehkräfte). Die dominierenden Faktoren sind das Kurvenfahren und das Verhalten an Kreuzungen. Die Zusammenhänge unterscheiden sich zwischen PKW und LKW nicht deutlich. Insgesamt sind bei LKW die Beiträge aus Kurven etwas geringer - vermutlich durch die limitierte Höchstgeschwindigkeit.

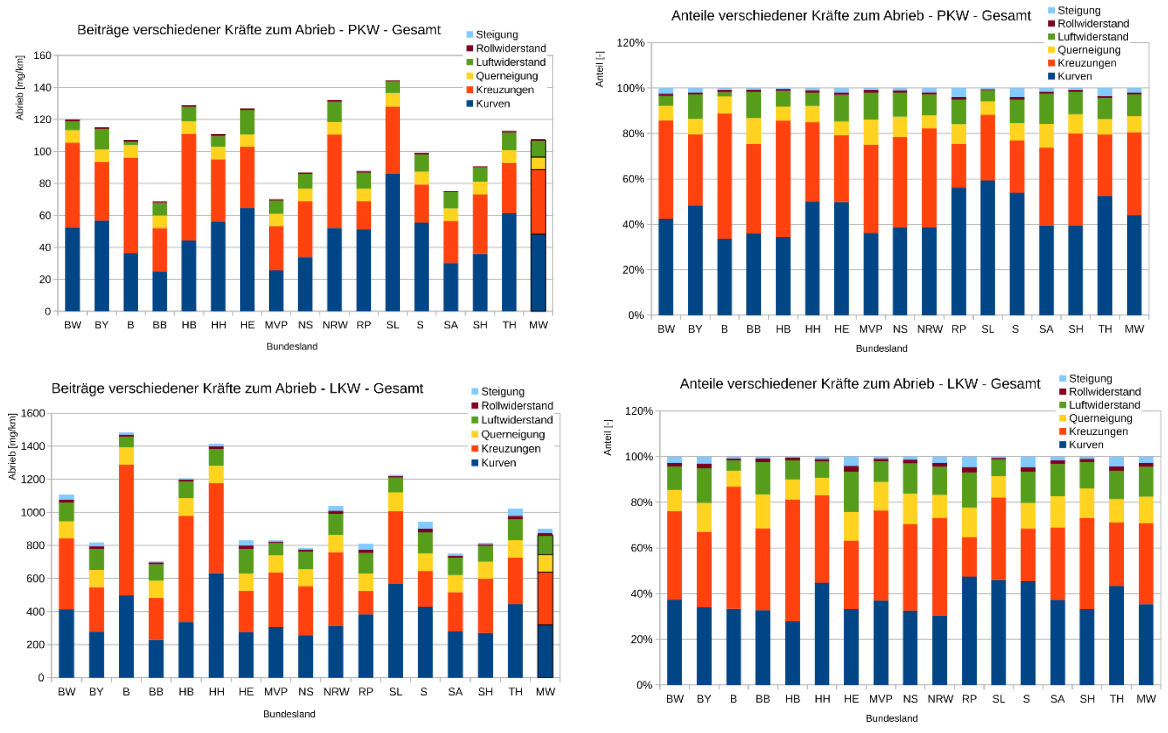


Abbildung 30: Einfluss verschiedener Effekte auf den gesamten Abrieb, gemessen als Abrieb [mg/km] (links) oder als Anteile (rechts), getrennt nach PKW (oben) und LKW (unten). Dargestellt nach Bundesländern und als Mittelwert (MW)

Die folgende Abbildung 31 zeigt dieselben Daten für die BAB. Es existieren naturgemäß keine Beiträge durch Kreuzungen; der Einfluss des Luftwiderstands ist deutlich gestiegen, aber mehr als 50 % machen bei PKW immer noch die Kurvenkräfte aus, obwohl Autobahnen üblicherweise mit sehr großen Radien ausgelegt sind.

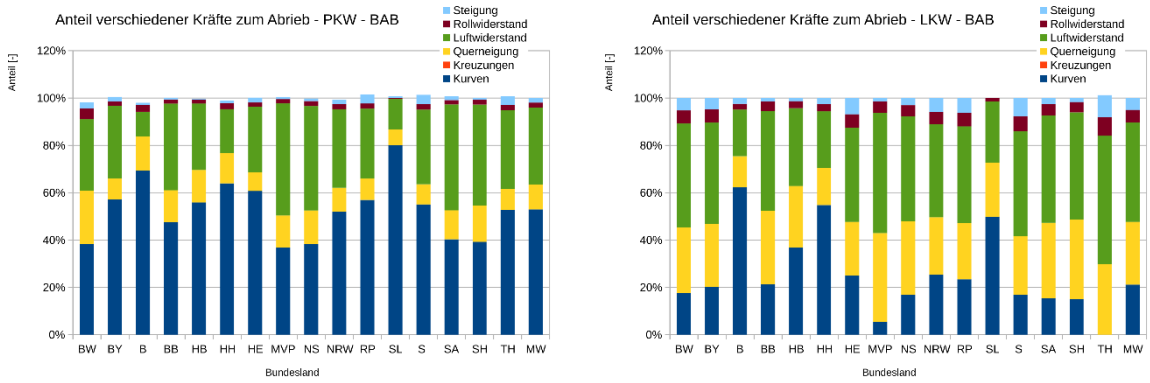


Abbildung 31: Einfluss verschiedener Effekte auf den Abrieb auf BAB (normierte Anteile.) Dargestellt nach Bundesländern und als Mittelwert (MW)

Abbildung 32 zeigt die Auswertung für den innerstädtischen Verkehr: Der Abrieb in Kurven und das Verhalten an Kreuzungen sind für 90 % des Reifenabriebs verantwortlich.

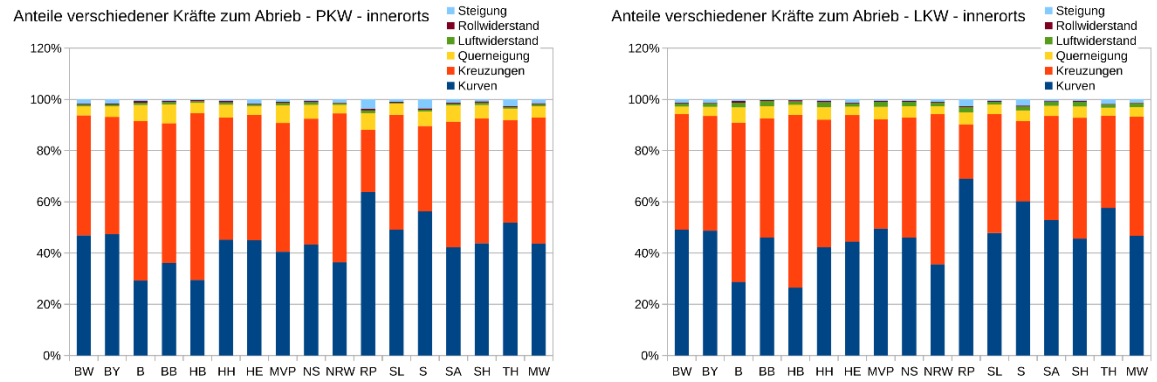


Abbildung 32: Einfluss verschiedener Effekte auf den Abrieb innerorts (Gemessen als normierte Anteile. Dargestellt nach Bundesländern und als Mittelwert (MW)

In Abbildung 33 ist der Abrieb am Beispiel von Berlin dargestellt. Sowohl Bereiche entlang von Autobahnen als auf Quartiere innerorts können Hotspots für Reifenabrieb sein. Die Karte zeigt anhand eines 1 km Rasters Bereiche mit niedrigen (grün) und hohen (rot) Abriebmengen.

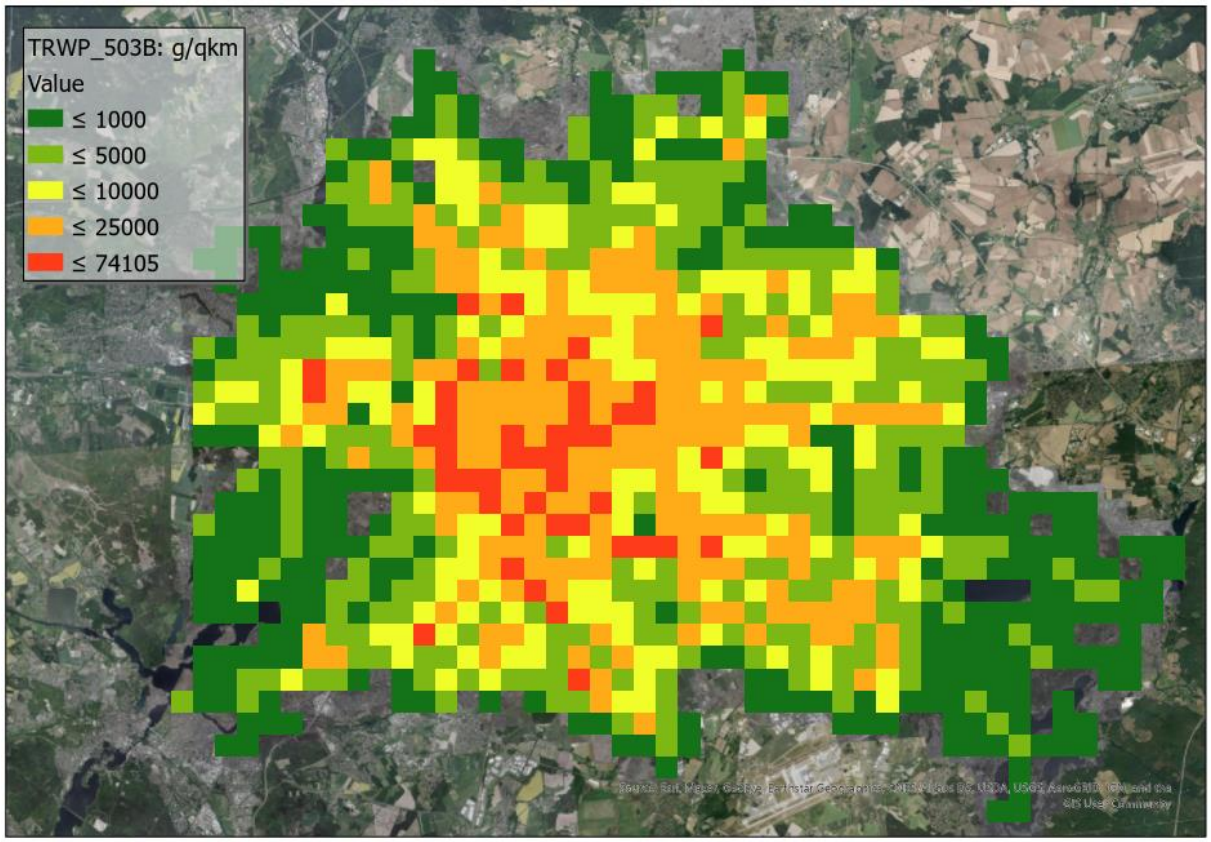


Abbildung 33: Hotspots Berlin, das 1 qkm-Raster identifiziert auf Stadtebene relevante HotSpots

II.1.4.2 Interpretation des TWM-Modells

Bei den nachfolgenden Rechnungen wurden einzelne Parameter - ausgehend von der Grundkonfiguration - gezielt variiert. Es wurde zwischen Parametern, die das tatsächliche Fahrgeschehen beschreiben (Fahrzeugmasse, Geschwindigkeit, Verhalten an Kreuzungen) und reinen Modellparametern (Querzahl, Potenz der Kraft) unterschieden.

Einfluss der Fahrzeugmasse

Die Fahrzeugmasse ist in allen Kräften - außer in dem Luftwiderstand - enthalten. Da die Kräfte in der aktuellen Konfiguration quadratisch in den Abrieb eingehen und der Luftwiderstand nur einen geringen Beitrag liefert (s.o.), hängen die Abriebe auch (nahezu) quadratisch von der Fahrzeugmasse ab (Abbildung 34).

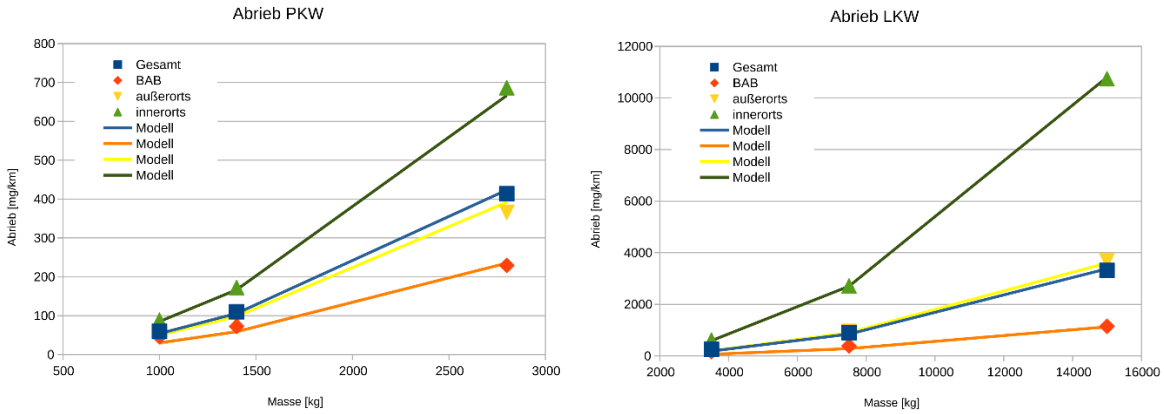


Abbildung 34: Einfluss der Fahrzeugmasse auf den Abrieb. (Das TWM-Modell stellt einen quadratischen Zusammenhang dar.)

Anteil des Stoppverkehrs an Kreuzungen

Innerorts wird die Menge des Abriebs wesentlich von dem Verhalten an Kreuzungen beeinflusst. Als Mittelwert wurde in dem TWM-Modell angenommen, dass 40 % aller Fahrzeuge an Kreuzungen anhalten und wieder beschleunigen müssen. Abbildung 35 zeigt eine Variation der Anteile zwischen 10 und 60 %.

Für die BAB ist kein Einfluss erkennbar, da dort keine Kreuzungen vorhanden sind. Die Wirkung ist innerorts am Größten, da hier im Verhältnis zur Straßenlänge die meisten Kreuzungen auftreten. Die gesamte Abriebmenge, ließe sich durch einen besser fließenden Verkehr (10 % Stopprate) moderat senken: Bei PKW von 110 mg/km auf 93 mg/km und bei LKW von 900 mg/km auf 759 mg/km. Innerorts sänken die Abriebswerte von 172 auf 140 mg/km (PKW) bzw. von 2711 auf 2173 mg/km (LKW).

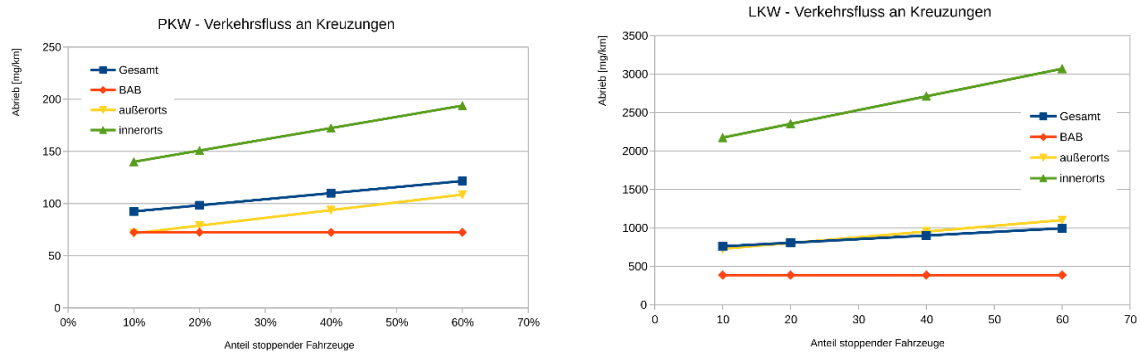


Abbildung 35: Einfluss des Anteils an Fahrzeugen, die an Kreuzungen anhalten müssen.

Tempolimit auf BAB und innerorts

Es wurde der Einfluss der maximalen Geschwindigkeit sowohl auf BAB als auch innerorts untersucht: Zur Verdeutlichung wurden extreme Werte ausgewählt: Auf den BAB wurde eine maximale Geschwindigkeit von 80 km/h für PKW und 60 km/h für LKW gesetzt; innerorts wurde überall Tempo 30 gesetzt (Abbildung 37).

Auf den BAB fällt der Effekt für die PKW signifikanter aus, da die Reduktion der Geschwindigkeit höher angesetzt ist: In der Grundkonfiguration wurde von einer Richtgeschwindigkeit von 130 km/h für alle PKW ausgegangen, wenn keine örtliche Geschwindigkeitsbegrenzung wirksam ist. LKWs fahren in der Grundkonfiguration ohnehin nicht schneller als 80 km/h.

In Berlin fällt die Reduktion für PKW auf BAB sehr gering aus, da die Fahrgeschwindigkeiten auf den Stadtautobahnen limitiert sind. Im Mittel würden die Abriebsraten bei PKW aber auf ca. 32 % fallen, da die Änderungen auf Hauptverkehrsstraßen infolge des angenommenen Tempolimits deutlich zu erkennen sind (Abbildung 36); bei LKW ergibt sich eine Reduktion auf 63 %. Innerstädtisch ergibt sich für PKW und LKW eine Reduktion auf ca. 50 %.

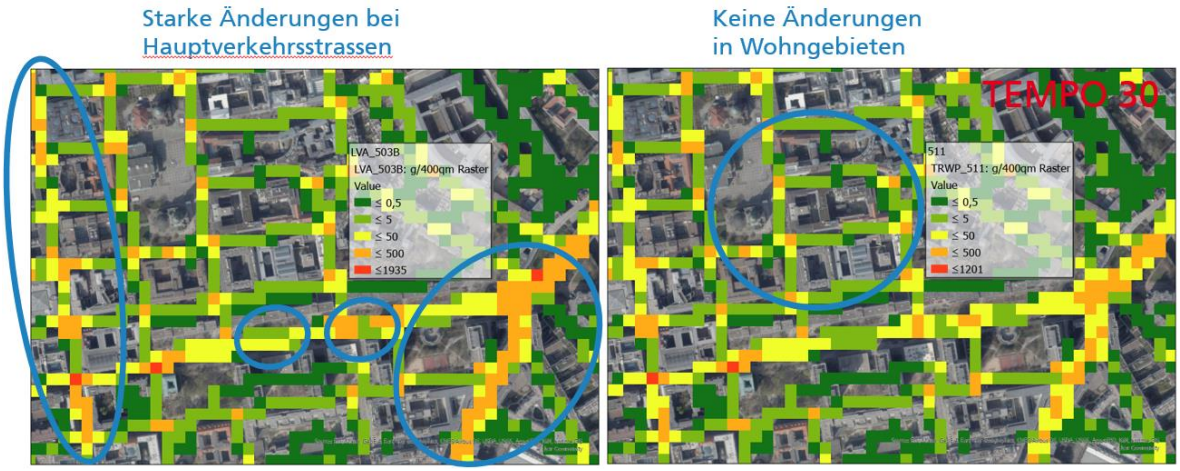


Abbildung 36: Tempo 30, Beispiel auf Quartiersebene in Berlin für PKW Verkehr

Die Reduktionen auf der Autobahn ergeben sich überwiegend aus den verringerten Fliehkräften und weniger aus der geringeren Antriebsleistung (vergl. Anteile der Kräfte am Verschleiß); es ist also ein anderer Effekt als beim Kraftstoffverbrauch. Innerorts resultiert die Reduktion des Reifenabriebs überwiegend aus den verringerten Verlusten an Kreuzungen, da weniger Beschleunigung und Abbremsen erforderlich sind. Deshalb empfiehlt sich, den Verkehrsfluss nicht durch Kreuzungen zu stören, an denen *alle* Teilnehmer abbremsen müssen.

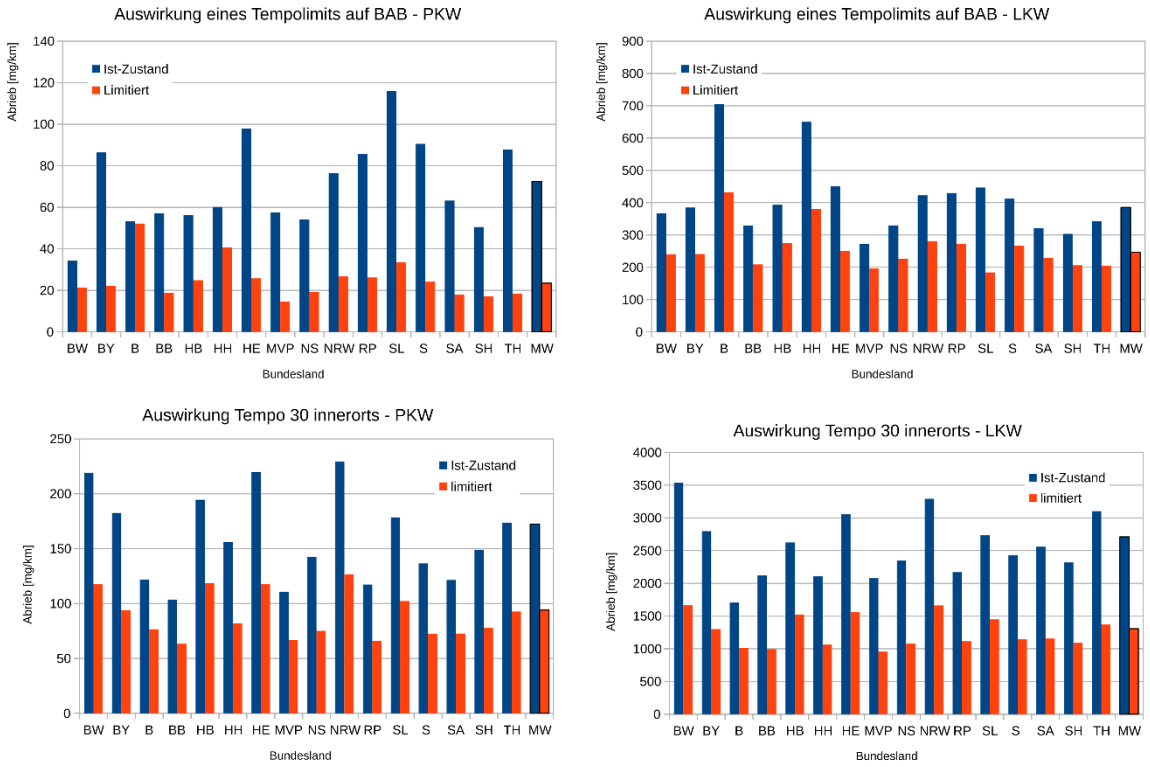


Abbildung 37: Auswirkung von Tempolimits auf BAB und innerorts auf den Reifenabrieb

Beschleunigungsverhalten an Kreuzungen

Es wurden verschiedene Beschleunigungsverhalten an Kreuzungen untersucht. Die Abbildung 38 zeigt nur die Werte für innerorts, da hier die Auswirkungen am Größten sind (s.o.) Insgesamt ist der Einfluss in dem untersuchten, moderaten Bereich (1,5 bis 2,5 m/s^2) eher gering. (PKW können beim Bremsen bis zu 10 m/s^2 erreichen; eine Beschleunigung von 0-100 km/h in 10 s entspricht ca. 2,7 m/s^2; 3 s entsprechen ca. 9 m/s^2.)

Gemäß den Modellannahmen ist nur ein linearer Zusammenhang zu erwarten: Die Kräfte steigen proportional zur Beschleunigung und sie gehen quadratisch in die Berechnung des Abriebs ein. Allerdings verkürzt sich auch die Strecke, die zum Erreichen der Zielgeschwindigkeit nötig ist, umgekehrt proportional zur Beschleunigung.

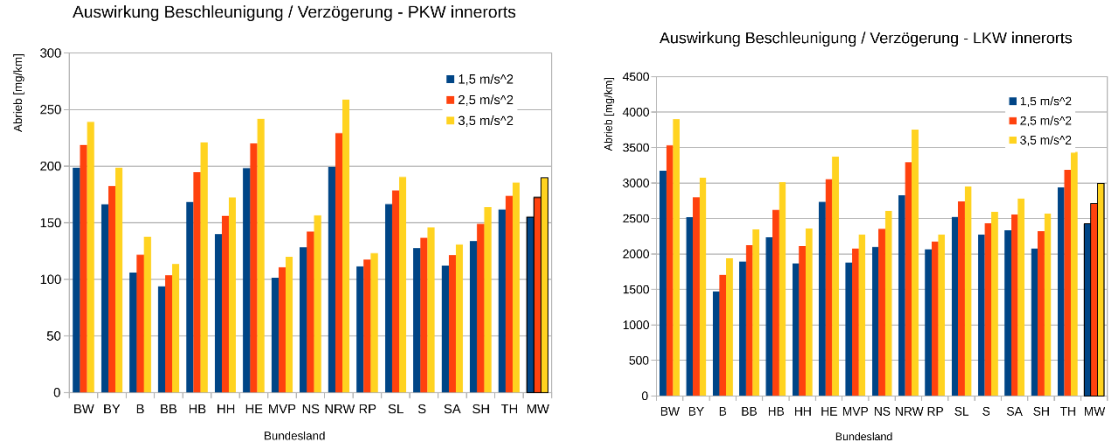


Abbildung 38: Einfluss der Beschleunigung / Verzögerung an Kreuzungen

Ein Vergleich (1,5 bis 3,5 m/s^2) ist aus stadtplanerischer Sicht interessant. Am Beispiel Berlin (Abbildung 39) führt diese Erhöhung zu einer Verdopplung der Hotspots und damit zu Bereichen, die für eine vertiefende Untersuchung relevant sind.

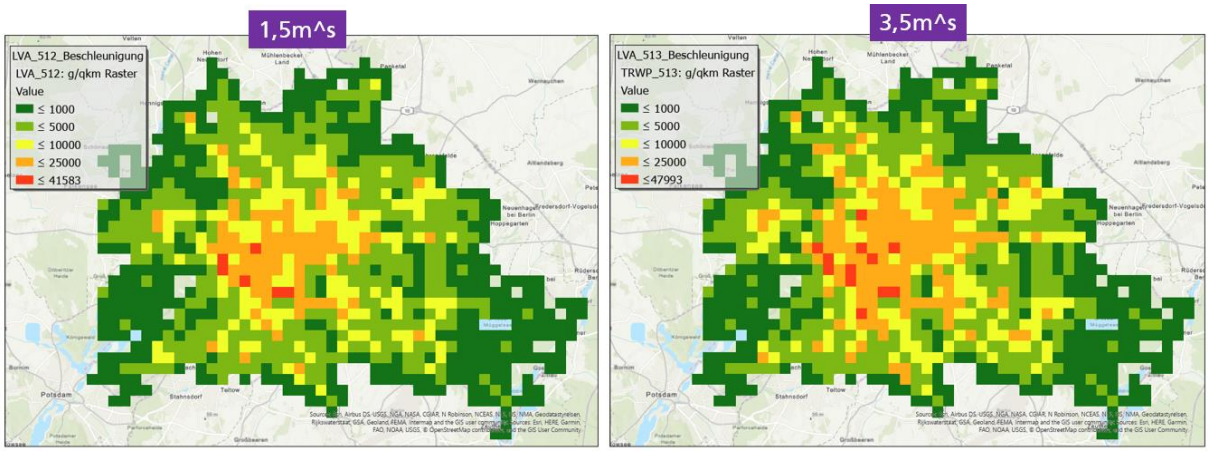


Abbildung 39: Beschleunigung / Bremsverhalten an Kreuzungen, Beispiel auf Quartiersebene in Berlin für PKW-Verkehr

Maximale Fliehkraft in Kurven

Im TWM-Modell wurde die Fahrzeuggeschwindigkeit gegebenenfalls unter die erlaubte Geschwindigkeit reduziert, um eine gewisse Querbeschleunigung nicht zu überschreiten, die von den Fahrzeuginsassen als unkomfortabel empfunden wird. Standardmäßig ist die Querbeschleunigung

2 m/s^2 und wurde hier auf 1 m/s^2 reduziert. Es ergibt sich aber nur eine geringe Reduktion des gesamten Abriebs (Abbildung 40).

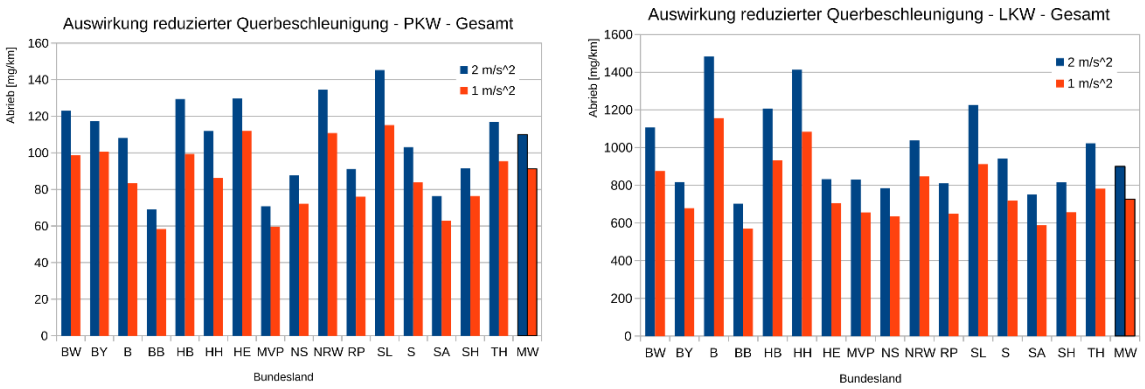


Abbildung 40: Einfluss einer reduzierten maximalen Querbeschleunigung.

Variation der gewählten Modellparameter

Das TWM-Modell enthält zwei Parameter, die die Ergebnisse sehr stark beeinflussen

- Querzahl (Standardwert 7)
- Potenz der Kräfte (Standardwert 2)

Eine Reduktion der Querzahl bewirkt eine schwächere Gewichtung insbesondere der Kurvenkräfte; eine Abnahme der Potenz führt zu einer geringeren Gewichtung von Extremsituationen.

Anders als bei den vorangegangenen Berechnungen, die Änderungen im Verkehrsgeschehen abbilden, sind hier die Modelle nach der Berechnung re-kalibriert worden, so dass die gesetzten Abriebsmengen (110 bzw. 900 mg/km) wieder erreicht wurden.

Für PKW senkt die Verringerung der Querzahl die innerstädtischen Abriebswerte leicht und lässt die Abriebswerte außerorts und auf der BAB leicht steigen. Die Effekte sind für LKW etwas deutlicher ausgeprägt (Abbildung 41).

Die Absenkung der Potenz wirkt sich in dieselbe Richtung aus, allerdings deutlich stärker. Mit sinkender Potenz wirkt sich die Streuung der Kräfte weniger deutlich auf den Verschleiß aus: Die Abriebsintensitäten aller drei Fälle wurden sich immer ähnlicher (Abbildung 42)..

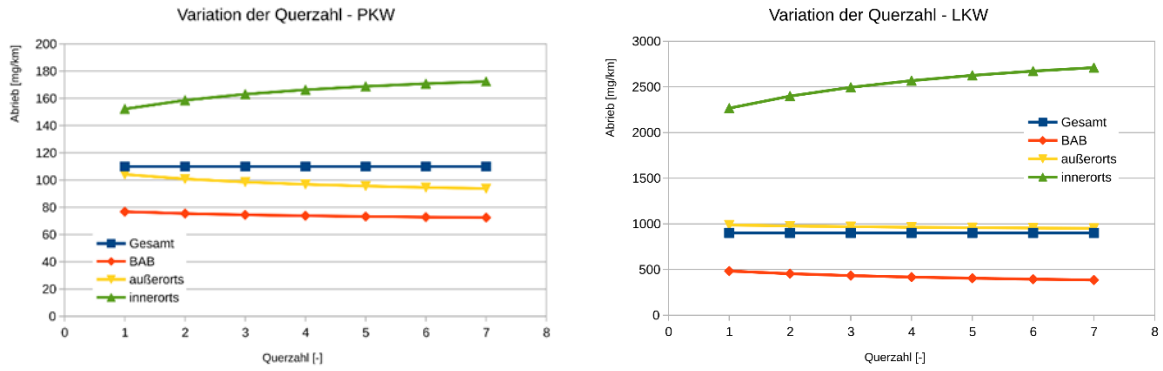


Abbildung 41: Variation der Querzahl in dem TWM-Modell

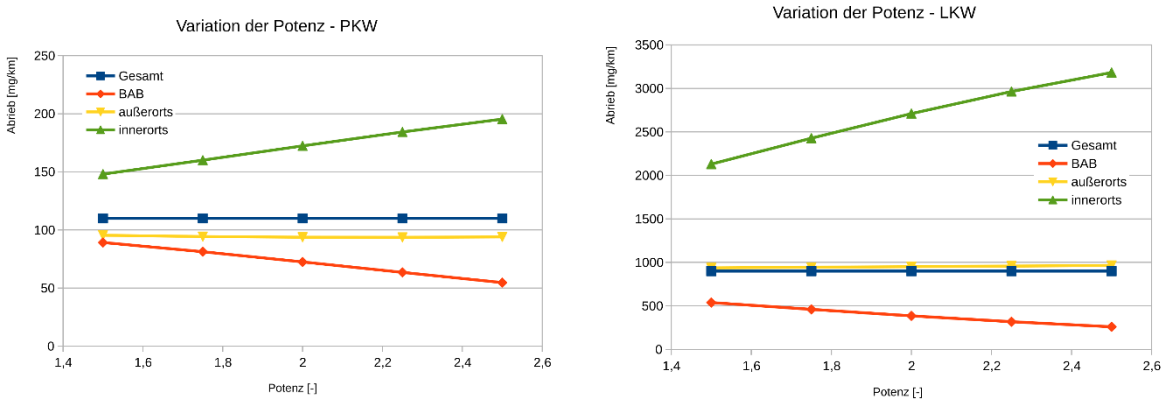


Abbildung 42: Variation der Potenz in dem TWM-Modell

II.1.5 Modellierung der atmosphärischen Ausbreitung von Reifenabrieb

Von der **iMA Richter & Röckle** wurde die Berechnung der Deposition von Reifenabrieb (TWP) durchgeführt. Diese hängt im Wesentlichen von den meteorologischen Bedingungen und den Emissionen ab. Als wichtige Größe bei den Emissionen ist die Korngrößenverteilung zu nennen. Größere und damit schwerere Partikel haben eine höhere Sinkgeschwindigkeit und werden in Quellnähe abgelagert, während kleine Partikel auch in größere Entfernungen verfrachtet werden können (Abbildung 43).

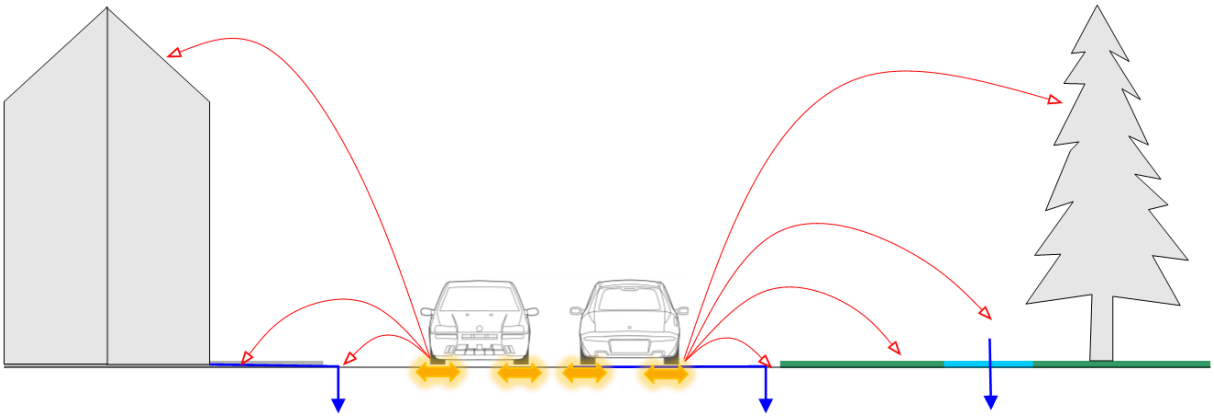


Abbildung 43: Skizze zur Ausbreitung unterschiedlicher Partikelgrößen.

Bei *TyreWearMapping* standen die Freisetzungsmodalitäten und die Aufbereitung der meteorologischen Daten im Vordergrund.

II.1.5.1 Einführung

Die Ausbreitung von Spurenstoffen hängt von zahlreichen Parametern ab. Im Wesentlichen bestimmen die Emissionen und die meteorologischen Verhältnisse den Ausbreitungspfad. Stäube – und dazu gehört Reifenabrieb – weisen aufgrund ihres Gewichts eine Sinkgeschwindigkeit auf. Je nach Untergrund, auf den die Partikel fallen, werden sie dort gebunden.

Die Freisetzung stellt einen komplexen Prozess dar, der durch den Abriebsvorgang zwischen Reifen und Straße allein nicht ausreichend beschrieben wird. Hierauf wird im nächsten Abschnitt näher eingegangen. Die Freisetzung ist für die Parametrisierung der Quelle im Zuge der Ausbreitungsrechnungen von großer Bedeutung

II.1.5.2 Freisetzungsprozess

Reifenabrieb entsteht nur in einem kleinen Bereich, in dem die Reifen Kontakt zur Fahrbahn haben (vgl. Abschnitt I.4).

Die Ausbreitung des Reifenabriebs wird zunächst durch sehr kleinräumige Phänomene bewirkt. Ohne Fahrzeugbewegungen und Wind würde der Abrieb an Ort und Stelle liegen bleiben und dann durch Niederschlag abgewaschen. Demzufolge spielen Effekte wie Aufwirbelung, Sedimentation, Deposition, Resuspension, Transporte und Umwandlung (Abbildung 44) eine wesentliche Rolle. Diese wirken sowohl hintereinander wie auch gleichzeitig in einem relativ eng umgrenzten Straßenraum.

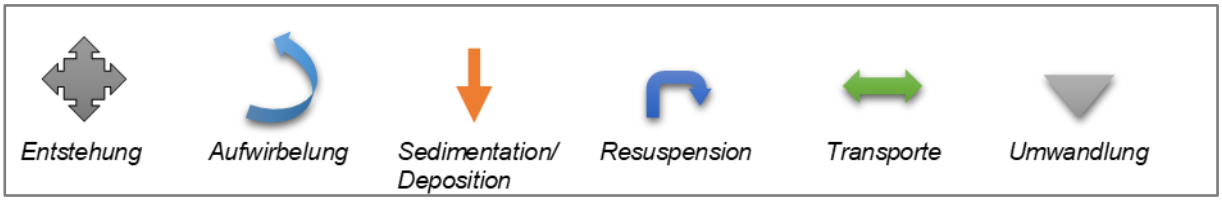


Abbildung 44: Quellnahe Effekte.

Aufwirbelung

Die Aufwirbelung wird durch unterschiedliche Prozesse bewirkt. Zunächst sind es die Verdrängungseffekte der Räder. Diesen überlagert wird die durch das fahrende Fahrzeug induzierte Turbulenz. Unter und vor allem hinter dem Fahrzeug bildet sich ein Unterdruck, der zu einer starken Durchmischung durch Turbulenzwirbel führt.

Verdrängung und ein gewisses Hochreißen von Material durch Reifenbewegungen wurden vor allem im Rahmen von Gischtstudien untersucht. In Abbildung 45 ist dies exemplarisch für einen rotierenden isolierten Reifen im Laborversuch und als numerische Modellierung dargestellt [Kabanovsa et al.-2019].

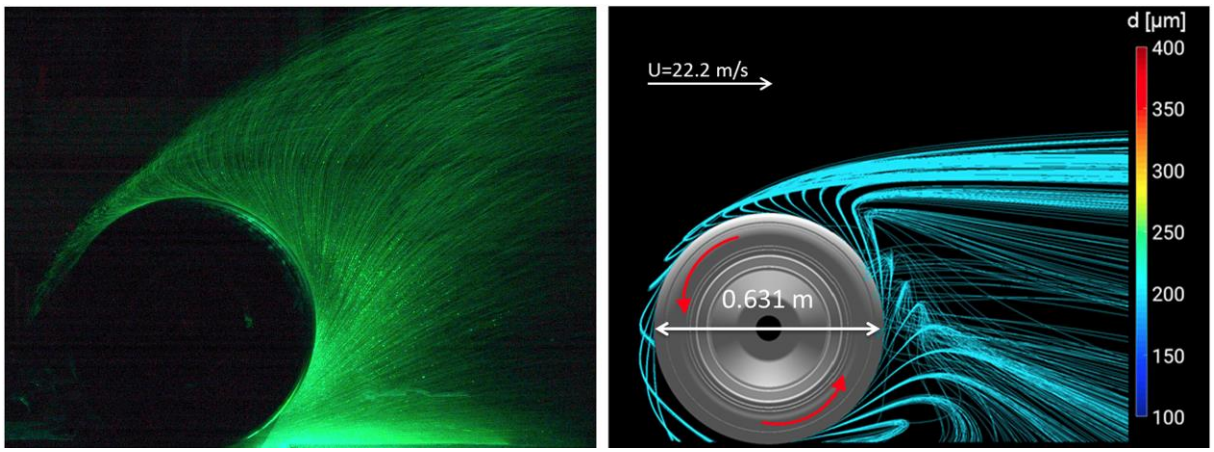


Abbildung 45: Gischtaufwirbelung an einem isolierten rotierenden Reifen. Links – Laborversuch, rechts – numerische Simulation für Partikel mit einem Durchmesser von 200 µm [Kabanovsa et al.-2019]

Anschaulich sind auch Ergebnisse von CFD-Modellierungen, die die Wasseraufwirbelungen und Wirbelstrukturen an den Rädern und hinter dem Fahrzeug zeigen (Abbildung 46) [Siemens-2020].

Der Wassergehalt der aufgewirbelten Gischt ist in Abbildung 47 dargestellt. Große Anteile hinter dem Fahrzeug findet man im Lee der Räder, aber lateral verteilen sich Wassertröpfchen [Jilesen -2013].

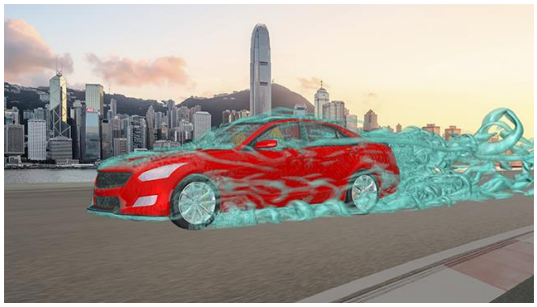


Abbildung 46: Gischtaufwirbelung an einem Fahrzeug. Simulationsergebnis [Siemens-2020].

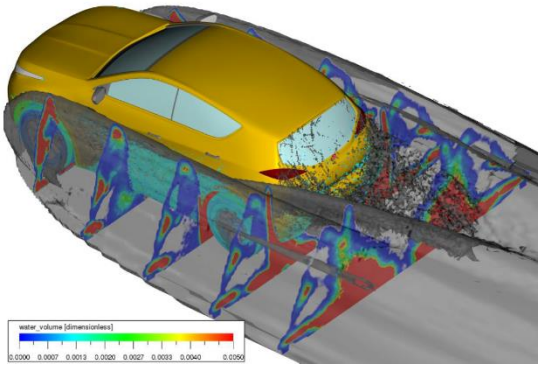


Abbildung 47: Wassergehalt in verschiedenen Schnitten an einem Fahrzeug.

Die Aufwirbelung einer Flüssigkeit ist aufgrund der Adhäsionskräfte nicht direkt vergleichbar mit der Aufwirbelung von Partikeln. Allerdings zeigen Fotos der Staubaufwirbelung an Fahrzeugen vergleichbare Effekte. In Abbildung 48 sind zwei Fahrzeuge zu sehen, die über eine nach einem Vulkanausbruch auf Island mit feiner Asche bedeckten Straße fahren. An den Reifen wird ebenfalls Staub durch Verdrängungseffekte aufgewirbelt, allerdings weniger stark als dies bei wasserbedeckter Straße geschieht. Dafür sind die Effekte in der Nachlaufzone der Fahrzeuge stärker ausgeprägt. Der sichtbare Staub wird bis circa der doppelten Fahrzeughöhe aufgewirbelt.

Ferner lässt sich erkennen, dass auf den Bahnen, auf denen die Räder gerollt sind, deutlich weniger Staub liegt als auf dem insgesamt befahrenen Straßenbereich. Signifikant ist auch, dass in Bereichen, in denen sich keine Fahrzeuge bewegt haben, die Staubbeladung sehr hoch ist.

Abbildung 48: Extreme Staubaufwirbelung hinter zwei Fahrzeugen, die über eine mit Vulkanasche bedeckte Straße fahren [The Telegraph-2010]

Der Prozess der Aufwirbelung hängt von zahlreichen Parametern ab. Dies sind im Wesentlichen Fahrzeug- und Straßen-spezifische Daten (Tabelle 5):

Tabelle 5: Abhängigkeit der Aufwirbelung von verschiedenen Parametern

Parameter	
Fahrzeuggeschwindigkeit	Je schneller, desto größer sind die Druckunterschiede im Nachlauf und desto intensiver wird Material horizontal und vor allem vertikal in die Luft geschleudert.
Fahrzeugzusammensetzung	PKW, leichte Nutzfahrzeuge und schwere Nutzfahrzeuge weisen unterschiedliche Fahrzeughöhen auf. Nutzfahrzeuge (LKW, Transporter) verteilen das Material aufgrund des höheren Aufbaus über einen größeren vertikalen Bereich.
Aerodynamik des Fahrzeugs (Formwiederstand)	Windschlüpfrige Fahrzeuge (mit niedrigem c_w-Wert) führen in der Regel zu geringeren Turbulenzen und damit zu geringeren vertikalen Erstreckungen der Aufwirbelung im Nachlauf des Fahrzeugs.
Fahrzeugdichte / Anzahl der Fahrspuren	Bewegen sich mehrere Fahrzeuge hintereinander, so wechselwirken die Turbulenzbereiche und führen zu einer Aufweitung der „Staubwolke". Abstand und Geschwindigkeit sind die relevanten Größen, die diese Form der Aufwirbelung steuern. Mehrere Fahrspuren mit und ohne Gegenverkehr erhöhen die Komplexität dieser Vorgänge.
Reifenparameter (Breite, Profil, Druck)	Die Verdrängungswirkung der Räder hängen von der Reifenbreite ab, Mitnahmeeffekte auch vom Profil des Reifens. Der Reifendruck kann zusätzlich eine Rolle spielen.
Staubbeladung der Straße und Straßenbeschaffenheit	Ein wesentlicher Parameter ist die Staubbeladung der Straße. Wo nichts ist, kann nichts aufgewirbelt werden. Wo die Beladung hoch ist wird viel Material aufgewirbelt. Bei offenporigen Belägen (Flüsterasphalt) sammelt sich der Großteil der Partikel in den Poren. Die Turbulenzen reichen in der Regel nicht aus, das Material zu bewegen.
Größenverteilung des staubenden Materials auf der Straße	Große Partikel haben eine hohe Sinkgeschwindigkeit. Der Verteilung der Partikel durch Turbulenzballen in der Vertikalen wirkt die Schwerkraft entgegen, so dass feine Partikel höher geschleudert werden können als große Partikel.
Randhindernisse	Leitplanken, Lärmschutz, parkende Fahrzeuge, Vegetation und Gebäude erzeugen je nach Windverhältnissen ebenfalls Turbulenzen, die sich den fahrzeuginduzierten Turbulenzen überlagern.
Windverhältnisse	Bei Gegenwind oder Rückenwind werden die Stäube entlang der Straße verfrachtet. Bei Seitenwind wird ein Teil der Stäube aus dem Straßenraum ausgetragen und nimmt nicht mehr an den oben genannten Prozessen teil.

Die fahrzeuginduzierte Turbulenz kann durch den Ansatz einer vertikalen Quellverschmierung berücksichtigt werden. Ihr Wert hängt unter anderem vom Verkehrsaufkommen, dem Schwerverkehrsanteil und der Fahrgeschwindigkeit ab und ist in der Regel größer als 2 m [KRDL-2014].

In der Praxis sind diese Parameter nicht straßenfein bekannt. Erhobene Indikatoren sind das Fahrzeugaufkommen und der Schwerverkehrsanteil und teilweise noch die zulässige Höchstgeschwindigkeit.

Für die Beladung der Straße mit Reifenabrieb wurden die Emissionsdaten herangezogen.

Sedimentation

Das Absinken von Aerosolen infolge der Schwerkraft wird als Sedimentation bezeichnet. Die Sinkgeschwindigkeit hängt von der Masse der Partikel und deren Größe und Form ab.

In der Nähe der Emissionsquellen ist die Sedimentation durch die Gravitationswirkung für den überwiegenden Teil der Deposition verantwortlich. Insbesondere für die großen Partikel (> 10 µm) ist dies der relevante Prozess, um Partikel aus der Atmosphäre zu entfernen.

Bei großen Partikeln wird der aerodynamische Durchmesser verwendet. Das entspricht dem Durchmesser eines kugelförmigen Partikels mit der Dichte ρ_0 = 1 g/cm³, welche die gleiche Sinkgeschwindigkeit in Luft wie das Partikel hat. Der aerodynamische Durchmesser d_a bestimmt sich dann zu

$$d_a = d\sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}}$$

Die Stokesche Sinkgeschwindigkeit v_s kann mit der Formel

$$v_s = 0{,}0308 \cdot 10^6 \cdot d_a^2 \rho$$

abgeschätzt werden. Bei einem Teilchendurchmesser von 100 µm und einer Dichte von 1,8 g/cm³ ergibt sich eine Sinkgeschwindigkeit von 55 cm/s, bei 200 µm schon von 2,2 m/s. Selbst wenn ein großes Teilchen 4 m hochgewirbelt wird, fällt es innerhalb weniger Sekunden wieder zurück auf die Straße. Bei einem Wind quer zur Straße mit 1 m/s im unteren Straßenbereich ist die Wahrscheinlichkeit, dass das Teilchen den Straßenraum verlässt, gering. Erst bei höheren Windgeschwindigkeiten quer zur Straße wird auch das nähere Umfeld mit größeren Teilchen beaufschlagt.

Deposition

Als Deposition wird die Ablagerung eines luftgetragenen Stoffs an einer Grenzfläche zur Atmosphäre, z.B. dem Erdboden, Pflanzen- oder Gebäudeoberflächen bezeichnet. Man unterscheidet zwischen trockener Deposition (Anhaften an Oberflächen bei Berührung) und nasser Deposition infolge von Niederschlag. Die nasse Deposition spielt nur bei sehr kleinen Partikeln eine Rolle. Bei großen Partikeln (> 10 µm) ist aufgrund der geringen vertikalen Erstreckung der Partikelwolke – die Freisetzung findet ja bodennah statt – die Auswaschrate sehr gering, da die Regentropfen nur eine dünne Schicht mit Partikeln durchfallen und dabei auch nur wenige Partikel aufnehmen.

Auf die trockene Deposition wirkt sich die räumliche Änderung der Struktur des Untergrunds aus. Fällt ein Partikel in eine Vegetationsbestande Fläche, so bleibt es dort eher liegen als auf einer glatten Oberfläche, da die Resuspension im Bestand aufgrund fehlender Turbulenz bzw. wegen reduzierten Windgeschwindigkeiten das Partikel nicht mehr in die Atmosphäre zurückverfrachten.

In der VDI-Richtlinie 3782 Blatt 5 [Fachbereich Umweltmeteorologie-2006] sind die Abhängigkeiten beschrieben und Beispiele, jedoch hauptsächlich für kleine Partikel (< 10 µm), angegeben.

Für größere Partikel (> 10 µm) gibt es keine Angaben zu einer raum- und zeitabhängigen Depositionsgeschwindigkeit. In Genehmigungsverfahren wird dies in Deutschland nicht differenziert.

Resuspension

Als Resuspension wird die Wiederaufwirbelung feiner sedimentierter Partikel von Oberflächen bezeichnet. Sie ist abhängig von der Straßenbeladung im Bereich der Fahrspuren, dem Verkehrsaufkommen, dem Schwerverkehrsanteil, den Fahrgeschwindigkeiten und dem Straßenbelag.

Bei porösen Belägen (Flüsterasphalt) ist die Resuspension gering. Letztendlich bedingt sie eine weitere Verschleppung der Stäube, bis diese in Bereichen deponiert werden, die nicht mehr befahren werden. Dies führt zu einer Anreicherung (Akkumulation) am Straßenrand.

Transporte

Bei den oben beschriebenen Phänomenen handelt es sich um sehr kleinräumige Transportprozesse. Diese spielen sich überwiegend im Straßenraum und dem unmittelbar angrenzenden Umfeld ab.

Je kleiner die Partikel, desto geringer sind deren Sedimentations- und Depositionsgeschwindigkeit und desto weiter können diese Teilchen verfrachtet werden. Der Transport hängt von der Windrichtung, der Windgeschwindigkeit und von den Turbulenzparametern ab.

Umwandlung

Unter Druck und Reibung können große Partikel in den Bereichen, in denen die Reifen rollen, zerkleinert werden. So verschwindet zum Beispiel eine Bremsspur nach wenigen Tagen allein durch mechanische Prozesse, also auch ohne Abwaschen durch Niederschlag.

Kleinere Korngrößen werden leichter verfrachtet und führen zu Stoffeinträgen in größerer Entfernung zur Straße.

Auch photochemische Prozesse können bei längerer Verweilzeit und entsprechenden Strahlungsbedingungen zu einer Zersetzung der Reifenabriebpartikel führen. Es wird davon ausgegangen, dass dieser Prozess eine untergeordnete Rolle spielt.

Untersuchungen von [Sommer et al.-2018c] zeigen aber auch, dass die häufig zigarrenförmigen TRWP aufgrund ihrer großen Oberfläche und der Adhäsionswirkung des Gummis beim Rollen auf der Straße (z.B. infolge der fahrzeuginduzierten Turbulenz) weiteren Straßenstaub aufnehmen und dadurch größer werden. Dies wurde auf Innerortsstraßen beobachtet, wo die Fahrzeuggeschwindigkeiten moderat sind. Auf Autobahnen ist dieser Effekt gering.

Niederschlag

Niederschläge, insbesondere Regen, wirken unterschiedlich auf die Prozesse der Entstehung, des Transportes und der Beseitigung von Partikeln ein.

- Bei regennasser Fahrbahn ist die Entstehung von Reifen- und Straßenabriebabrieb deutlich reduziert.
- Regen führt bei entsprechenden Niederschlagsintensitäten zum Abwaschen der Abriebspartikel von der Fahrbahn. Dadurch ergibt sich eine deutliche Reduktion der Wiederaufwirbelung. Die Niederschlagsintensität soll dabei wenigstens 0,254 mm/h betragen [US-EPA-2018].
- Feine Partikel können aus der Atmosphäre ausgewaschen werden. Dies ist bezogen auf die deponierte Masse von untergeordneter Bedeutung.

Bebauung

Straßenrandbebauung führt zu kleinräumigen komplexen Strömungsmustern. Hier gibt es Eckenwirbel, Düseneffekte und Rotoren, die je nach Anströmrichtung in Bezug auf die Bebauung

unterschiedlich ausgeprägt sind. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit ist gegenüber einer hindernisfreien Fläche reduziert. Die Vertikalgeschwindigkeiten können in der gleichen Größenordnung wie die Horizontalkomponenten liegen. Die Turbulenz wird dagegen durch die Rauigkeitselemente erhöht.

In Straßenschluchten findet die Verfrachtung der größeren Partikel hauptsächlich längs der Straßenschlucht statt. Ein Austrag aus der Straßenschlucht über das Dachniveau ist nur bei hohen Windgeschwindigkeiten zu erwarten. Kleine Partikel werden jedoch auch bei geringen Windgeschwindigkeiten über das Dachniveau ausgetauscht.

Einfluss der Korngrößen

Große, d.h. schwere Partikel, fallen in Quellnähe, d.h. im Straßenraum oder unmittelbar daneben wieder auf den Untergrund. Dort werden sie wieder aufgewirbelt, ggf. durch Fahrbewegungen zerrieben oder durch Austragsprozesse (Niederschlag, Straßenreinigung) von der Oberfläche entfernt.

Unterschieden wurden vier Korngrößenklassen (Tabelle 6). Die großen Partikel machen mit einem Anteil von 60 % den Großteil der Emission aus. Der Feinstaubanteil (PM10) wurde mit 1 % der Gesamtemission angesetzt [Kreider et al.-2019]

Tabelle 6: Korngrößenklasse und Anteil an der Gesamtemission.

Korngrößenklasse	Anteil an Gesamtemission
0 – 10 µm	1 %
10 – 50 µm	9 %
50 – 100 µm	30 %
100 – 500 µm	60 %

II.1.5.3 Meteorologie

Die meteorologischen Verhältnisse bestimmen die Ausbreitungsverhältnisse. Dabei werden vor allem die kleinen Korngrößen stärker mit dem Wind verfrachtet, während die großen Korngrößen rasch sedimentieren. Inwieweit die meteorologischen Größen die Deposition beeinflussen, wurde mittels einer umfangreichen Sensitivitätsanalyse (sieh Kapitel II.1.5.4) untersucht.

Die Ausbreitungsverhältnisse sind durch die Verteilungen der Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Ausbreitungsklasse gegeben. Diese variieren von Standort zu Standort in Abhängigkeit verschiedener Parameter:

Verteilung der Windrichtungen
- Topographische Situation
- Lage innerhalb Deutschlands
- Bebauungssituation

Verteilung der Windgeschwindigkeiten
- Rauigkeit (Landnutzung)
- Exposition
- Geländehöhe

Verteilung der atmosphärischen Stabilität

- Tageszeit
- Windgeschwindigkeit
- Exposition

Da die Deposition deutschlandweit mit einer Auflösung von 10 m x 10 m berechnet werden sollte, bedarf es deutschlandweit meteorologische Daten die Landnutzung und topographische Strukturen (z.B. Täler) ausreichend abbilden.

II.1.5.3.1 Deutschlandweise Datensätze der Windrichtung, Windgeschwindigkeit und der Ausbreitungsklassen

Deutschlandweite Datensätze der Windrichtung, -geschwindigkeit und der Ausbreitungsklassen werden durch den Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Form der Testreferenzjahre (TRY)-Datensätze [BBSR-2013] zur Verfügung gestellt. Zudem gibt es vom DWD Datensätze mit den Windgeschwindigkeiten und den Weibull-Verteilungen in einer Auflösung von 200 m x 200 m [CDC-2014].

Die mittleren Testreferenzjahre repräsentieren den charakteristischen Witterungsverlauf eines kompletten Jahres für Deutschland in einer Auflösung von 1 km x 1 km. Dazu wurden die langjährigen Mess- und Beobachtungsreihen stündlicher Auflösung zahlreicher deutscher Stationen mittels geeigneter Methoden in die Fläche interpoliert. Auch die Modifikation der Lufttemperatur und der Feuchtegrößen durch Städte und städtische Ballungsräume wurde auf Basis der CORINE Landnutzungsdaten [Copernicus-2018] berücksichtigt. Die Höhenabhängigkeit diverser Parameter wurde in den Datensätzen berücksichtigt.

Da die Interpolation des Windes besonders diffizil ist, wurde hier das COSMO Modell [Rockel et al.-2008] mit einer horizontalen Auflösung von 2.8 km x 2.8 km herangezogen. Dabei wird der Antrieb für die Simulationen im ersten Schritt (global) mit der ERA-Interim-Reanalyse [Dee et al.-2011], [Berrisford et al.-2009] durchgeführt. Im zweiten Schritt (Zwischennestung) werden die Evaluationsläufe für Euro-CORDEX [Kotlarski et al.2014] verwendet. Messdaten der ca. 350 Windmessstationen des DWDs dienen zur Bias-Korrektur, wobei die Zielauflösung von 1 km² schließlich mittels einer Anpassung an die lokale Oberflächenrauigkeit erreicht wurde. Dazu wurden die landnutzungsspezifischen z_0-Werte, entsprechend ihrer prozentuellen Flächenanteile, unter Anwendung des logarithmischen Mittelungsverfahrens nach [Taylor-1987] bestimmt.

Die TRY-Datensätze sind vom Nutzer anzupassen, wenn sich die Höhenlage der Referenzstation der 1 km^2-Kachel um mehr als 100 Höhenmeter von der gewünschten Zielposition unterscheidet. Kanalisierung in Tälern in topographisch gegliedertem Gelände wird jedoch nicht ausreichend abgebildet. Des Weiteren ist insbesondere in stark strukturiertem Gelände eine Kachelstruktur sichtbar. Deshalb können die Windverteilungen der TRY-Daten nur für wenig gegliedertes Gelände angewandt werden.

Exemplarisch ist in Abbildung 49 die Häufigkeitsverteilung der Windrosen im Bereich des Wupperverbandes an jedem fünften Gitterpunkt dargestellt. Die Balken der Windrosen geben die Häufigkeit an, mit der der Wind aus der jeweiligen Richtung kommt. Farbig sind die Balken nach Windgeschwindigkeiten differenziert: blau – hohe Windgeschwindigkeiten, orange – geringe Windgeschwindigkeiten.

Abbildung 49 zeigt, dass der TRY-Datensatz die kleinräumigen orographischen Strukturen nicht auflöst, d.h. eine Kanalisierung der Strömung in Tälern wird kaum wiedergegeben.

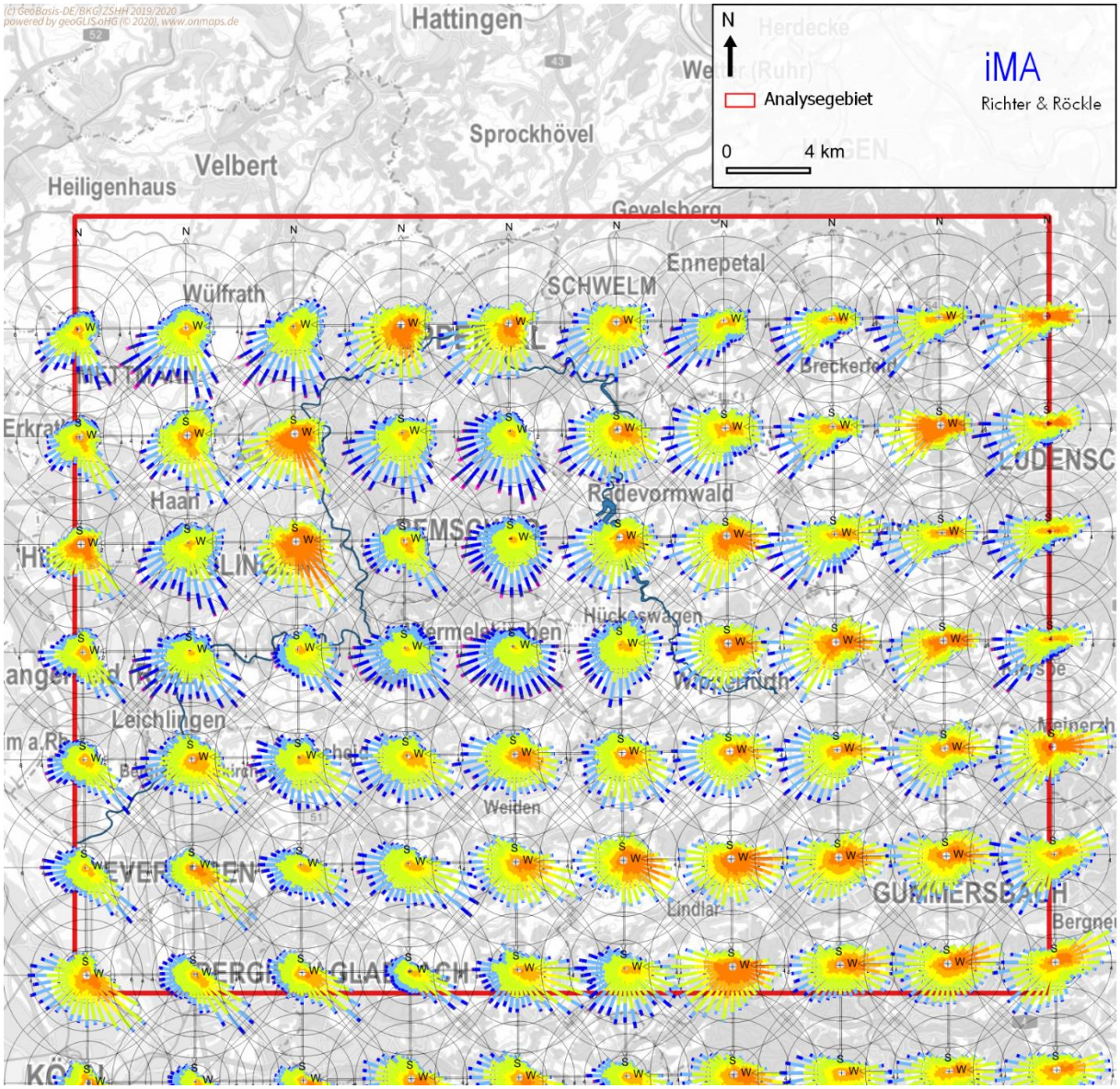


Abbildung 49: Windrosen TRY-Daten. Ausschnitt Wuppergebiet

Neben der Windrichtung und -geschwindigkeit können auch die Ausbreitungsklassen abgeleitet werden. Dazu können die Strahlungsdaten verwendet werden. Die sicherheitstechnische Regel des KTA 1508 (Version 2017-11) liefert die Grundlage zur Berechnung der Stabilitätsklassen aus den in den TRY-Datensätzen vorhandenen Strahlungsdaten und der Windgeschwindigkeit. Die so berechneten Zeitreihen der Stabilitätsklassen konnten anschließend anhand der Windrichtung ausgewertet und richtungsabhängige Häufigkeiten berechnet werden.

Die Windgeschwindigkeit in komplexem Gelände wird im Datensatz der „mittleren jährlichen Windgeschwindigkeiten in 10 m über Grund mit einer Auflösung von 200 m x 200 m“ [DWD-2000] des DWDs besser abgebildet (Abbildung 50). Dieser Datensatz wurde aus 218 besonders qualitätsgeprüften Bodenstationen mit dem statistischen Windfeldmodell (SWM) gemäß Europäischer Windatlas [EWA-1990] generiert.

Die Höhenlagen der Mittelgebirge und die norddeutschen Tieflagen weisen im Jahresmittel hohe, Tallagen und z.B. Städte dagegen nur geringe Windgeschwindigkeiten auf. Die wirkliche Auflösung der Daten kann in diesem Maßstab nicht nachvollzogen werden.

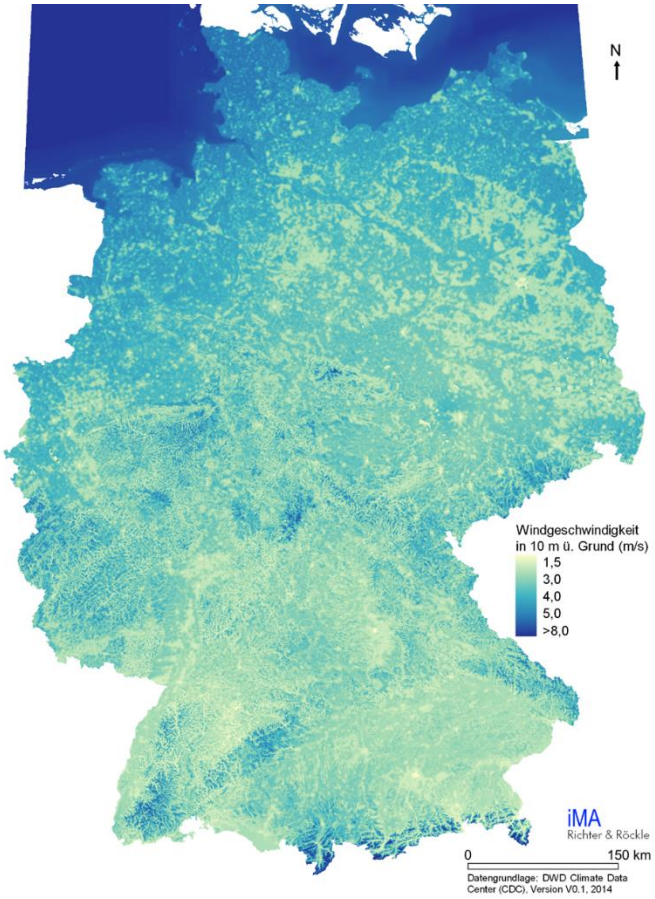


Abbildung 50: 200 m x 200 m Rasterdaten der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe (Quelle: DWD Climate Data Center (CDC), Version V0.1, 2014).

II.1.5.3.2 Deutschlandweite Modellierung der Ausbreitungsverhältnisse

Für kleine Raumschaften wird z.B. im Rahmen von Genehmigungsverfahren eine Modellierung der Ausbreitungsverhältnisse durchgeführt. Dazu wird mit prognostischen mesoskaligen Modellen eine Windfeldbibliothek erzeugt, die für unterschiedliche Anströmbedingungen flächendeckend die lokalen Strömungsverhältnisse berechnet. In diese Modelle fließen das digitale Höhenmodell und die Landnutzung in hoher Auflösung (50 m) ein.

Die Rechenzeit zur Erstellung von Windfeldbibliotheken mit mesoskaligen Windfeldmodellen, wie z.B. METRAS, beträgt selbst für kleinere Gebiete etwa 5-7 Tage. Eine deutschlandweite Modellierung der Ausbreitungsverhältnisse mit einer Auflösung unter 100 m ist derzeit nicht möglich.

Mesoskalige Modelle, wie z.B. das Modell COSMO, rechnen mit einer Auflösung von 2,8 km. Aufgrund der Mittelung des dem Modell zugrundeliegenden digitalen Höhenmodells, werden hier topographische Strukturen nur unzureichend abgebildet.

Um eine deutschlandweite Meteorologie zu erhalten, wurden zwei Ansätze für das Gebiet des Wupperverbands getestet.

Zum einen wurde eine prognostische Windfeldbibliothek mit METRAS-PCL für einen Teilbereich des Wupperverbands erstellt, daraus typische Ausbreitungsbedingungen klassifiziert und Referenzdepositionsfelder berechnet. Diese Referenzdepositionsfelder werden mithilfe Neuronaler Netze unter Berücksichtigung der Landnutzung und topographischer Strukturen für das kleine Testgebiet trainiert und auf das gesamte Gebiet des Wupperverbands angewandt.

Zum anderen wurden die durch den DWD bereitgestellten deutschlandweiten meteorologischen Daten, der Testreferenzjahr-Datensatz mit der Windgeschwindigkeit aus der Weibull-Verteilung skaliert und damit eine neue Zeitreihe der Windgeschwindigkeit und Ausbreitungsklasse berechnet. Die Windrichtung wurde in Tallagen entsprechend der Talausrichtung gedreht.

II.1.5.3.3 Statistische und numerische Modellierung der Ausbreitungsverhältnisse für den Wupperverband

Für Deutschland wurde zunächst eine naturräumliche Gliederung (Abbildung 51) mit dem Ziel erstellt, topographisch gegliederte Gebiete der Mittelgebirge, des Voralpenraums und des Alpenraums zu benennen. Für diese Gebiete können die TRY-Daten für exponierte Höhenlagen, die dem übergeordneten Windregime ausgesetzt sind, übernommen werden. In Tälern muss die Windrichtung jedoch an den Talverlauf angepasst werden. Auch bei den Windgeschwindigkeiten bedarf es einer Korrektur.

Für das Wuppergebiet wurde ein weiterer Lösungsweg verfolgt. Dazu wurde für ein kleines Modellgebiet eine Windfeldmodellierung mittels METRAS-PCL-Simulationen durchgeführt und für jede Rasterzelle eine Ausbreitungsklassenstatistik erstellt (Kapitel II.1.5.3.4). Die Ausbreitungsklassenstatistik besteht aus Verteilungen der 3 meteorologischen Größen Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Ausbreitungsklasse. Diese werden im weiteren Verlauf getrennt analysiert. Die Ausbreitungsklassen wurde mittels einer hierarchischen Clusteranalyse in 20 Referenzmeteorologien eingeteilt. Für jede Referenzmeteorologie wurde ein Referenzdepositionsfeld berechnet.

Für das Gebiet des Wupperverbands wurde anschließen eine Analyse der Topographie und der Landnutzung durchgeführt (Kapitel II.1.5.3.5).

Da Windrichtung, Windgeschwindigkeit und die dazugehörigen Stabilitätsklassen einen 4-dimensionalen Datensatz bilden, wurde das neuronale Netz für jede meteorologische Größe einzeln trainiert.

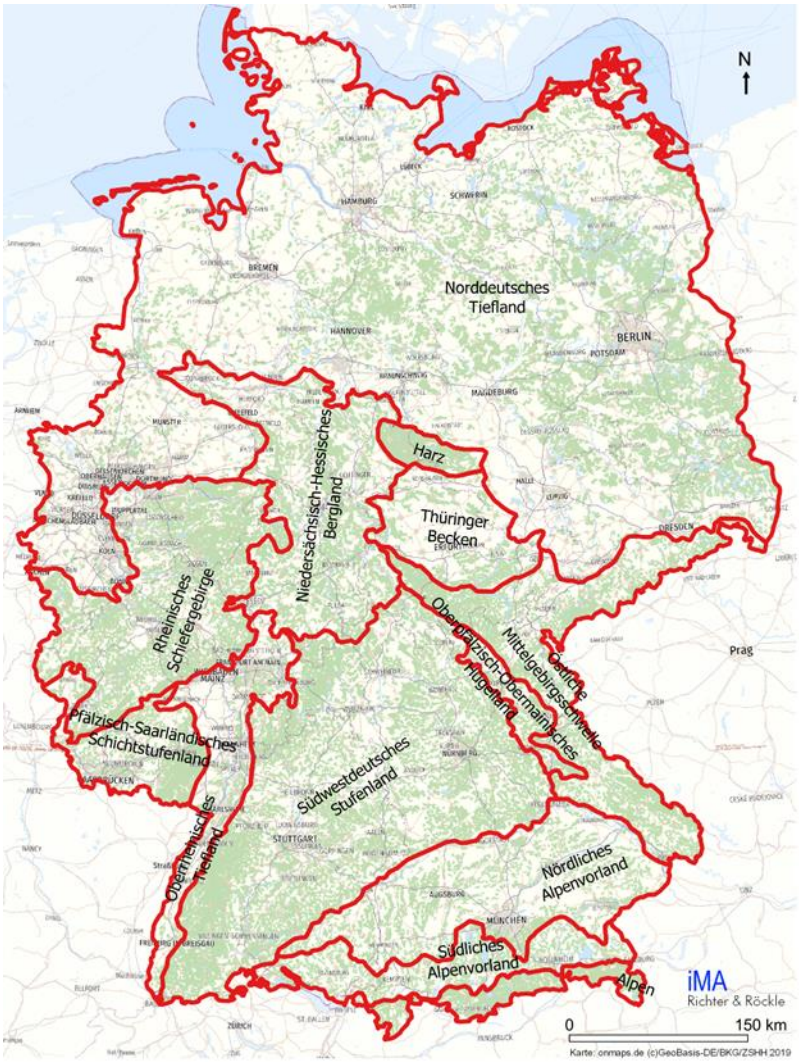


Abbildung 51: Naturräumliche Gliederung Deutschlands

II.1.5.3.4 Mesoskalige Modellierung mit METRAS

Ausbreitung und Deposition von Spurenstoffen werden durch die Emissionen und durch die lokalen Strömungs- und Austauschverhältnisse bestimmt.

In dem teils komplex gegliederten Gelände des Wupperverbands erfolgte die Berechnung der Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse mit dem prognostischen mesoskaligen Strömungsmodell METRAS-PCL (Version 5.0.0) [Schlünzen et al.-2017]. Das Modell wurde am Meteorologisches Institut der Universität Hamburg entwickelt und validiert [Schlünzen et al.-1996]. Das Windfeldmodell METRAS PCL erfüllt die Anforderungen der VDI 3783 Blatt 7: 2017.

Die prognostischen Windfelder werden für die Windfeldbibliothek auf die von der Ausbreitungsrechnung definierten Gitter interpoliert, um vom Ausbreitungsmodell (AUSTAL2000 bzw. LASAT) verwendet werden zu können.

In Abbildung 52 sind die Ausschnitte aus dem Untersuchungsraum Wupper dargestellt. Das Gesamtgebiet (lila umrandet) umfasst ca. 51 km in West-Ost-Richtung und 47,5 km in Nord-Süd-Richtung. Die Gitterweite in diesem Bereich nimmt zum Rand hin von 100 m bis auf 450 m zu. Die Ausdehnung des inneren Gebiets (blau umrandet) beträgt 16,8 km West-Ost und 15 km Nord-Süd mit einer konstanten Gitterweite von 100 m.

Die so erzeugten Daten dienen als Testdatensatz für die Ermittlung der Ausbreitungsverhältnisse im Wupperverband.

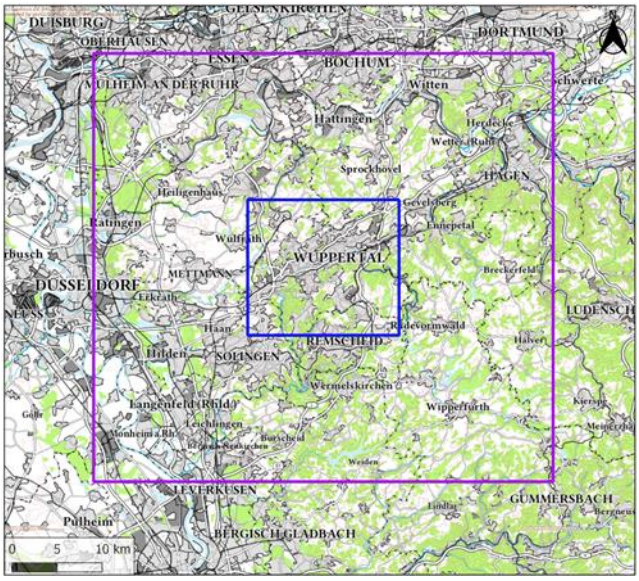


Abbildung 52: Ausschnitt Windfeldberechnung

In Abbildung 53 und Abbildung 54 sind die berechneten mittleren Windgeschwindigkeiten und die Häufigkeitsverteilungen der Windrichtungen (jede 12. Windrose) dargestellt. Die Kanalisierung des Windes in den Tälern der Wupper und anderen Flüssen, wie im Gelpe- und Saalbachtal und in Senken ist dabei gut zu erkennen. Für Immissionsprognosen in kleineren Gebieten stellt die Berechnung prognostischer Windfeldbibliotheken die erste Wahl dar. Für ganz Deutschland kann dieses Vorgehen aufgrund der langen Rechenzeit nicht realisiert werden.

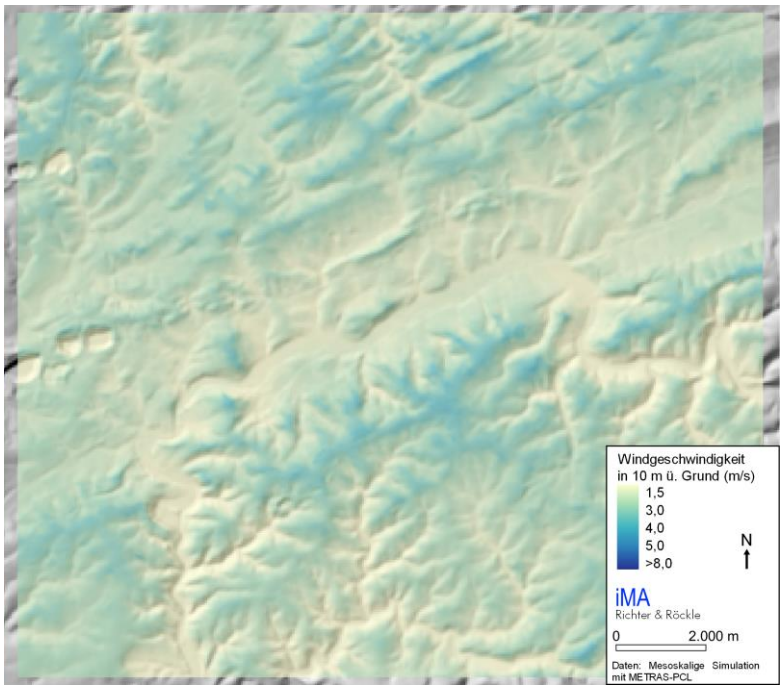


Abbildung 53: Jahresmittel der Windgeschwindigkeit berechnet mit METRAS PCL für ein Teilgebiet des Wupperverbands

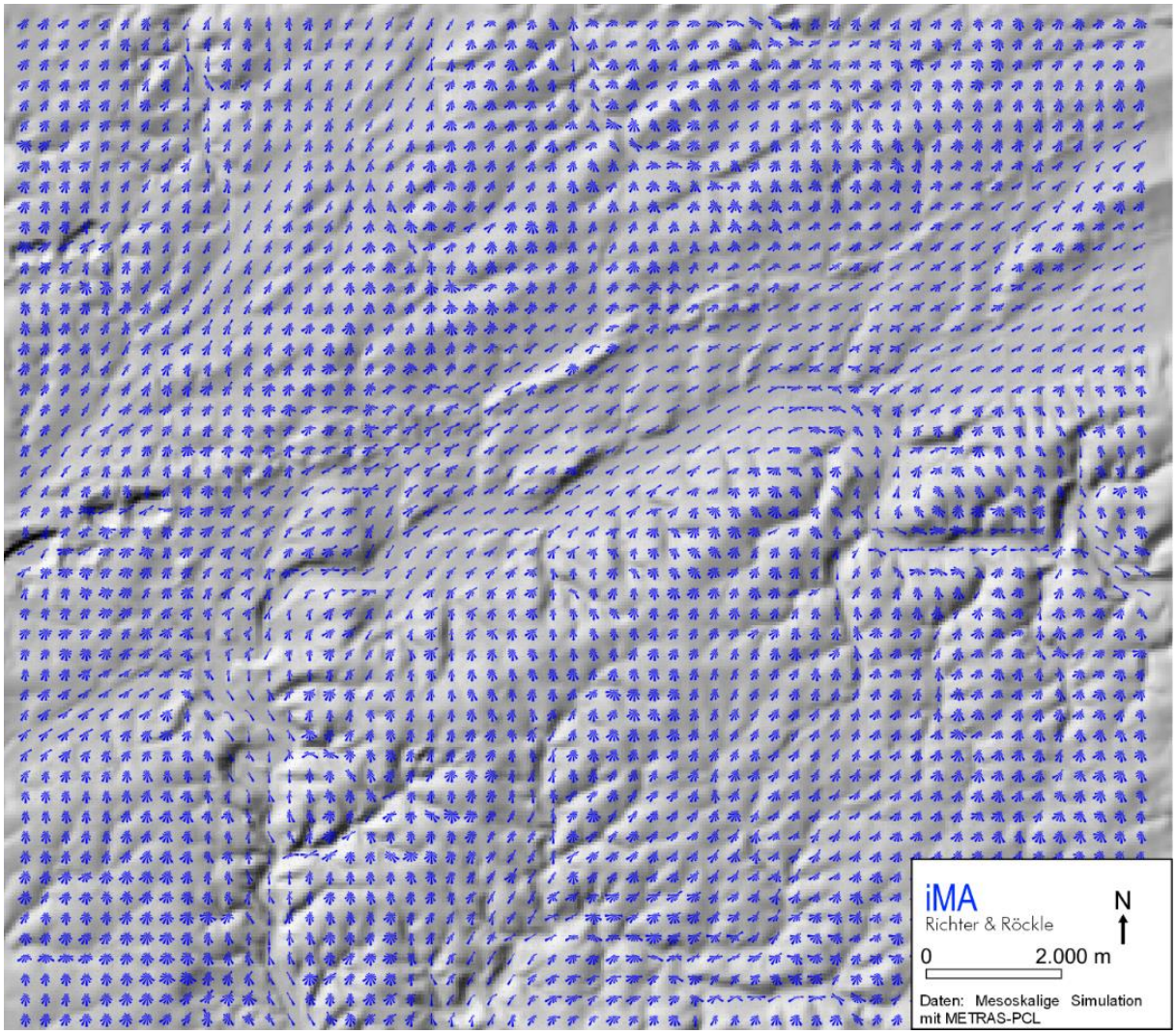


Abbildung 54: Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen berechnet mit METRAS PCL für ein Teilgebiet des Wupperverbands, dargestellt ist jede 12. Windrose

II.1.5.3.5 Geländeanalyse

Die hochauflösende Geländeanalyse wurde mit Hilfe von SAGA GIS [Conrad et al.-2015] durchgeführt. In der Analyse des digitalen Geländemodells mit 10 m x 10 m Auflösung werden zuerst die Täler und die dazugehörigen Taltiefen ermittelt. Die Linien des Haupttales werden leicht geglättet und die Richtung des Talverlaufs ermittelt. Zum andern wird der Talbereich analysiert, um die Ausdehnung abzuschätzen. Anschließend werden die Bergketten und ihre Höhe ermittelt. Nun werden allen Rasterflächen die Informationen zur Taltiefe, der Berghöhe und der Talausrichtung zugewiesen.

Die Richtung des Talverlaufs ist ein Indikator zur Ermittlung der Hauptwindrichtungen. Rasterflächen, die mindestens 80 % der nächsten Berghöhe erreicht haben, werden wiederum den übergeordneten Windverhältnissen zugeordnet. In Abbildung 55 werden die METRAS-Windrosen, die Talausrichtung und die Zuordnung zu einem übergeordneten bzw. spezifische Windregime präsentiert. Mit einigen Ausnahmen zeigte die Geländeanalyse gute Zuordnungsmöglichkeiten.

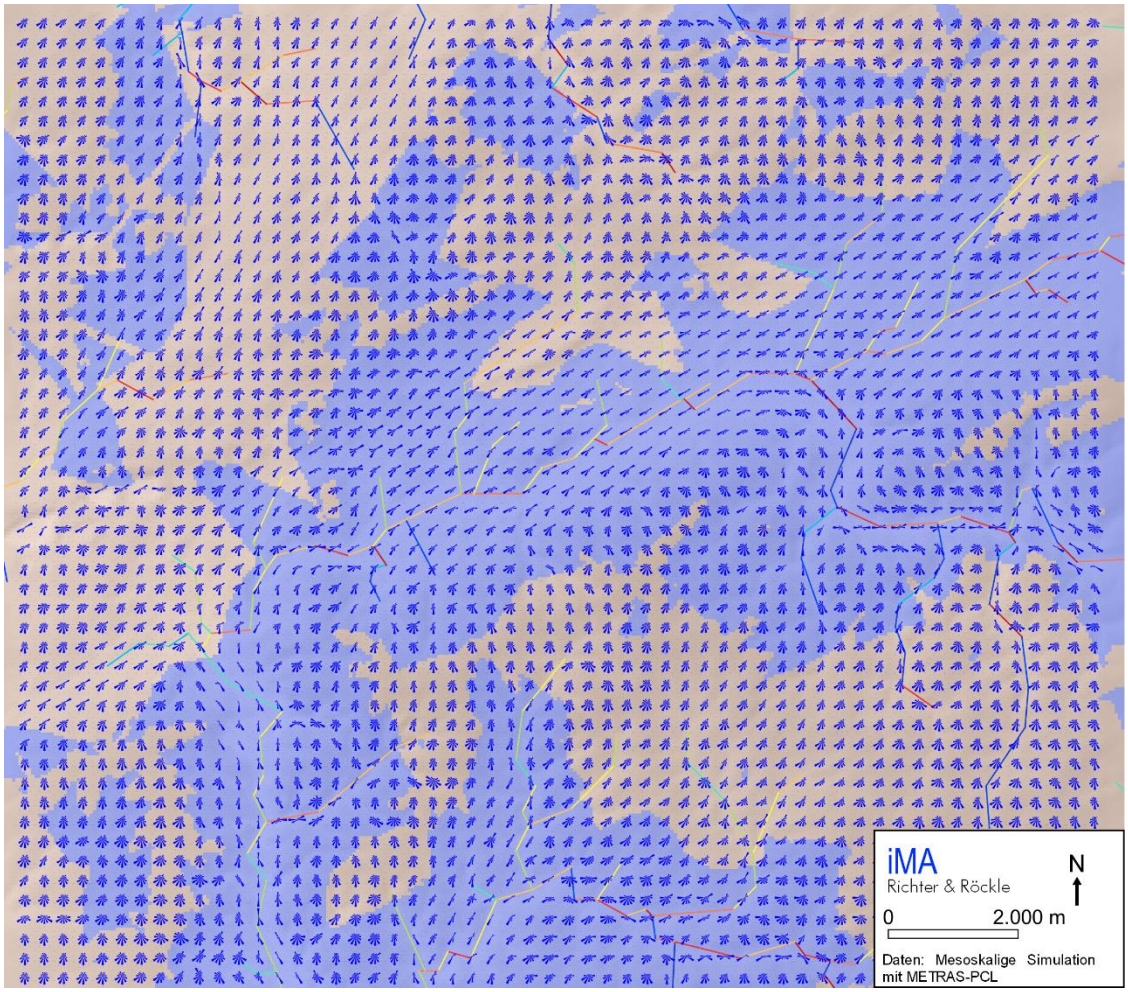


Abbildung 55: Berechnete Windrosen, Talausrichtung (farbige Linien) und Klassifizierung der Flächen nach beeinflusstem (blau hinterlegt) und übergeordnetem Windregime.

II.1.5.3.6 Anwendung neuronaler Netze zur Abschätzung der Ausbreitungsbedingungen

Künstliche neuronale Netze waren für die Abschätzung der Ausbreitungsbedingungen vorgesehen. Als Trainingsdatensatz dienen die Windstatistiken der METRAS-Simulationen für den Wupperverband. Als Eingangsdaten (Umfeldparameter) gehen die Landnutzungs- und topographischen Daten sowie die Ergebnisse aus der Geländeanalyse ein. Damit kann das Neuronale Netz mit den für den Wupperverband berechneten Daten trainiert werden und dann für ein größeres Modellgebiet angewandt werden, sofern die Umfeldparameter eine Untermenge der betrachteten Umfeldparameter darstellen.

Künstliche neuronale Netzwerke (ANN, engl. Artificial Neural Networks) sind mathematische Konstruktionen, welche, inspiriert durch die Funktionalität des menschlichen Gehirns und dessen Neuronen entwickelt wurden [McCulloch; Pitts-1943]. Die Funktionalität des Gehirns von Säugetieren, und besonders deren Fähigkeit zu Lernen, versuchen künstliche neuronale Netzwerke mathematisch zu beschreiben. Ein wichtiger Aspekt ist die Fähigkeit zur Generalisierung. Dadurch wird eine gewisse Fehlertoleranz gegenüber den Eingangsdaten erzielt.

Eine Nervenzelle eines Säugetiers besteht aus Dendriten, welche für die Aufnahme von elektrischen oder chemischen Signalen zuständig sind und diese an den Zellkörper weitergeben. Wenn das Signal einen gewissen Schwellwert übersteigt, wird es anschließend an das Axon weitergeleitet und an die nächste Nervenzelle weitergegeben.

In einem künstlichen Neuron wird eine Eingangsgröße x_{kj} gewichtet mit w_{ij} und wandert, nachdem sie mit einem Bias Θ_j multipliziert wurde, in die Übertragungsfunktion f_{act1}.

$$a_{kj} = f_{act1}\left(\sum_{i=1}^{I} w_{ij} x_{kj}\right))$$

Ein Neuron hat in der Regel mehr als nur eine Eingangsgröße. Deshalb kommen mehrschichtige Neuronen zum Einsatz. Deren einzelne Eingangsgrößen werden individuell gewichtet und bilden, mit dem Bias summiert, die Netzeingabe [Jain et al.-1996].

Die Ausgabe der Übertragungsfunktion geht als Netzeingabe in die Aktivierungsfunktion der versteckten Ebenen (hidden layers) ein. Die am häufigsten verwendeten Aktivierungsfunktionen sind die stückweise lineare, die Gauß'sche oder die Sigmoid Funktion.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-ax}} \; (0 \leq f(x) \leq 1)$$

Dabei ist *e* die Eulersche Zahl. Die Sigmoid-Funktion wird aufgrund ihrer Differenzierbarkeit üblicherweise in Rückkopplungs-(Backpropagation-) Verfahren in mehrschichtigen Netzwerken verwendet. Des Weiteren können mithilfe der Sigmoid-Funktion nichtlineare Zusammenhänge zwischen den Eingangs- und den Zielgrößen erkannt werden. Da der Wertebereich der Sigmoid-Funktion im Bereich zwischen -1 und 1 liegt, wurden die Eingangsdaten reziprokal normalisiert. In der Ausgabenebene erhalten die Ergebnisse aus den versteckten Ebenen a_{kj} erhält wiederum ein Gewicht w_{jk} und einen Bias Θ_k. Hier wurde eine lineare Funktion f_{act2} gewählt um als Ergebnis $\hat{y}_p$ eine kontinuierliche Größe zu erzeugen.

$$\hat{y}_p = f_{act2} \sum_{j=1}^{J} w_{jk} x_{jp}$$

Bei Anwendung eines mehrlagigen feed-forward Netzwerks mit Kombination eines back-propagation Algorithmus [Rumelhart; McClelland-1986] wird während des Trainings jeder Kombination von Eingangsgrößen ein Zielwert gegenübergestellt. Dieser stimmt in der Regel zuerst nicht mit dem Modellergebnis überein. Um das ANN zu trainieren, werden die zufällig initialisierten Werte der Gewichtung und der Bias so verändert, dass der mittlere quadratische Fehler (Gl. 3.8) zwischen Zielwert und Modellergebnis minimiert wird.

$$E_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (t_k - \hat{y}_p)$$

Um das globale Minimum des Fehlers zu finden, wird das Gradientenabstiegsverfahren im back-propagation Algorithmus herangezogen [Rumelhart; McClelland-1986]. Das Gradientenabstiegsverfahren ermöglicht für jedes einzelne Verbindungsgewicht w_{ij} den Wert zu finden, welcher den Lernfehler E_k minimiert. Dabei wird die Propagierung des Fehlers dem vorwärts gerichteten Informationsfluss im Netz entgegengesetzt und dabei die Fehlergradienten jedes Verbindungsgewichtes berechnet. Der Fehlergradient ist die partielle Ableitung der Fehlerfunktion an den einzelnen Verbindungsgewichten.

Da ANNs nichtlineare Muster zwischen Eingangs- und Zielparameter erkennen können, sind sie besonders hilfreich, wenn die Beziehungen zwischen den Variablen nicht bekannt oder sehr komplex sind [Masters-1995]. Dabei zählen künstliche neuronale Netzwerke zu den nichtparametrischen Modellen, da der funktionale Zusammenhang zwischen der Eingabe (unabhängige Parameter) und Ausgabe (abhängiger Parameter) nicht physikalisch interpretierbar ist [Jain et al.-1996].

Die Anzahl der versteckten Ebenen entspricht der Anzahl an Eingangsgrößen minus eins. Das ANN wird z.B. mit 60% der Daten trainiert und mit jeweils 20% validiert und getestet. Dazu werden die Daten zufällig aufgeteilt.

Da Ausbreitungsstatistiken dreidimensionale Datensätze darstellen, sollten diese klassifiziert werden, um ähnliche Statistiken zusammenzufassen. Dazu wurden verschiedene statistische Methoden, wie die hierarchische Clusteranalyse, eine Hauptkomponentenanalyse sowie die k-Means Methode getestet [Beaver; Palazoglu-2006]. Ausgewählt wurde die k-mean Methodik als ein iterativer Algorithmus, welcher vergleichsweise die besten Ergebnisse erzielte. Dabei muss die Anzahl an Clustern vorgegeben werden, um kohärentes Clustern sicherstellen zu können. Das Ergebnis der Clusteranalyse war aber nicht zufriedenstellend, auch weil nicht alle Windregime ausreichend abgebildet werden können. Deshalb wurde diese Methode verworfen.

Eine bessere Möglichkeit zur Abbildung der dynamischen Situation stellt eine Kombination der TRY-Daten und des Windgeschwindigkeitsdatensatzes aus den Weibull-Datensätzen, beide bereitgestellt durch den Deutschen Wetterdienst dar.

Da die TRY-Daten das Gelände nur unbefriedigend auflösen, kann die Windgeschwindigkeit mit der Windgeschwindigkeit der Weibull-Datensätze, welche die Topographie besser abbilden, skaliert werden. Auf dieser Datengrundlage werden die Ausbreitungsstatistiken wieder für 200 m Auflösung neu berechnet. Die Windrichtung der TRY-Daten ist allerdings nur für die übergeordneten Windverhältnisse repräsentativ.

Bei belastbareren Eingangsdaten lässt sich damit eine erste Näherung der lokalen Windverhältnisse erzielen. Entsprechende Windrosen und Ausbreitungsstatistiken konnten zwar erstellt werden, bringen aber bei erheblichem Mehraufwand keine signifikant anderen Stoffeinträge, da die großen Partikel wenig sensibel auf die meteorologischen Randbedingungen reagieren.

Letztendlich wurde deshalb eine Einheitsmeteorologie verwendet, die anhand der Windgeschwindigkeiten aus dem Weibull-Datensatz skaliert wurden.

II.1.5.4 Sensitivitätsanalyse

Die meteorologischen Verhältnisse bestimmen die Ausbreitungsverhältnisse. Dabei werden vor allem die kleinen Korngrößen stärker mit dem Wind verfrachtet, während die großen Korngrößen rasch sedimentieren. Inwieweit die meteorologischen Größen die Deposition beeinflussen, wurde mittels einer umfangreichen Sensitivitätsanalyse untersucht.

Dazu wurde eine quaderförmige Quelle mit einem Grundriss von 10 m x 10 m und einer Höhe von 3 m betrachtet. Für jede Korngrößenklasse wurde eine Einheitsemission von 1 g/s angesetzt. Die Anströmung erfolgte aus 270° mit 2 m/s. In Abbildung 56 ist das Testszenario skizziert.

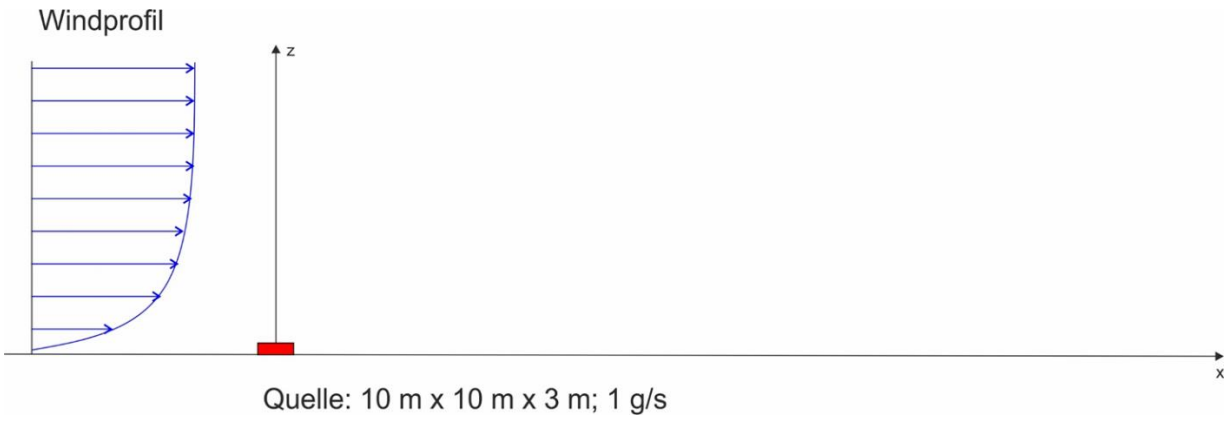


Abbildung 56: Testszenario für Sensitivitätsstudie

Variiert wurden Rauigkeit, Verdrängungshöhe, Windgeschwindigkeit, Ausbreitungsklasse und der Einfluss von Randbebauung. Die Immissionen bzw. Depositionen wurden auf der Achse durch die Quelle von West nach Osten, also in Windrichtung abgegriffen.

Betrachtet wurden die 4 Korngrößenklassen nach TA Luft (pm-1 bis pm-4) sowie die großen Abriebpartikel (100 – 500 µm). Der Durchmesser und die Sedimentations- und Depositionsgeschwindigkeit sind in Tabelle 7Tabelle 6 aufgeführt. Die Größenverhältnisse vermittelt Abbildung 57. Die Dichte von reinem Gummiabrieb beträgt ca. 1,2 g/cm^3 [Kreider-2010]. Zusammen mit dem Straßenabrieb ergibt sich eine Dichte von 1,8 g/cm³. Insbesondere die großen Partikel sind damit so schwer, dass sie nicht über längere Zeit in der Luft schweben, sondern sich ablagern.

Tabelle 7: Betrachtete Partikelgrößen mit ihrer Depositionsgeschwindigkeit und Sedimentationsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Korngrößenklasse KGK.

Stoff	TA Luft	Korngrößen	Depositionsgeschw.	Sedimentationsgeschw.
KGK-1	pm-1	≤ 2,5 µm	0,00 m/s	0,001 m/s
KGK-2	pm-2	2,5 – 10 µm	0,01 m/s	0,01 m/s
KGK-3	pm-3	10 – 50 µm	0,05 m/s	0,04 m/s
KGK-4	pm-4	50 – 100 µm	0,20 m/s	0,15 m/s
KGK-5	(pm-5)	100 – 500 µm	1 m/s	1 m/s

Die Sedimentationsgeschwindigkeit wurde nach der Stokeschen Gleichung berechnet.

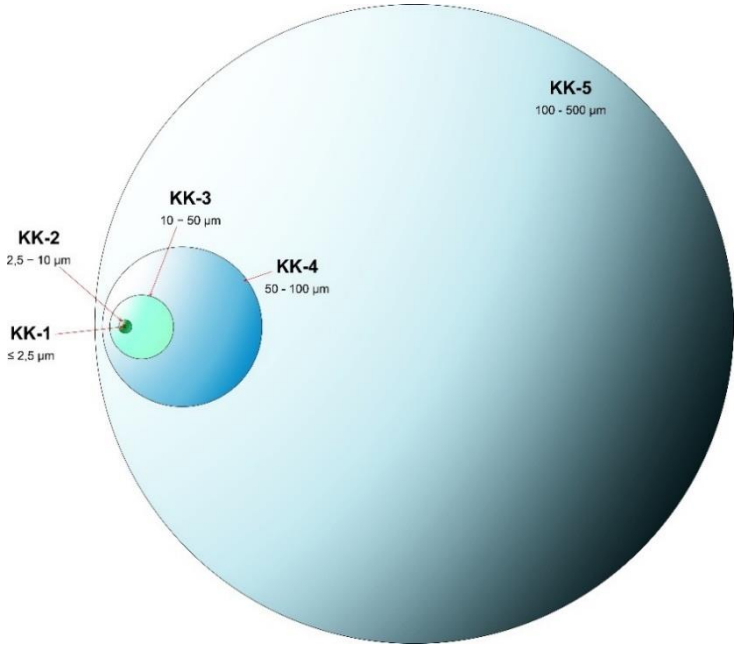


Abbildung 57: Größenverhältnisse der betrachteten Partikel

Exemplarisch werden aus den 450 Datensätzen die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst.

Variation der Korngrößenklasse bei Ausbreitungsklasse 1

Während die großen Partikel (pm-4) quellnah deponieren, werden der Großteil der kleinen Partikel (pm-1) mit der Luft verfrachtet und nur ein kleiner Teil deponiert (Abbildung 58).

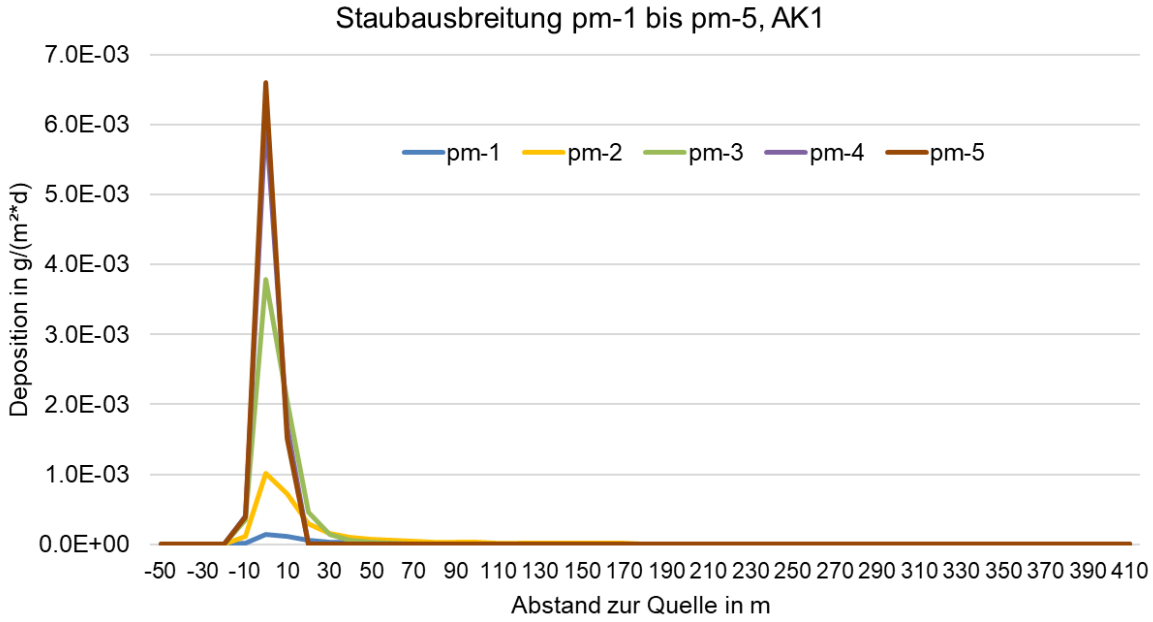


Abbildung 58: Depositionsverhältnisse für die betrachteten Korngrößenklassen.

Relevant für die deponierte Masse sind die großen Partikel. Stäube unter 10 µm spielen hinsichtlich der Masse eine untergeordnete Rolle. Auch deshalb, da der Anteil dieser kleinen Partikel mit ca. 10 % an den Gesamtemissionen gering ist.

Variation der Rauigkeit

Die aerodynamische Rauigkeit des Untergrunds beeinflusst die Ausbreitung in zweierlei Hinsicht. Zum einen wird das Strömungsprofil geprägt. Bei hoher Rauigkeit nimmt die Windgeschwindigkeit mit der Höhe langsamer zu als bei glattem Untergrund. Zum andern verursacht ein rauer Untergrund mehr Turbulenz, was zu einer größeren Verdünnung der Spurenstoffe und damit zu geringeren Depositionen führt.

Die mittlere Rauhigkeitslänge wurde für ganz Deutschland dem digitalen Landschaftsmodell (ATKIS-Daten) nach der Klassifizierung in der TALuft (2002) zugeordnet (Tabelle 8).

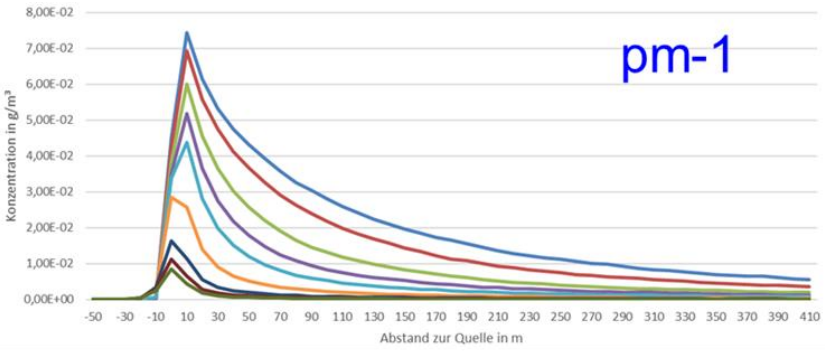
Tabelle 8: Mittlere Rauhigkeitslänge z_0 in Abhängigkeit von den Landnutzungsklassen des CORINE-Katasters (TALuft 2002, S. 214).

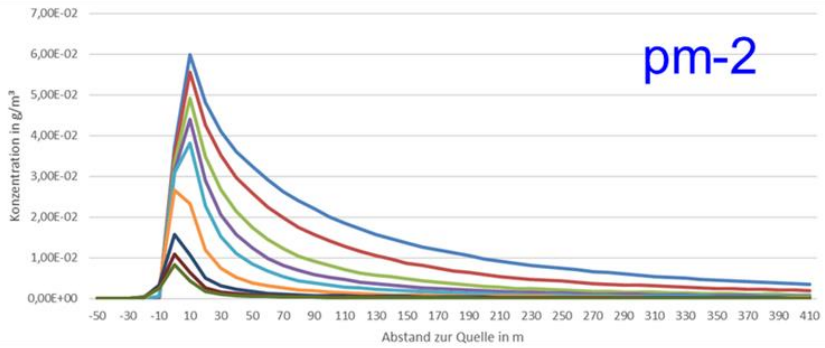
z_0 in m	Landnutzungen (mit Kennzahlen der CORINE-Landnutzung)
0,001	Strände, Dünen und Sandflächen (331); Wasserflächen (512)
0,02	Deponien und Abraumhalden (132); Wiesen und Weiden (231); Natürliches Grünland (321); Flächen mit spärlicher Vegetation (333); Salzwiesen (421); In der Gezeitenzone liegende Flächen (423); Gewässerläufe (511); Mündungsgebiete (522)
0,05	Abbauflächen (131); Sport– und Freizeitanlagen (142); Nicht bewässertes Ackerland (211); Gletscher und Dauerschneegebiete (335); Lagunen (521)
0,10	Flughäfen (124); Sümpfe (411); Torfmoore (412); Meere und Ozeane (523)
0,20	Straßen, Eisenbahn (122); Städtische Grünflächen (141); Weinbauflächen (221); Komplexe Parzellenstrukturen (242); Landwirtschaft und natürliche Bodenbedeckung (243); Heiden und Moorheiden (322); Felsflächen ohne Vegetation (332)
0,50	Hafengebiete (123); Obst– und Beerenobstbestände (222); Wald-Strauch–Übergangsstadien (324)
1,00	Nicht durchgängig städtische Prägung (112); Industrie– und Gewerbeflächen (121); Baustellen (133); Nadelwälder (312)
1,50	Laubwälder (311); Mischwälder (313)
2,00	Durchgängig städtische Prägung (111)

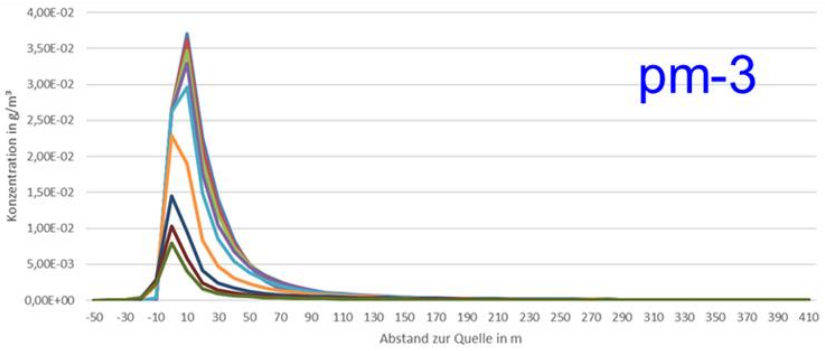
Die Abhängigkeiten der Partikelkonzentration in der Luft ist in Abbildung 59 dargestellt. Die höchsten Konzentrationen ergeben sich an der Quelle. Die Konzentration nimmt bei den kleinen Partikeln langsamer mit der Entfernung ab als bei den großen.

Die Deposition für die 4 Korngrößenklassen sind in Abbildung 60 aufgeführt. Zum einen ist erkennbar, dass mit zunehmender Rauigkeit die Deposition zurückgeht. Der Rückgang ist stärker als bei der Konzentration. Zum andern ist zu sehen, dass mit zunehmender Korngröße die Partikel auch zunehmend quellnah abgelagert werden.

Der Effekt, dass die Depositionsgeschwindigkeiten mit zunehmender Rauigkeit zunehmen, ist hier nicht berücksichtigt.







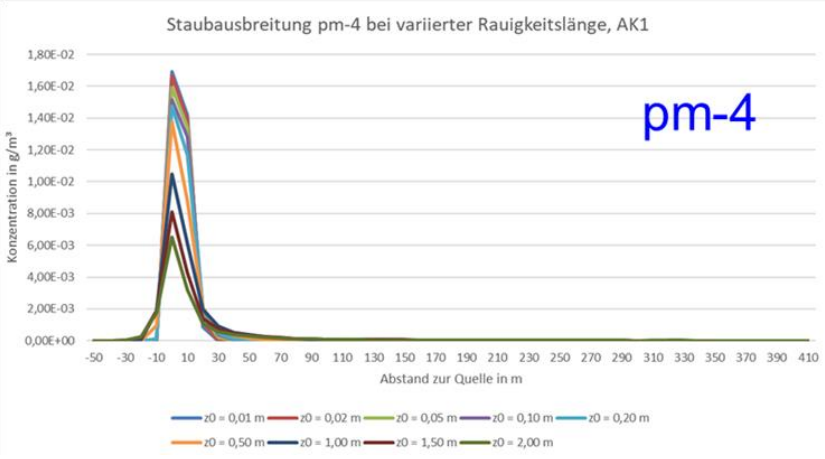


Abbildung 59: Konzentrationsverhältnisse bei unterschiedlichen Rauigkeiten.

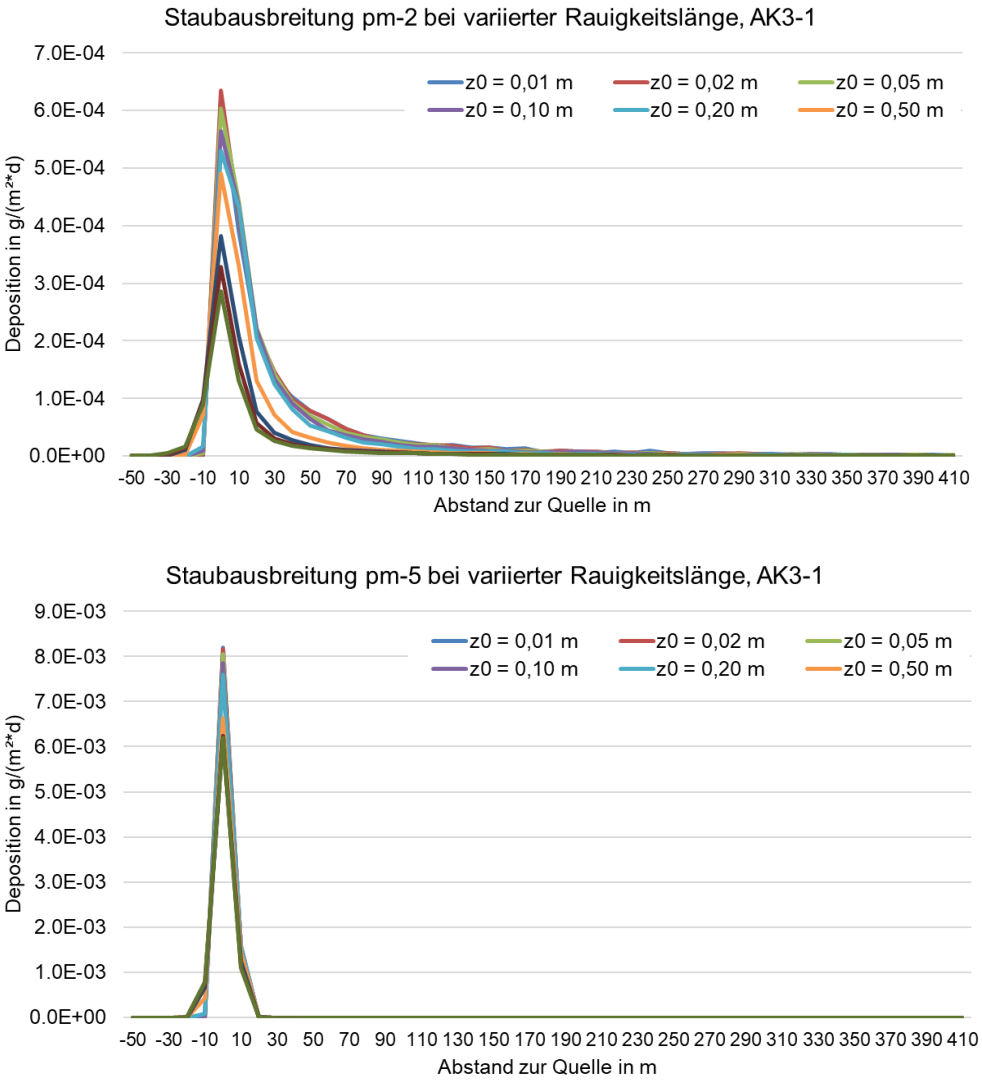


Abbildung 60: Depositionsverhältnisse von pm-2 und pm-5 bei unterschiedlichen Rauigkeiten und Ausbreitungsklasse 3-1.

Variation der Windgeschwindigkeit

Mit zunehmender Windgeschwindigkeit werden die Partikel schneller verlagert. Die Deposition in Quellnähe geht deutlich zurück. In Abbildung 61 sind exemplarisch für pm-2 und pm-5 die Depositionen bei unterschiedlicher Windgeschwindigkeit und neutraler Schichtung (AK3-1) dargestellt. Die abgelagerte Masse je m² skaliert bei kleinen Partikeln in etwa mit dem Kehrwert der Windgeschwindigkeit, d.h. doppelte Windgeschwindigkeit bedeutet halbierte Deposition. Große Partikel sind dagegen deutlich geringer von der Windgeschwindigkeit abhängig.

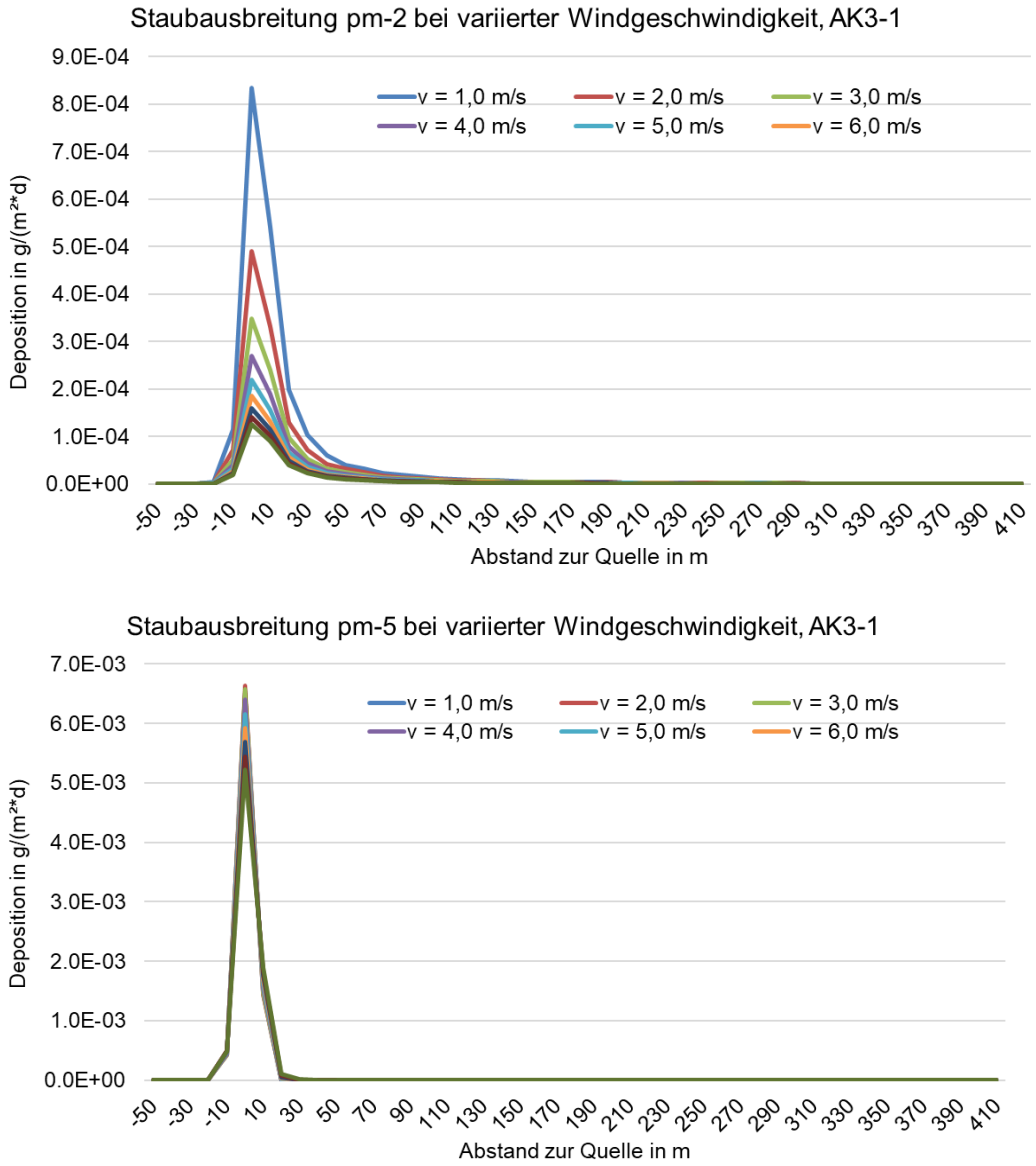


Abbildung 61: Depositionsverhältnisse von pm-2 und pm-5 bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten.

Variation der Ausbreitungsklassen

Der Turbulenzzustand bzw. die atmosphärische Schichtung wird durch Ausbreitungsklassen (AK) beschrieben, die ein Maß für das „Verdünnungsvermögen" der Atmosphäre sind. Die Eigenschaften der Ausbreitungsklassen sind in Tabelle 9 beschrieben. Stabile Schichtungen (AK1 und AK2) treten hauptsächlich in wolkenarmen und windschwachen Nachtstunden auf. Die Turbulenz ist dann stark reduziert.

Bei höheren Windgeschwindigkeiten ist die Atmosphäre in der Regel gut durchmischt. Diese Verhältnisse werden durch die Ausbreitungsklassen AK3-1 und AK3-2 charakterisiert. Labile Schichtung tritt an sonnigen und windschwachen Tagen auf (AK4 und AK5). Die Turbulenz wird dann durch die Konvektion geprägt.

Tabelle 9: Eigenschaften der Ausbreitungsklassen

Ausbreitungsklasse	Atmosphärischer Zustand, Turbulenz
I	sehr stabile atmosphärische Schichtung, ausgeprägte Inversion, geringes Verdünnungsvermögen der Atmosphäre
II	stabile atmosphärische Schichtung, Inversion, geringes Verdünnungs-vermögen der Atmosphäre
III_1	stabile bis neutrale atmosphärische Schichtung, zumeist windiges Wetter
III_2	leicht labile atmosphärische Schichtung
IV	mäßig labile atmosphärische Schichtung
V	sehr labile atmosphärische Schichtung, starke vertikale Durchmischung der Atmosphäre

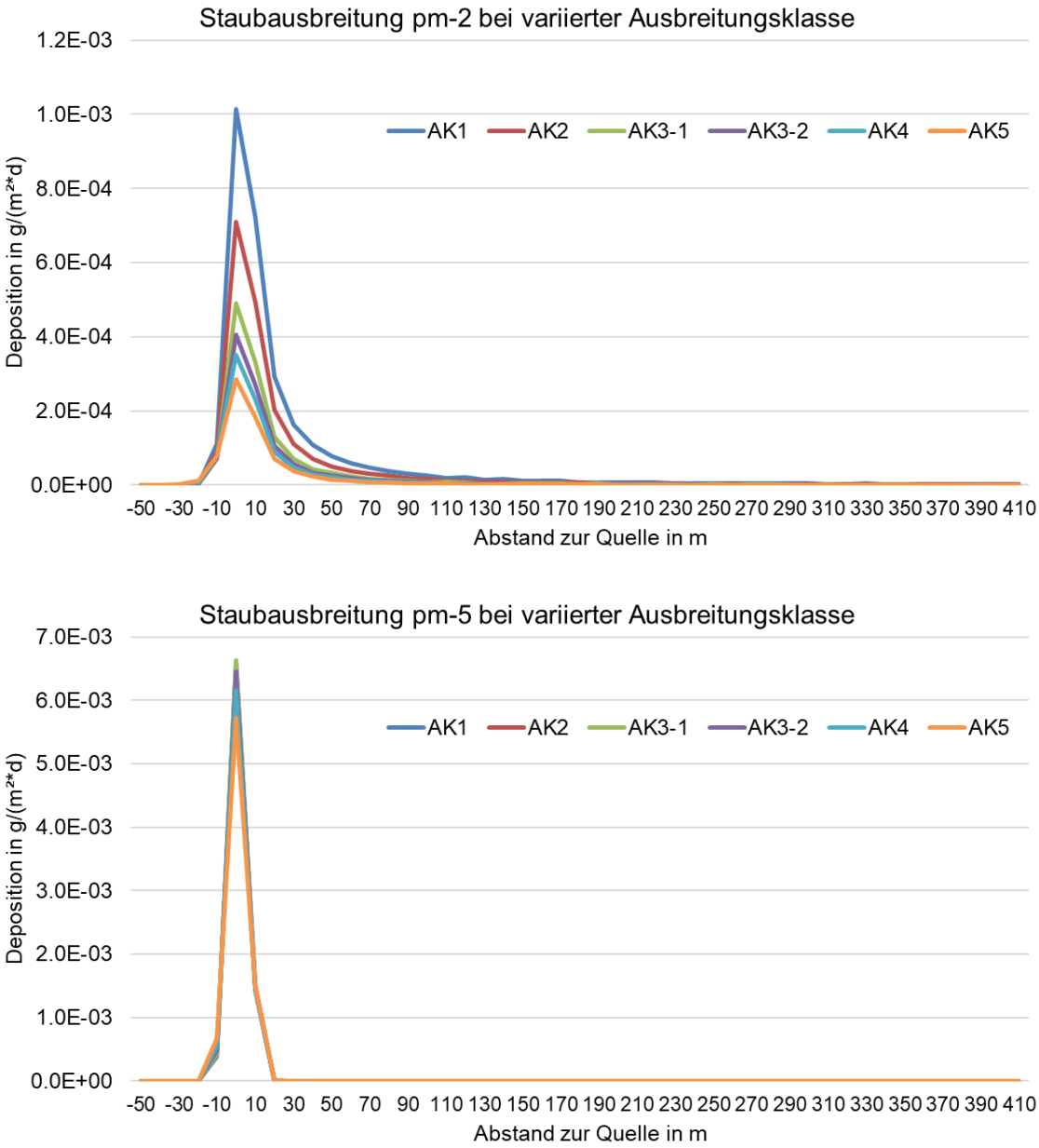


Abbildung 62: Depositionsverhältnisse von pm-2 und pm-5 bei unterschiedlichen Ausbreitungsklassen (AK).

In Abbildung 62 sind exemplarisch die Verläufe für pm-2 und pm-5 dargestellt. Je höher die Turbulenz, desto stärker werden Spurenstoffe – insbesondere die kleinen Korngrößenklassen – verdünnt. Die Deposition ist folglich bei den labilen Ausbreitungsverhältnissen geringer als bei den stabilen Schichtungen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden:

- Massemäßig sind die großen Korngrößen (> 50 µm) am relevantesten. Die kleinen Korngrößen tragen kaum zum Stoffeintrag bei.
- Die Deposition großer Partikel (pm-4 und pm-5) ist wenig von meteorologischen Bedingungen abhängig.

- Die Deposition skaliert bei kleinen Korngrößenklassen nahezu mit dem Reziprokwert der Windgeschwindigkeit.
- Die Ausbreitungsklasse ist bei kleinen Korngrößen im Nahbereich interessant, bei großen Korngrößen aber kaum von Bedeutung.
- Die Rauigkeit bewirkt dynamische Turbulenz und beeinflusst die Verdünnung der Spurenstoffe und damit auch die Deposition. Allerdings ist die Depositionsgeschwindigkeit ebenfalls von der Landnutzung abhängig, so dass der Effekt auf die Deposition geringer ausfällt als nur bei Betrachtung der Rauigkeit.
- Bei Windrichtungen parallel zur Straße wird insbesondere bei den kleinen Korngrößenklassen mehr im Straßenraum abgelagert als bei Wind quer zur Straße. Bei großen Partikeln ist die Aufenthaltsdauer in der Atmosphäre gering, so dass dieser Effekt weniger zu Buche schlägt.
- In Straßenschluchten ist die Ausbreitung senkrecht zur Straße durch Gebäude limitiert. Hier ergaben sich im Straßenraum abhängig von der Anströmrichtung keine großen Unterschiede bei der Deposition.

Für die Berücksichtigung der meteorologischen Verhältnisse ergibt sich unter dem Aspekt, dass die großen Partikel weniger verfrachtet werden und massebezogen den größten Anteil an der Deposition ausmachen, eine Fokussierung auf die Windgeschwindigkeit und die vorherrschenden Windrichtungen. Ist das Verhältnis von Windgeschwindigkeit zur Sedimentationsgeschwindigkeit hoch, so ist die Wahrscheinlichkeit, dass Partikel den Straßenraum verlassen ebenfalls hoch, d.h. insbesondere die kleinen Partikel werden tendenziell eher verweht. Die Windrichtung ist in Bezug auf die Ausrichtung der Straße von Bedeutung. Bei Wind parallel zur Straße verbleiben die Partikel eher im Straßenraum als bei Wind senkrecht zur Straßenausrichtung.

II.1.5.5 Ausbreitungsmodellierung

Für den weiteren Transportweg (z.B. Eintrag in das Kanalisationsnetz) ist es wichtig, wo die Partikel deponiert werden. Auf versiegelten innerstädtischen Bereichen ist davon auszugehen, dass bei Niederschlagsereignissen mit hinreichend Wasserangebot die Reifenpartikel in die Kanalisation eingetragen werden. Auf Straßen, die nicht an das Kanalnetz angeschlossen sind, wie Überlandstraßen, wird der Partikelanteil, der in Wasser- oder Abwassernetze gelangt, eher gering sein.

Um eine Verschneidung der berechneten Stoffeintragsflächen mit versiegelten Bereichen zu ermöglichen, ist eine hohe räumliche Auflösung anzustreben. Bei 50 m x 50 m-Flächen ist dies zumindest in heterogen bebauten/versiegelten Gebieten kaum zu bewerkstelligen.

In Abbildung 63 ist eine solche für Vororte und Dörfer eher typische Bebauung dargestellt. Bei 50 m x 50 m-Flächen ist kaum eine sinnvolle Zuordnung zu versiegelten Flächen möglich. Eine rein prozentuale Betrachtungsweise ist aufgrund der zu erwartenden großen Gradienten in Straßennähe wenig zielführend.

Abbildung 64 zeigt einen Ausschnitt mit eine 10 m x 10 m-Raster. Auch hier wird man mit prozentualen Anteilen Versiegelt/Gesamtfläche arbeiten müssen. Es ergibt sich jedoch eine deutlich bessere Auflösung, auch bei starken Konzentrationsgradienten.

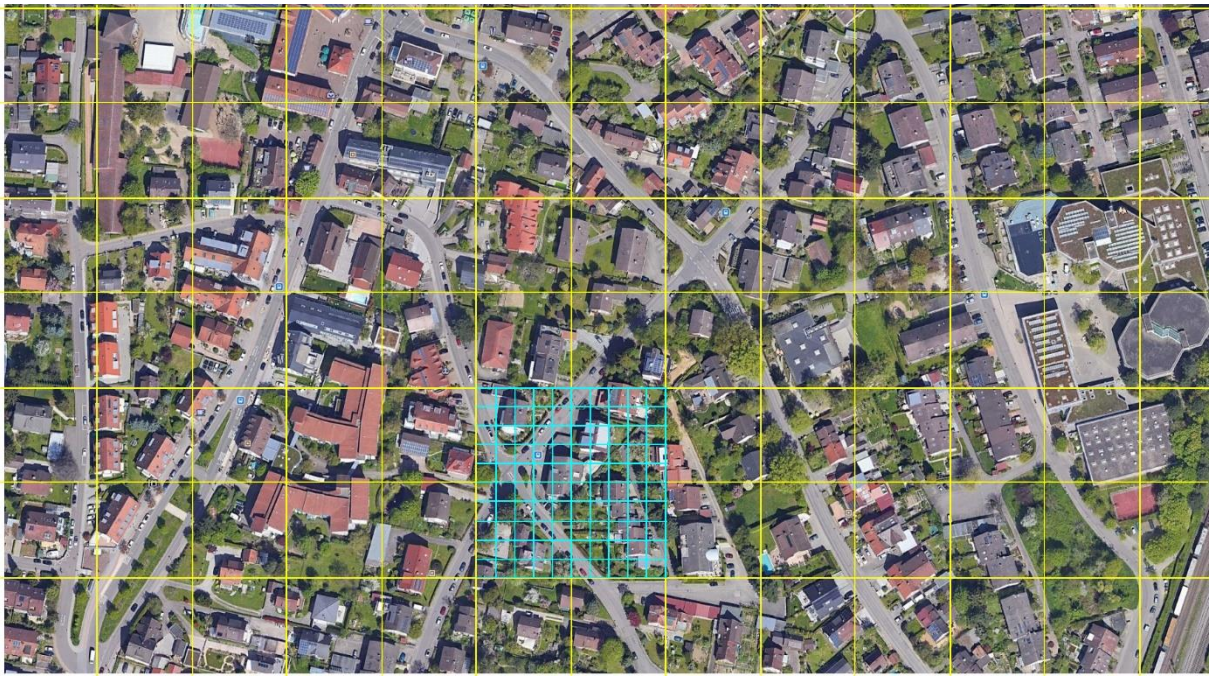


Abbildung 63: Heterogene Bebauung mit Raster 50 m x 50 m (gelb) und 10 m x 10 m (blau)

Abbildung 64: Heterogene Bebauung Ausschnitt mit Raster 10 m x 10 m (blau)

Als Kompromiss zwischen Handhabbarkeit und Genauigkeit werden 10 m angesehen.

Exemplarisch wurde für einen kleinen Ausschnitt aus dem Panke-Gebiet mit einer Auflösung von 1 m gerechnet, da bei typischen innerstädtischen Straßenbreiten von 5,5 m bei 10 m Auflösung schon 45 % der Fläche neben dem Straßenraum liegen.

II.1.5.5.1 Modellbildung

Bei einer Auflösung von 10 m sind mit dem vorgesehenen Ausbreitungsmodell LASAT nur relativ kleine Gebiete (wenige Quadratkilometer) explizit berechenbar. Um großflächig – letztendlich deutschlandweit – Aussagen treffen zu können, muss ein effizienteres Schema entwickelt werden.

Die Straßen (und andere Quellen wie z.B. Flugplätze) liegen als Polygone vor. Jedes Polygon ist gekennzeichnet durch den Verlauf der Straßenmitte, einer Straßenbreite und den streckenbezogenen Emissionen (siehe Abbildung 65).

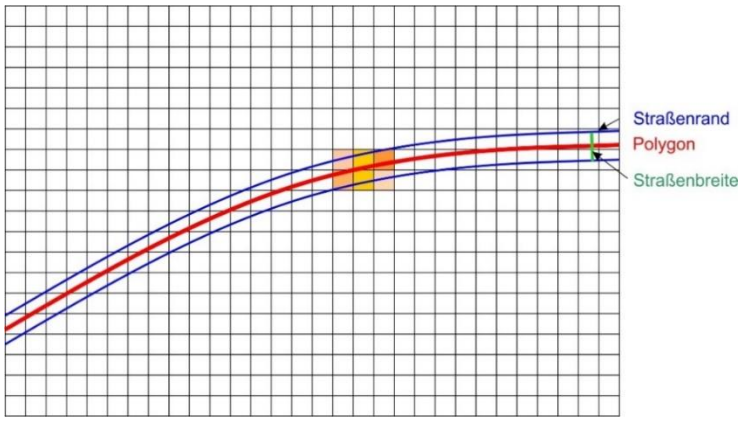


Abbildung 65: Skizze mit Straßenpolygon (rot), den Straßenrändern (blau) und den auf ein Emissionsraster übertragenen Emissionen (nur Ausschnitt, orangefarben)

Auf einem Raster, das identisch zum Zielraster ist, werden die streckenbezogenen Emissionen anhand des Flächenanteils der Straße in jede Rasterzelle übertragen. Exemplarisch ist dies in Abbildung 65 für einen kleinen Ausschnitt erfolgt. Bei komplexen Situationen (Kreuzungen, Kreisverkehre usw.) addieren sich die einzelnen Beiträge jedes Polygons zur Gesamtemissionen in jeder Zelle.

Für Referenzfälle, die abhängig von den meteorologischen Verhältnissen sind, erfolgen Depositionsberechnungen mit einer Einheitsemission für eine Punktquelle im Zentrum Referenzgebietes, das der Auflösung des Auswerterasters (10 m x 10 m) entspricht. Für jeden Referenzfall wird so ein Immissionsfeld erzeugt.

Ein flächendeckendes Immissionsfeld wird durch Überlagerung der jeweiligen anzuwendenden Referenzfälle erzeugt, die mit den Emissionen der Quellzelle normiert werden.

Vorteile sind:

- Behandlung komplexer Straßennetze
- Beherrschbarer Rechenaufwand bei hinreichender Auflösung
- Schnelle Anpassung durch Änderung der Referenzfälle
- Behandlung von Brücken durch Referenzfälle mit abgehobenen Quellen

In Abbildung 66 ist exemplarisch ein Referenzdepositionsfeld dargestellt. Zu beachten ist, dass die Unterteilung der Deposition stark nichtlinear ist. Der höchste Eintrag ist in der Zelle mit der Quelle zu finden. Mit zunehmendem Abstand zur Quelle gehen die Depositionen exponentiell zurück.

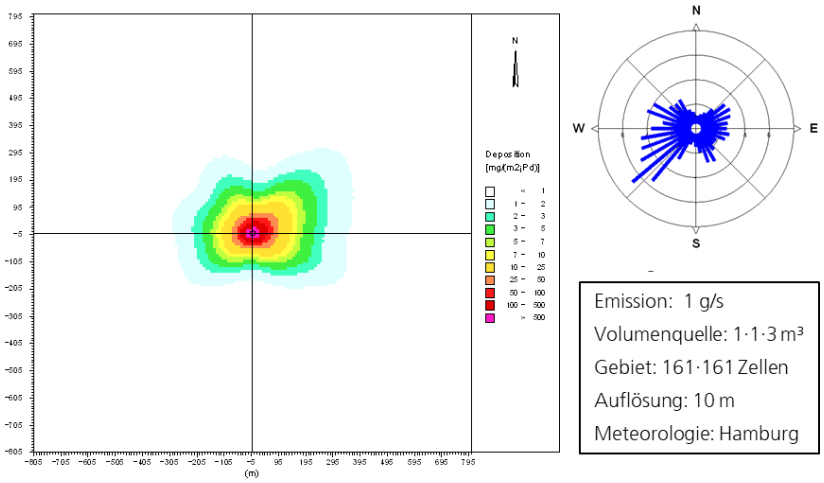


Abbildung 66: Referenzdepositionsfeld mit den meteorologischen Daten von Hamburg

Aufgrund der Datengröße lässt sich ganz Deutschland nicht im 10 m-Raster berechnen. Deshalb erfolgte die Berechnung Bundesland-fein.

Um gegebenenfalls eine andere Gewichtung der Korngrößenklassen vornehmen zu können, erfolgte die Berechnung getrennt für jede Korngröße, wobei die kleinste Korngrößenklasse (< 2,5 µm) der nächsten Korngrößenklasse (2,5 µm – 10 µm) zugeordnet wurde.

Anhand der berechneten Depositionen von Berlin sollen die Ergebnisse veranschaulicht werden. In Abbildung 67 oben sind die Reifenabriebdeposition (TWP) in mg/(m²·d) für die Korngrößenklasse 100 – 500 µm dargestellt. Das Straßenraster lässt sich noch gut erkennen. Rechts unten ist ein Ausschnitt im Bereich Westkreuz/Theodor-Heuss-Platz dargestellt, bei dem die 10 m Auflösung etwas besser zur Geltung kommt. Die Maxima findet man im Zuge der stark befahrenen Hauptverkehrswege und dort in kurvigen Bereichen oder an Kreuzungen. Hier ist zu beachten, dass die Einteilung der Deposition logarithmisch erfolgte, d.h. bläuliche Bereiche ca. den Faktor 100 bis 1000 unter den Depositionen im Straßenraum liegen.

Abbildung 67 unten zeigt die Depositionen für die Korngrößenklasse 50 – 100 µm. Die Gradienten sind schon weniger ausgeprägt. Allerdings vermittelt die logarithmische Einteilung der Deposition einen falschen Eindruck über die wirklichen Verhältnisse Hier liegen die Stoffeinträge abseits der Straßen immer noch um den Faktor 10 bis 100 unter den Werten im Straßenraum.

Abbildung 68 zeigt ergänzend die Depositionen für die Korngrößenklasse 10 – 50 µm (oben) und < 10 µm (unten). Die geringsten Gradienten ergeben sich bei den Feinstäuben (PM10). Allerdings sind hier die Beiträge zur deponierten Masse nur noch sehr gering.

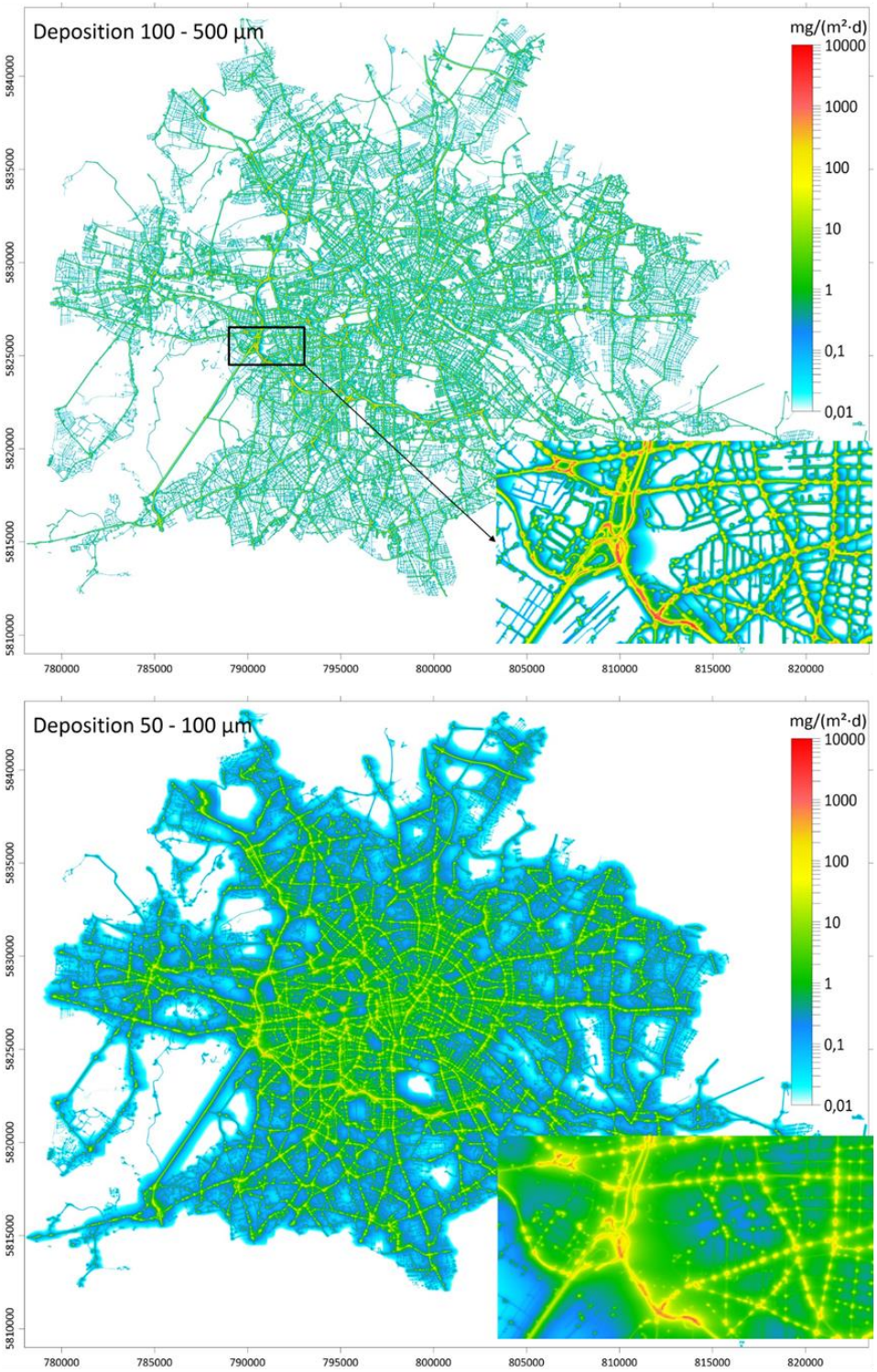


Abbildung 67: Deposition Reifenabrieb Berlin. Korngrößen 100 – 500 µm (oben), 50 – 100 µm (unten) und jeweils Ausschnitt im Bereich Westkreuz

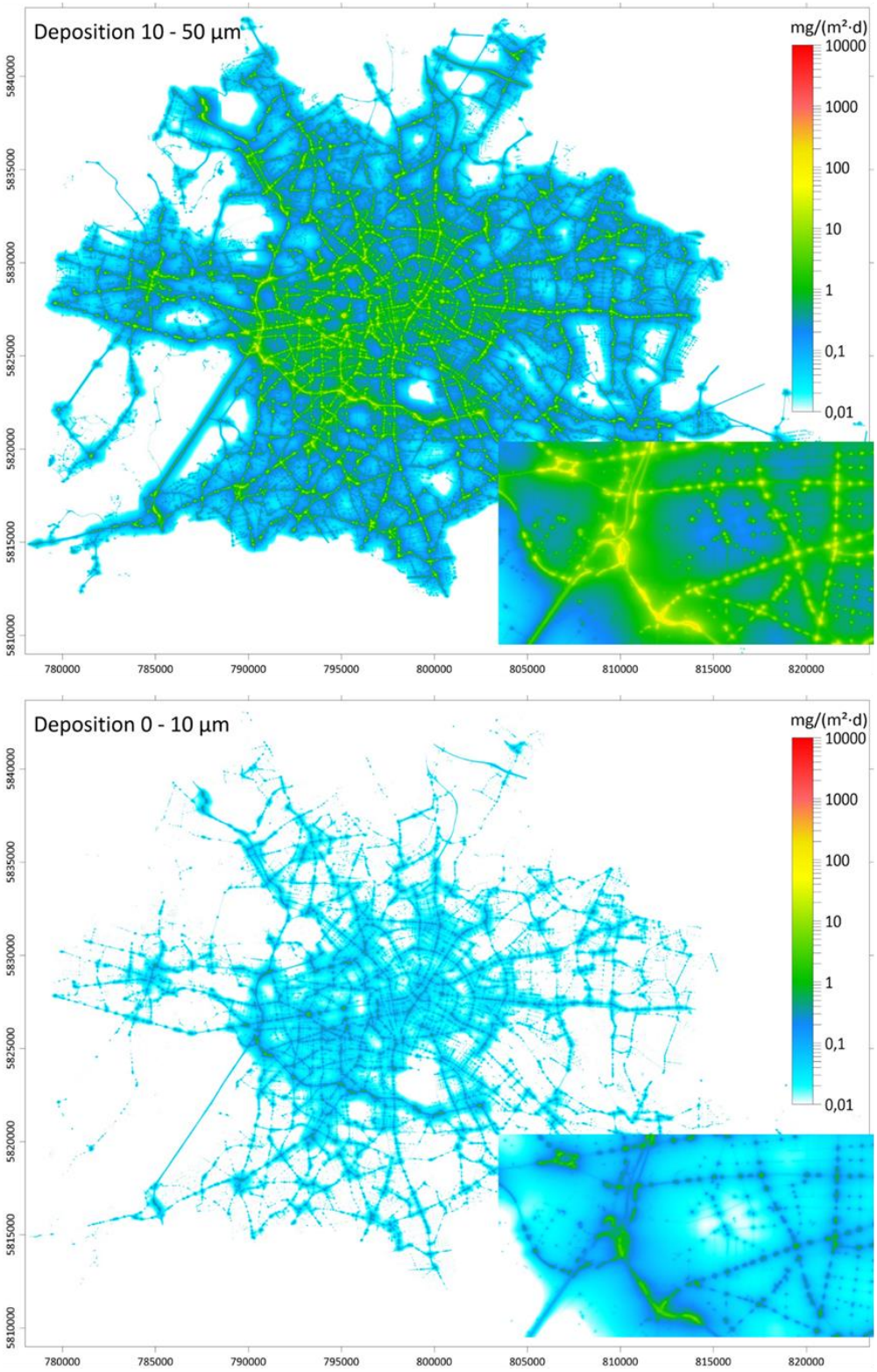


Abbildung 68: Deposition Reifenabrieb Berlin. Korngrößen 10 – 50 µm (oben), 0 – 10 µm (unten) und jeweils Ausschnitt im Bereich Westkreuz

Die Überlagerung der Depositionen, d.h. die Gesamtdeposition an Reifenabrieb, ist in Abbildung 69 dargestellt.

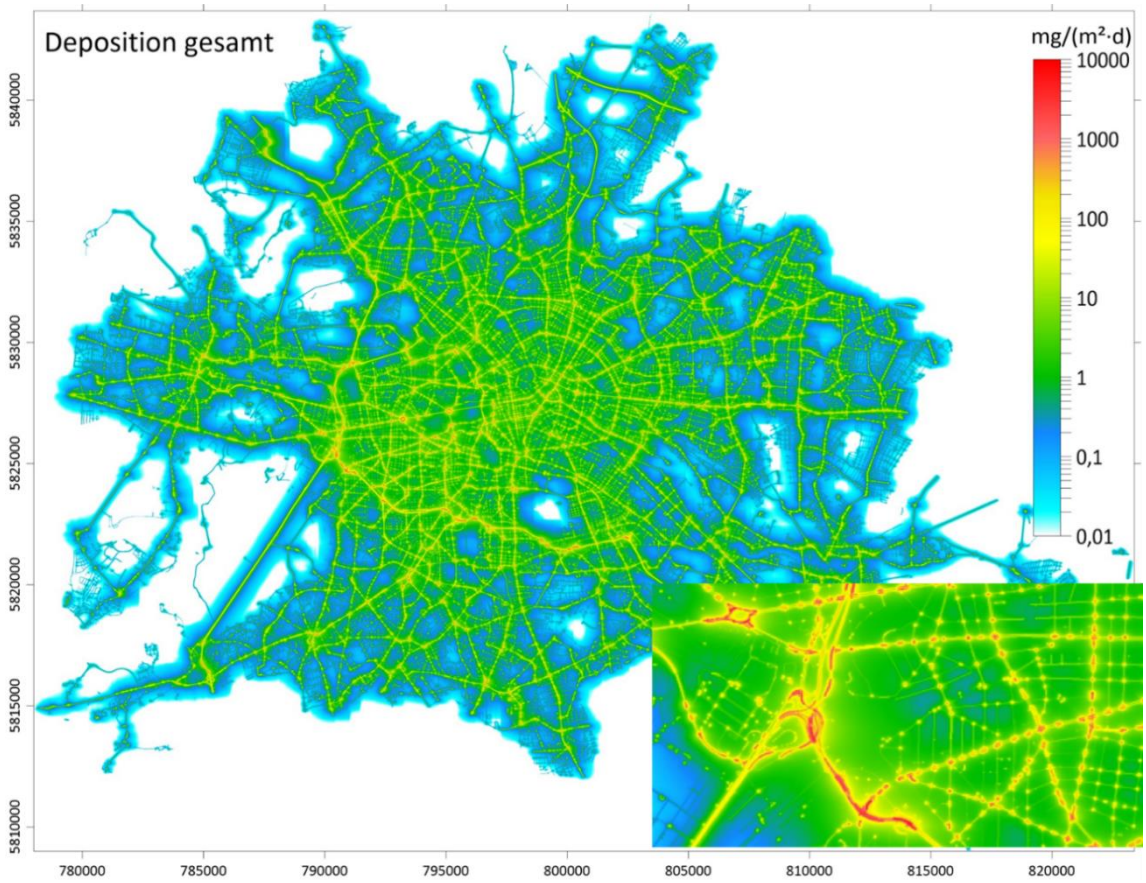


Abbildung 69: Deposition Reifenabrieb Berlin. Alle Korngrößen; Ausschnitte im Bereich Westkreuz

II.1.5.6 Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen

Entsprechend sehen die Ergebnisse für die einzelnen Bundeländer aus. Eine grafische Darstellung der Ergebnisse würde den Rahmen dieser Veröffentlichung sprengen. Zudem wird die Darstellung eines Bundelandes auf DIN A4-Format nicht sinnvoll aufgelöst. Dies ist am flächenmäßig kleinen Berlin schon zu erkennen.

Zu beachten ist, dass die Emissionen nur für den Reifenabrieb ausgewiesen waren. Die Stoffeinträge beziehen sich deshalb auch nur auf den reinen Reifenabrieb. Für TRWP wären die Depositionen in etwa zu verdoppeln.

II.1.5.6.1 Hochstraße

Ein kleiner Ausschnitt aus Berlin im Bereich Hochstraße wurde hochauflösend (1 m x 1 m) nach dem beschriebenen Verfahren berechnet. Die hohe Auflösung diente vor allem dazu, den Depositionsbetrag auf versiegelten Flächen genauer bestimmen zu können. Die Anwendung des Verfahrens in einer solchen mikroskaligen Betrachtung ist natürlich fehlerbehaftet, da in diesem Fall Hindernisse wie parkende Autos, Straßenbegleitgrün, Gebäude usw. die Ausbreitungsbedingungen lokal stark prägen können und dies mit homogenen Ausbreitungsbedingungen nur ansatzweise abgebildet werden kann.

In Abbildung 70 ist der Ausschnitt mit hoher Auflösung dargestellt. Auf dieser Basis wurden von SIEKER die Depositionen im Straßenraum bzw. außerhalb bestimmt.

Am Profil der Deposition an einem Straßenquerschnitt (Gartenstraße, Abbildung 70 unten) sind die starken Gradienten zwischen Fahrspuren und dem angrenzenden Raum zu erkennen. Mikroskalig liegen die Maxima, wie bei Messungen von [Gustafsson et al.-2019]. allerdings am Straßenrand (im Bereich der geparkten Fahrzeuge) und nicht in der Fahrbahnmitte. Bei kleinräumigen Modellierungen wäre also deutlich mehr Aufwand an Modelltechnik erforderlich.

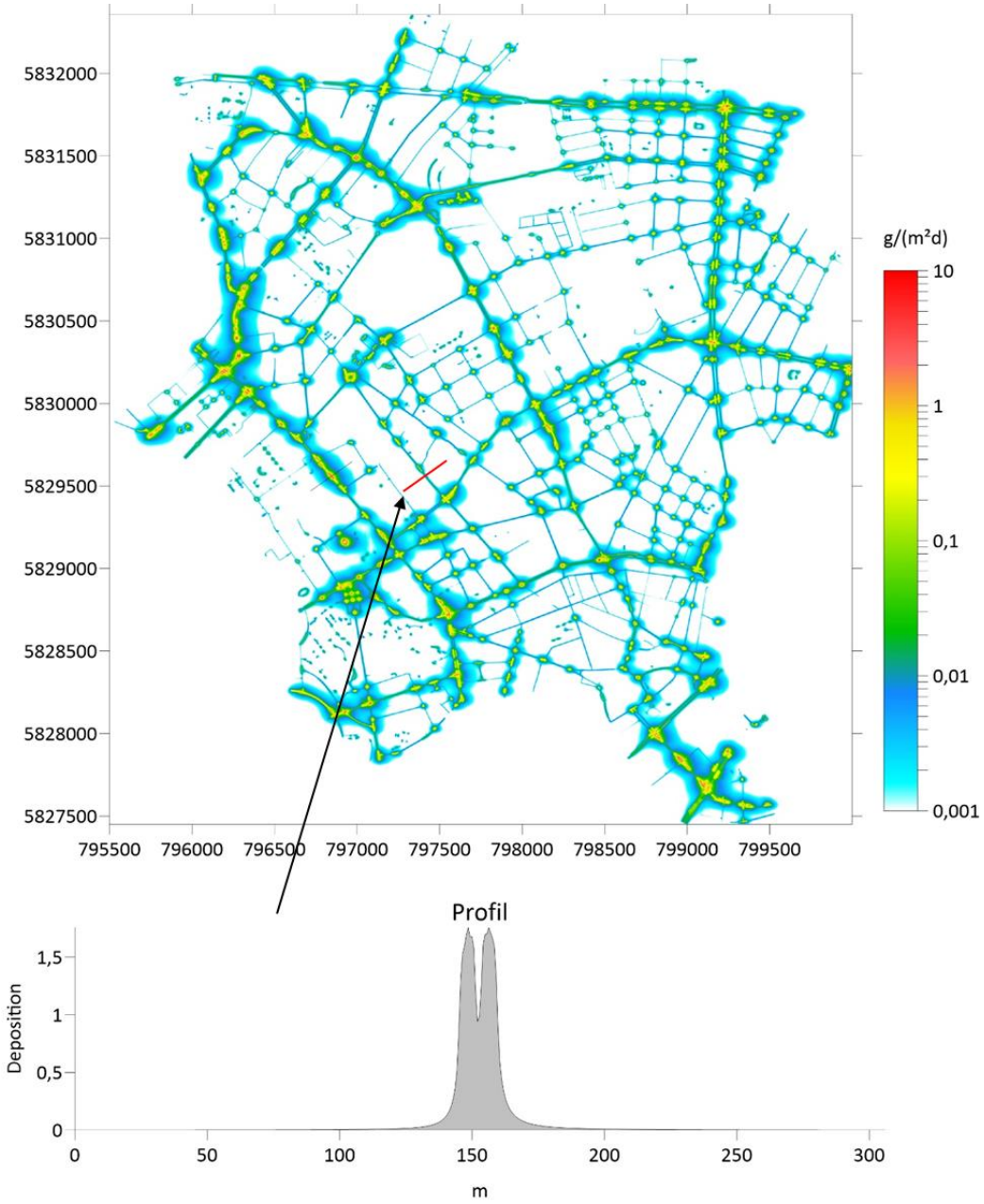


Abbildung 70: Deposition des Reifenabriebs im Bereich Hochstraße (oben) und Profil der Deposition an einer vierspurigen Straße

II.1.5.6.2 Panke

Das Gebiet der Panke wurde mit einer räumlichen Auflösung von 2 m betrachtet. Auch hier lag der Fokus auf einer möglichst guten Auflösung des Eintrags in versiegelte und nicht-versiegelte

Bereiche, um die Anteile, die durch Niederschlag oder Kehrmaschinen entfernt werden, möglichst gut abzuschätzen.

Der berechnete Eintrag an Reifenabrieb ist in Abbildung 71 in logarithmischer Einteilung dargestellt.

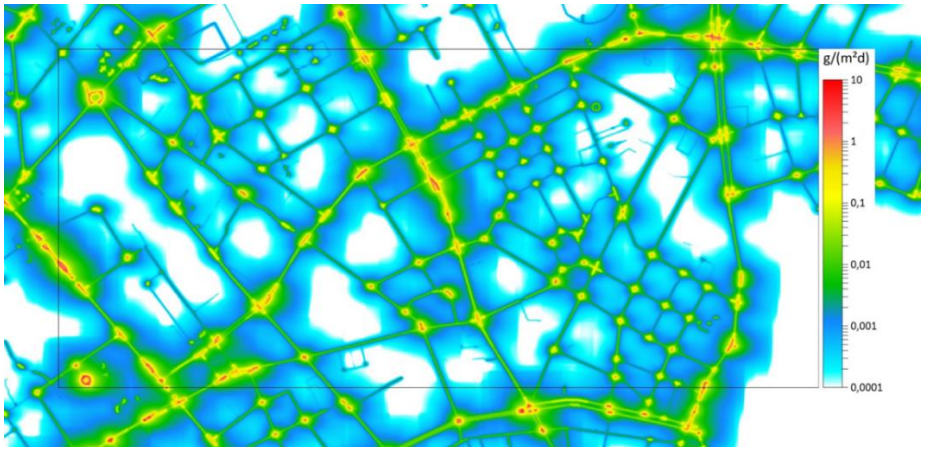


Abbildung 71: Deposition des Reifenabriebs in einem Ausschnitt aus dem Einzugsgebiet der Panke in Berlin

II.1.5.6.3 Wupper

Der Einzugsbereich der Wupper wurde mit einer Auflösung von 5 m berechnet.

Zu den Auswertungen wird auf die Ergebnisse von SIEKER verwiesen.

II.1.5.6.4 Bundesländer

Die Bundesländer wurden mit einer Auflösung von 10 m gerechnet.

Auf eine flächige Darstellung wird verzichtet. Die Ergebnisse erschließen sich erst mithilfe von GIS-Anwendungen.

In Abbildung 72 sind die insgesamt in jedem Bundesland berechneten Stoffeinträge aufgeführt. Die höchsten Werte sind in Nordrhein-Westfalen, Baden-Württemberg und Bayern zu finden. Auf die jeweilige Landesfläche bezogen, weisen die Stadtstaaten Berlin, Hamburg und Bremen die höchsten Werte auf (Abbildung 73).

Die Abkürzungen der Bundesländer sind nachstehender Tabelle 10 zu entnehmen.

Tabelle 10: Abkürzungen der Bundesländer.

BE	Berlin	**NI**	Niedersachsen
BB	Brandenburg	**NW**	Nordrhein-Westfalen
BW	Baden-Württemberg	**RP**	Rheinland-Pfalz
BY	Bayern	**SH**	Schleswig-Holstein
HB	Bremen	**SL**	Saarland
HE	Hessen	**SN**	Sachsen
HH	Hamburg	**ST**	Sachsen-Anhalt
MV	Mecklenburg-Vorpommern	**TH**	Thüringen

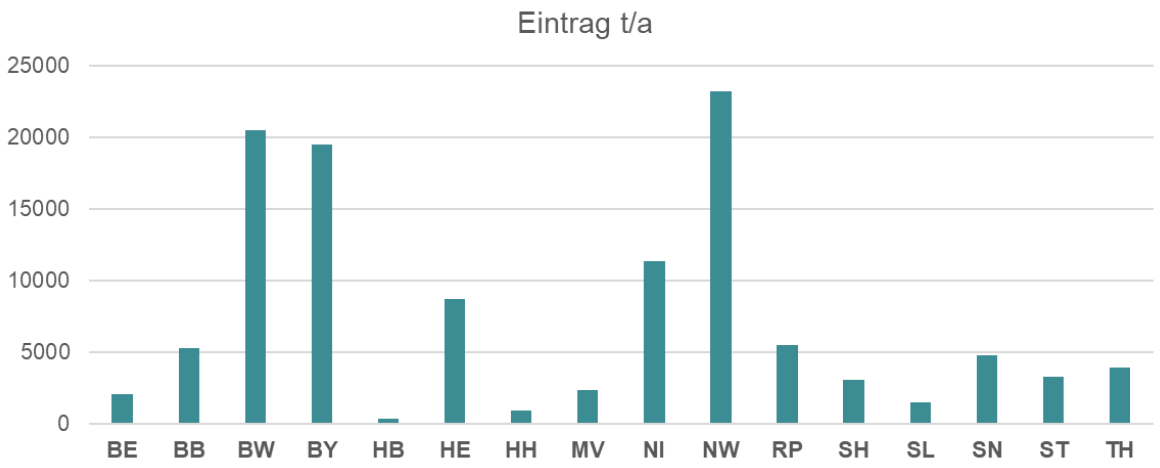


Abbildung 72: Stoffeinträge nach Bundesland getrennt

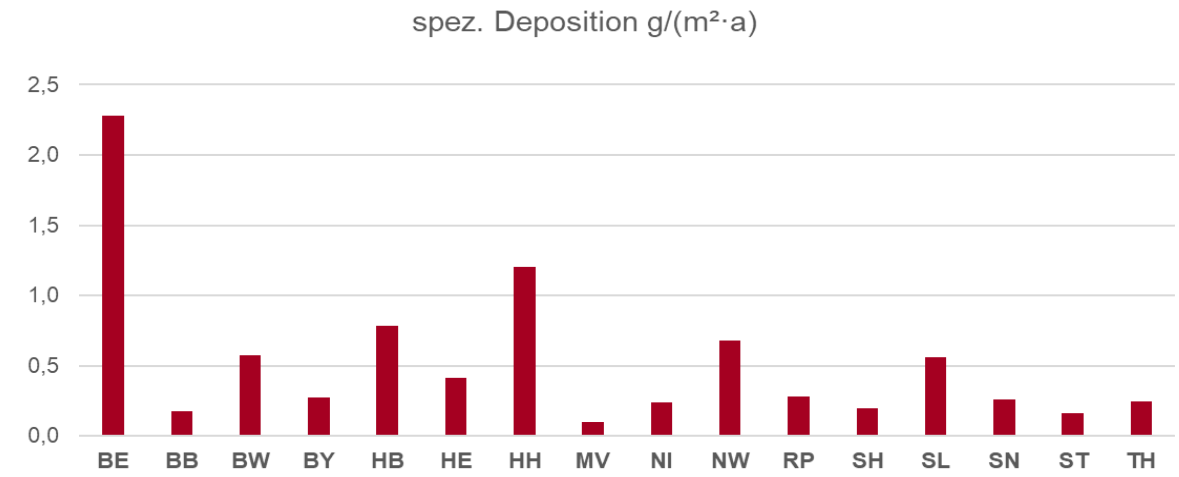


Abbildung 73: Stoffeinträge in Bezug auf die jeweilige Landesfläche

II.1.5.6.5 Deutschland insgesamt

Gesamtdeutschland lässt sich im 10 m-Raster aufgrund der Speicherplatzbedarfes auch auf gut ausgebauten PC-Systemen nicht handeln. Um eine Übersicht zu erhalten, wurden die Bundesländer auf einem 100 m-Raster aggregiert.

Die Übersicht ist in Abbildung 74 dargestellt. Man erkennt, dass die höchsten Werte in den Ballungsräumen auftreten. Mittelgebirge und strukturschwache Räume weisen dagegen eher geringe Stoffeinträge auf.

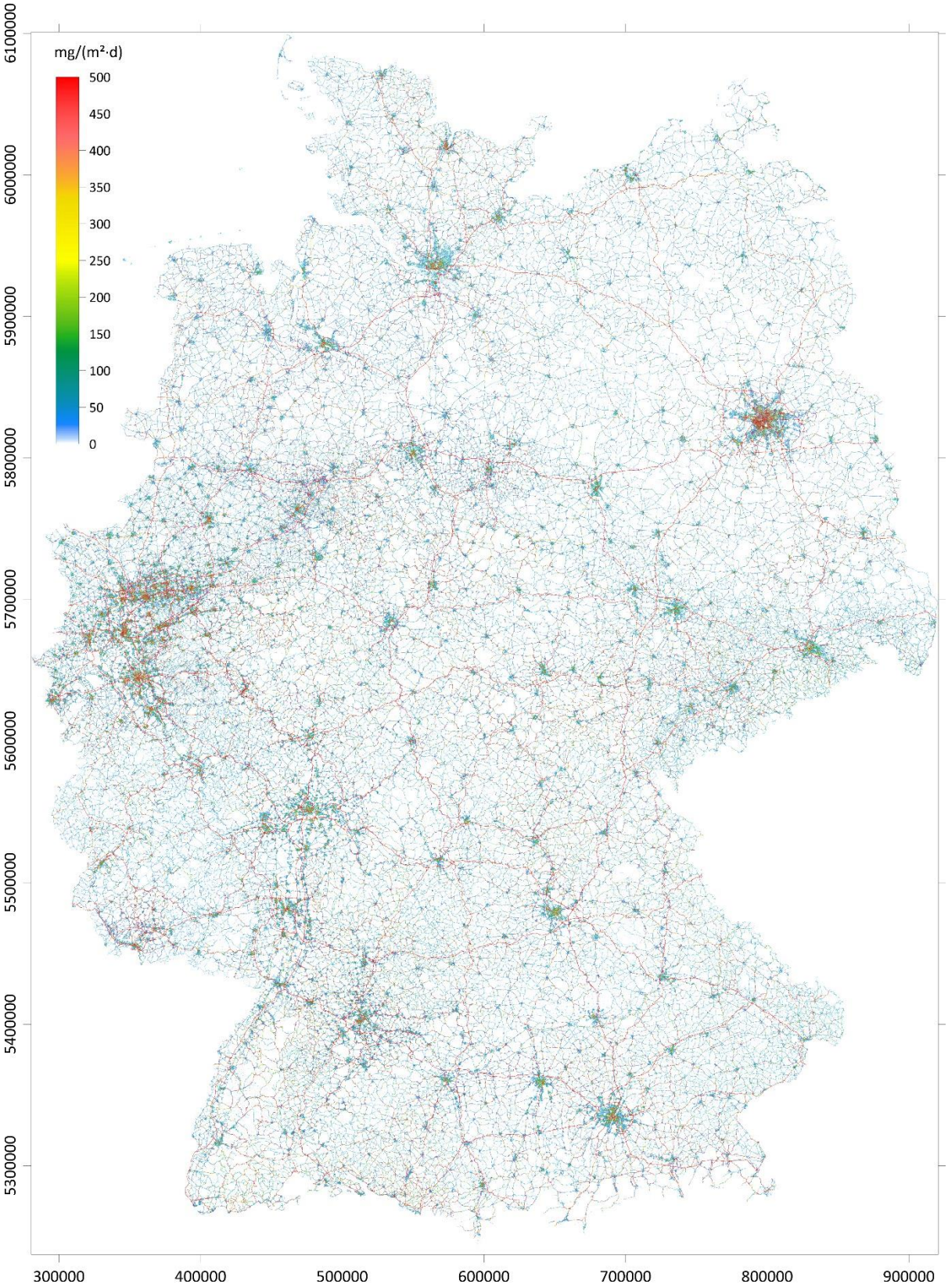


Abbildung 74: Deutschlandweite Stoffeinträge im 100 m-Raster

Die auf 100 m aggregierten Stoffeinträge wurden anschließend mit der Landnutzung, die ebenfalls im 100 m Raster aufbereitet wurde, verschnitten, um die Einträge getrennt nach Siedlung, Freiflächen, Wald und Gewässer zu ermitteln.

Die Auswertung ergibt für Gesamtdeutschland einen Eintrag von knapp 60 % in Siedlungsbereiche. In Freiflächen werden ca. 23 %, in Wälder ca. 20 % eingetragen. Direkt in Gewässer werden nur 0,4 % deponiert. Beim Eintrag in Gewässer liegt Hamburg mit 1,6% an der Spitze.

Je nach Bundesland gibt es Unterschiede. So sind die Einträge in Siedlungsbereichen in Hamburg und Berlin deutlich größer.

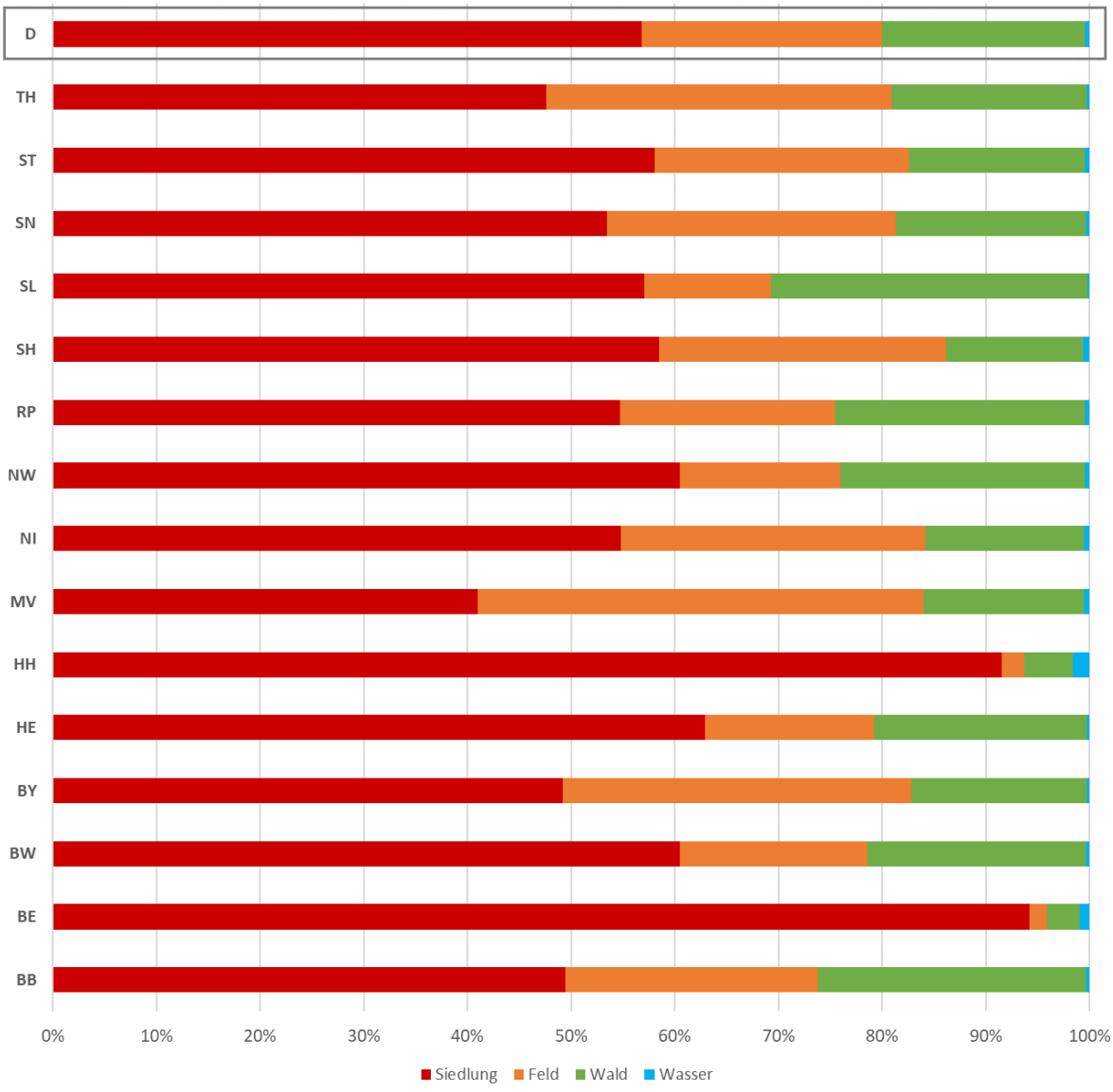


Abbildung 75: Stoffeinträge in unterschiedliche Nutzungen für Deutschland (D) und die Bundesländer. Bezeichnung siehe Tabelle 10

Der in der Luft verfrachtete Anteil wurde mit 6,5% berechnet. Dieser Anteil schwankt auch je nach Bundesland. In windärmeren Gebieten, z.B. Baden-Württemberg liegt der Anteil nur bei 3,8%, in windstarken Gebieten wie Schleswig-Holstein bei 11,6%.

II.1.6 Modellierung der Quellemissionen in den Einzugsgebieten

Die wichtigsten Datensätze für **SIEKER** in diesem Projekt waren die Straßendatensätze für die EZG Panke und Wupper, welche vom Projektpartner Fraunhofer UMSICHT während der Projektlaufzeit fortlaufend zur Verfügung gestellt wurden.

Seitens SIEKER fanden umfangreiche Abstimmungen und Überprüfungen mit Fraunhofer UMSICHT statt, die in den finalen Datensätzen mündeten. Die Geodatensätze für beide EZG werden beispielhaft in den Abbildung 76 und Abbildung 77 dargestellt.

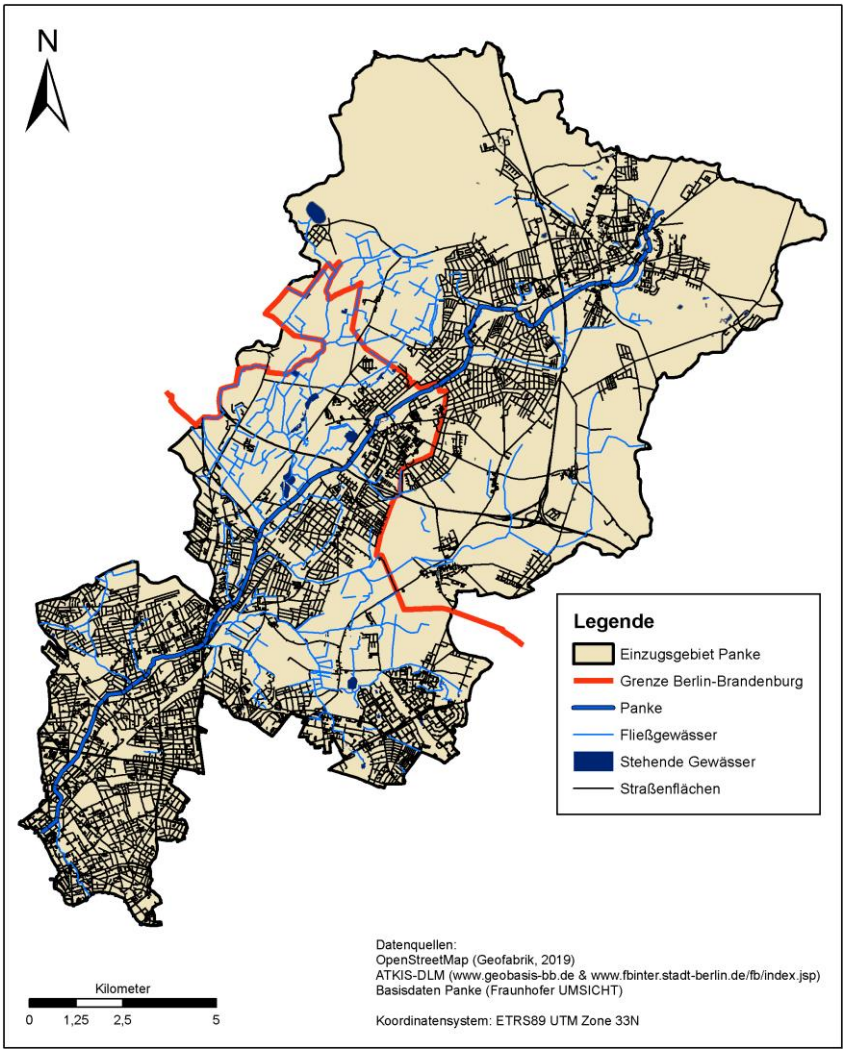


Abbildung 76: Übersichtskarte des Einzugsgebiets der Panke samt Straßenflächen

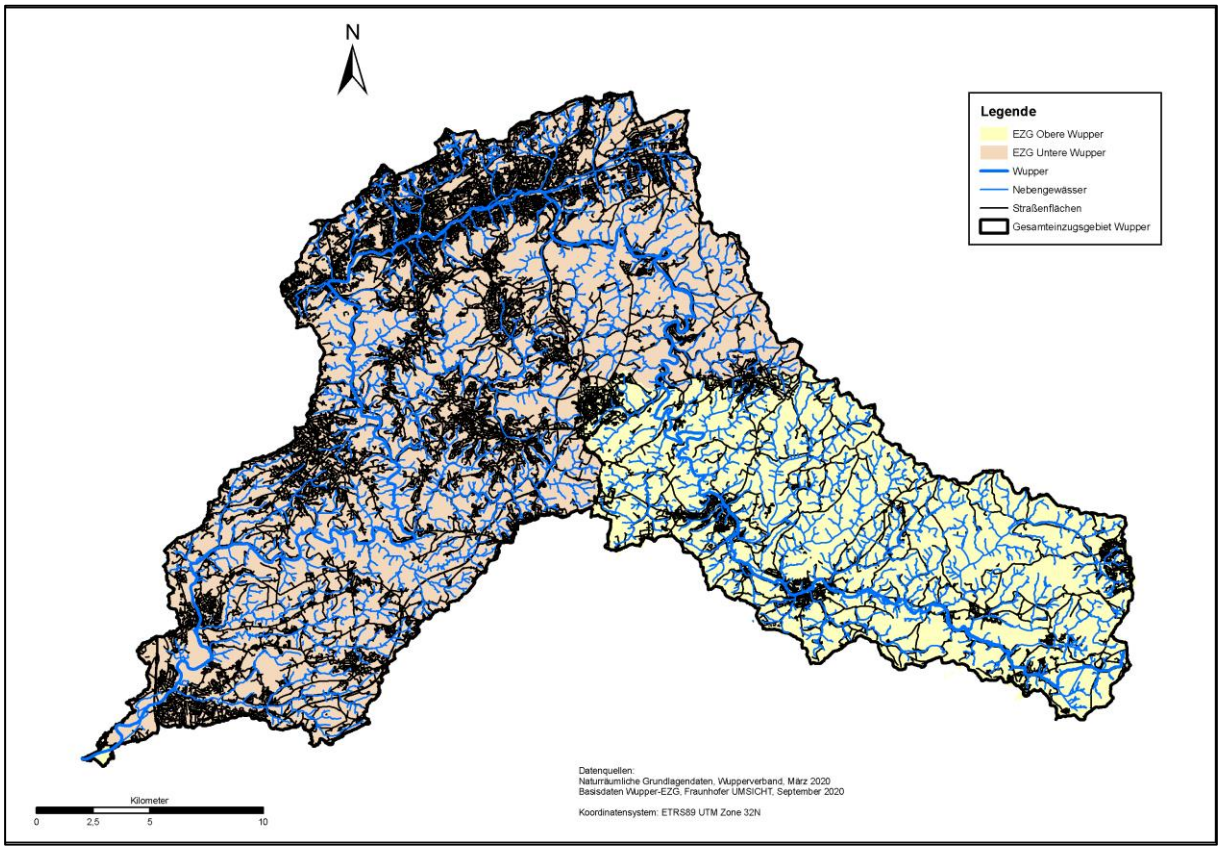


Abbildung 77: Übersichtskarte des Einzugsgebiets der Wupper (Ohne Dhünn) samt Straßenflächen

Ausgehend von diesen Straßendatensätzen, welche alle straßenbezogenen Attribute zur Ermittlung der Reifenabriebquellemissionen enthielten (Tabelle 1), wurde der entstehende Reifenabrieb je Straßenabschnitt ermittelt, indem das probabilistische Modell (Abschnitt II.1.3) angewendet wurde. Das Ingenieurbüro SIEKER unterstützte die Aufstellung dieses physikalischen Modells durch Überprüfungen und Mitarbeit zur weiteren Verbesserung des Grundmodells.

Für die Ermittlung der Quellemissionen in den beiden genannten Einzugsgebieten, wurden seitens SIEKER zusätzliche Daten genutzt sowie weitere Aufbereitungsschritte durchgeführt, um die Genauigkeit der Berechnungen zu verbessern.

Zur Ermittlung dieser feingliedrigen Quellemissionen im EZG der Panke und der Wupper wurde der Model Builder des Programms ArcMap 10.4 eingesetzt. Mit diesem wurden Skripte erstellt, die sowohl geometrische Operationen (beispielsweise Umwandlung unterschiedlicher Geometrien und Verschneidung unterschiedlicher Shapefiles) als auch einzelne Berechnungen zur feingliedrigen Bestimmung der entstandenen Mengen an Reifenabrieb durchführen.

In Abbildung 78 ist ein Ausschnitt zum methodischen Vorgehen dargestellt. Es wurden unterschiedliche Module („Toolboxen“) erstellt, mit dem Ziel einer weitgehend automatisierten Berechnung ausgehend von laufend aktualisierten Input-Daten (Beispiel einer Toolbox in Abbildung 79).

Die von Fraunhofer UMSICHT zur Verfügung gestellten Straßendatensätze wurden um weitere Datenquellen (beispielsweise Kreuzungszähldaten, Fahrbahnbreiten, Parkplatzdaten[1] und Angaben für die späteren hydrologischen Simulationen) ergänzt, um eine genauere Ermittlung des entstehenden Reifenabriebs durchzuführen. Da die Fahrbahnbreiten nicht in öffentlichen Datenquellen enthalten waren, wurde diese aus Berechnungsvorlagen der RASt (2006) für den Neubau von Straßen abgeleitet. Hierbei handelt es sich um eine grobe Abschätzung, die aber nötig ist, weil die spätere hydrologische Modellierung Flächen als Dateninput benötigt.

[1] Die Parkplatzdaten wurden in der finalen Bestimmung der Reifenabriebquellemissionen nicht berücksichtigt, weil die physikalische Modellierung des Reifenabriebs sich als nicht anwendbar für das Ein- und Ausparken herausstellte.

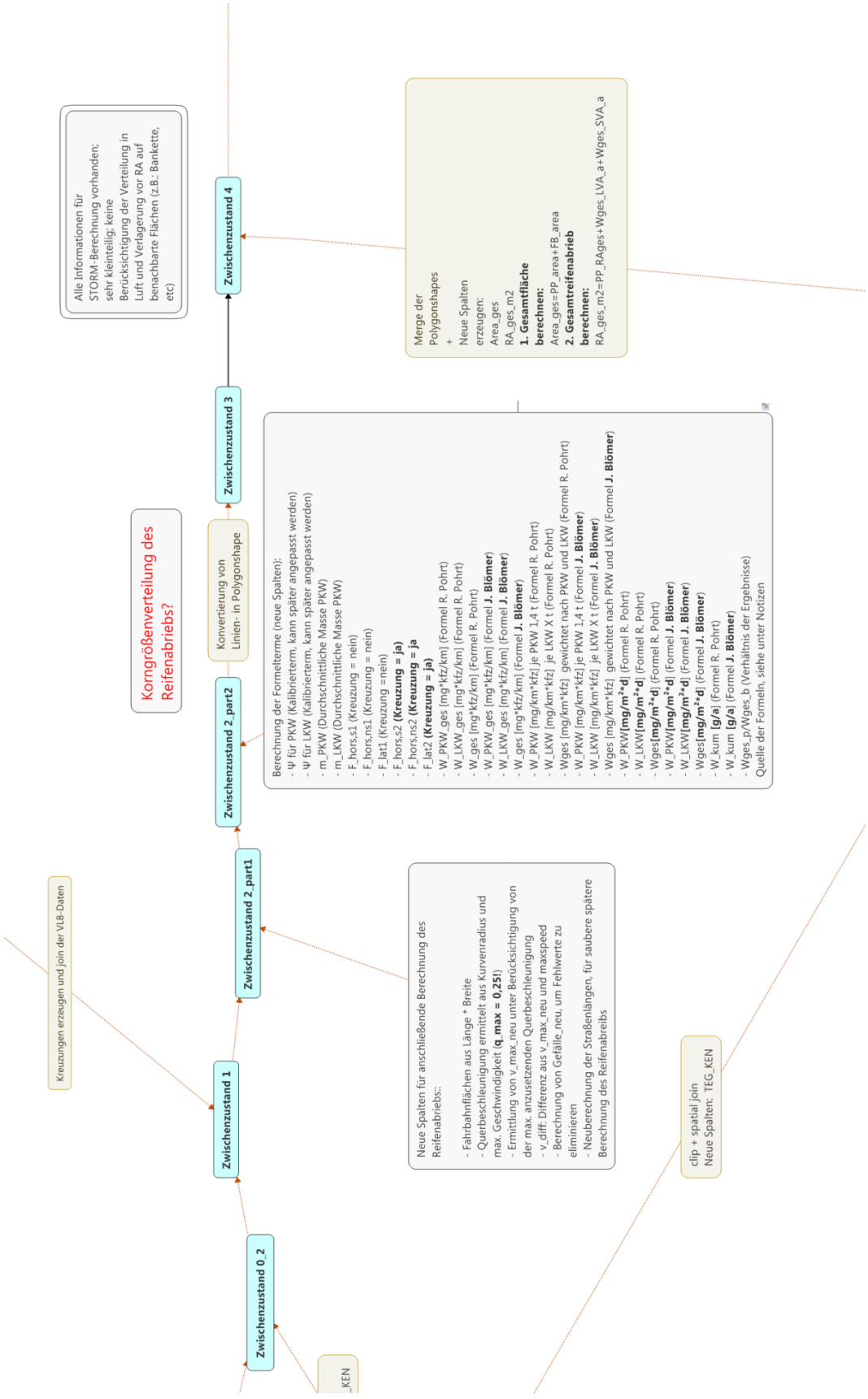


Abbildung 78: Ausschnitt zum methodischen Vorgehen bei der feingliedrigen Ermittlung der Quellemissionen im Panke EZG

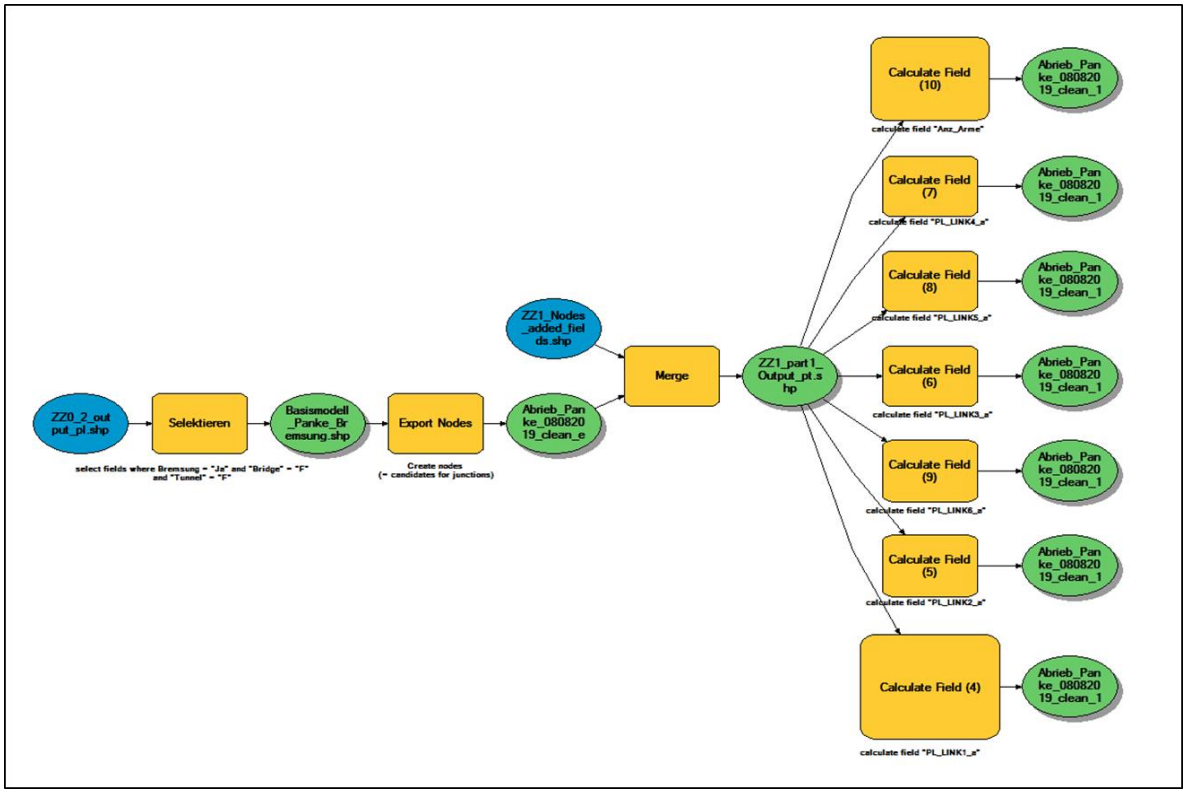


Abbildung 79: Model Builder - Skript zur Ermittlung der Kreuzungen und deren Eigenschaften

Nach umfangreichen Modellabgleichen samt Weiterentwicklungen mit dem Fraunhofer UMSICHT wurden die finalen physikalischen Formeln zur Ermittlung des Reifenabriebs im TWM-Modell konsortiumübergreifend (Abschnitt II.1.3) festgelegt. Diese ermöglichen die Berechnung einer relativen Verteilung des Reifenabriebs an jedem betrachteten Straßenabschnitt (Abriebintensität, Abbildung 80). Durch Multiplikation dieser Verschleißintensität mit der DTV (differenzierte Betrachtung für PKW und LKW) und den vom Fraunhofer UMSICHT festgelegten, bundesweit gültigen Kalibrierfaktoren für PKW und LKW, wurden die absoluten Mengen an Reifenabrieb je betrachteten Straßenabschnitt ermittelt (Quellemissionen).

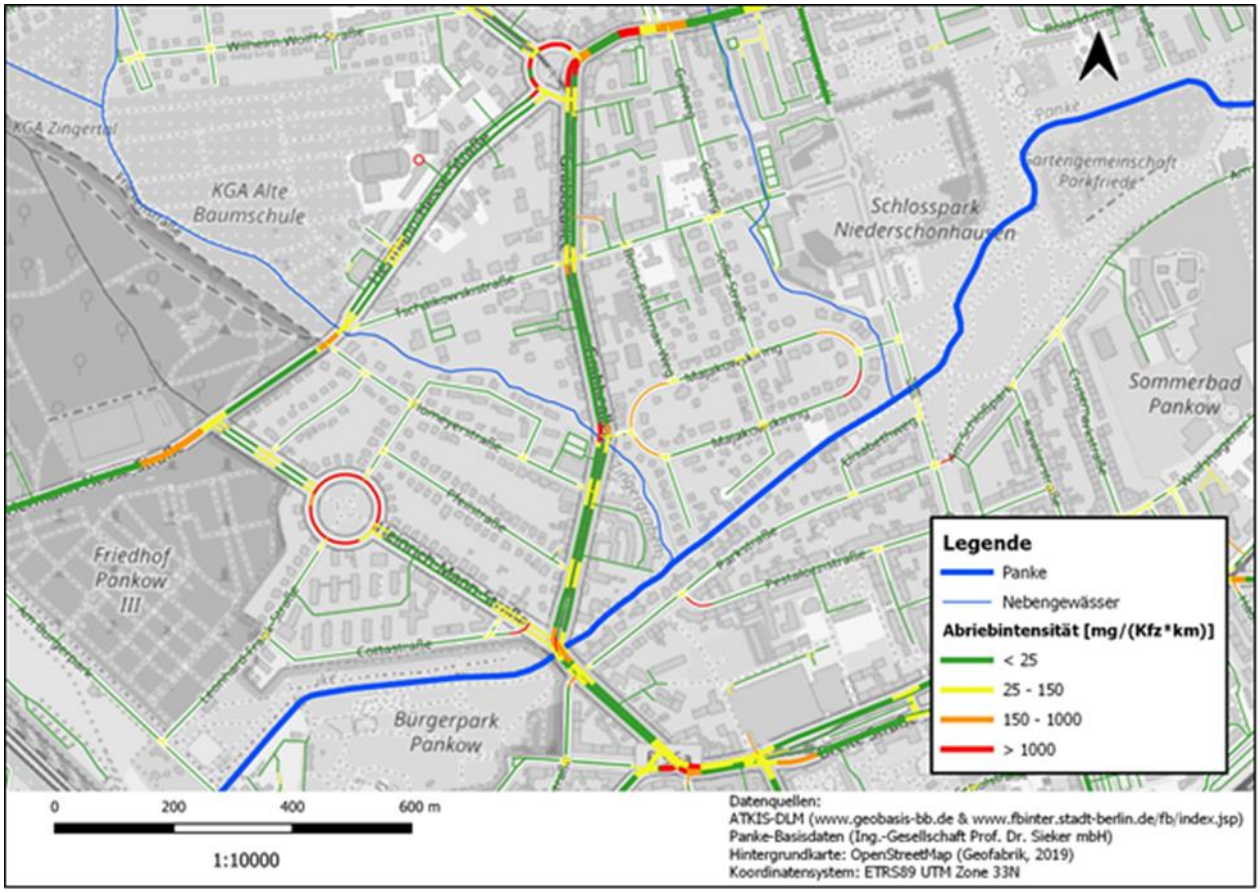


Abbildung 80: Ermittelte Abriebintensität in einem Teilgebiet des Panke-EZG

II.1.7 Verbleib von Reifenabrieb in den Einzugsgebieten Wupper und Panke

Zur Ermittlung der Haupteintragspfade und Eintragsmengen von Reifenabrieb in die aquatische Umwelt der betrachteten Einzugsgebiete der Wupper (NRW) und der Panke (Berlin/Brandenburg) wurden maßgeblich von **SIEKER** aufbauend auf den Modellen von Fraunhofer UMSICHT und den Rechnungen von iMA folgende Arbeiten durchgeführt (Abbildung 81).

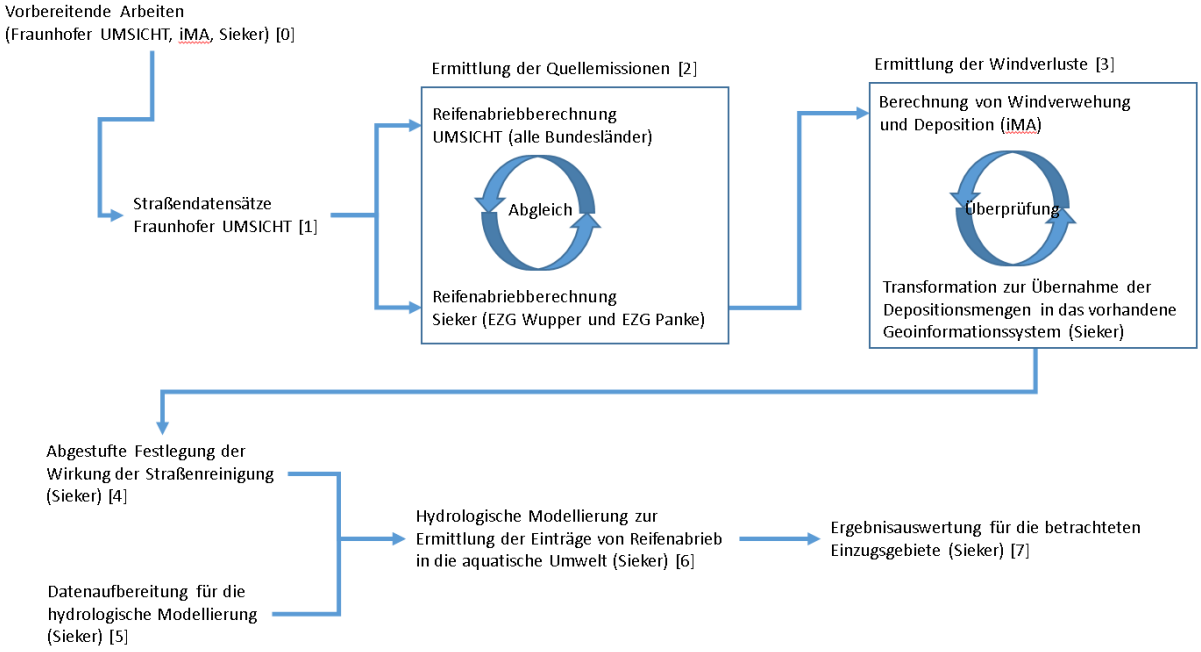


Abbildung 81: Übersicht der durchgeführten Arbeiten zur Ermittlung der Eintragspfade und -mengen von Reifenabrieb in die Gewässer Wupper und Panke

Anhand dieser Übersicht werden die jeweiligen Arbeiten und die erzielten Ergebnisse im Folgenden detailliert dargestellt.

Diese **vorbereitenden Arbeiten [0]** betreffen die Ermittlung und Bewertung der allgemeinen Einflussfaktoren auf den Reifenabrieb anhand einer umfassenden Literaturrecherche, deren Ergebnisse in Abschnitt II.1.1 nachzulesen sind.

Die **Ermittlung der Quellemissionen für die Einzugsgebiete Wupper und Panke [2], die auch die Straßendatensätze [1]** umfassen, wird in Abschnitt II.1.3 erläutert.

II.1.7.1 Ermittlung der Windverluste [3]

Die ermittelten Quellemissionen an den EZG Panke und Wupper wurden iMA zur Ermittlung der Luftverwehung und Deposition zur Verfügung gestellt. Da der Reifenabrieb keine homogene Korngröße besitzt, wurden die Quellemissionen in Anlehnung an Literaturwerte [Kreider et al.-2009] in folgende Korngrößenklassen (KGK) unterteilt (vgl. Abschnitt 46, Tabelle 6):

- Fraktion 1: 0 – 50 µm: 10 % Masse
- Fraktion 2: 50 – 100 µm: 30 % Masse
- Fraktion 3: 100 – 500 µm: 60 % Masse

Die flächendeckend berechneten Quellemissionen mit den jeweiligen Massenanteilen je Korngrößenklasse in den einzelnen Straßenabschnitten wurden vom iMA als Dateninput für die Ermittlung der Luftverwehung und Deposition genutzt. Die Berechnungsergebnisse für beide EZG (Rasterdaten, Auflösung EZG Panke: 2m, Auflösung EZG Wupper: 5 m) wurden im Anschluss mithilfe

weiterer ArcMap-Toolboxen im Model Builder auf die Ausgangsflächen zurückgerechnet. Als Ergebnis lagen die Quellemissionen pro Straßenabschnitt und die verbliebenen Mengen nach der Luftverteilung als Vektordatensatz vor. Der Reifenabrieb, der außerhalb der festgelegten Grenzen der Fahrbahnflächen lag[2], wurde im Anschluss als Verlust gewertet (Senke 1). Hier muss berücksichtigt werden, dass die Auflösung der Rasterdatensätze einen großen Einfluss bei der Berechnung der „Verluste" besitzt (vgl. II.1.7.8). Je höher die Auflösung, d.h. je kleiner die Rastergröße ist, desto genauer können die Verluste bestimmt werden. Damit erhöht sich allerdings der Rechenaufwand, so dass sehr hohe räumliche Auflösungen derzeit nur auf kleinräumige Einzugsgebiete beschränkt sind. Der Anteil der Deposition vom Reifenabrieb auf den betrachteten Fahrbahnflächen nach Verwehung wird in Abbildung 82 dargestellt.

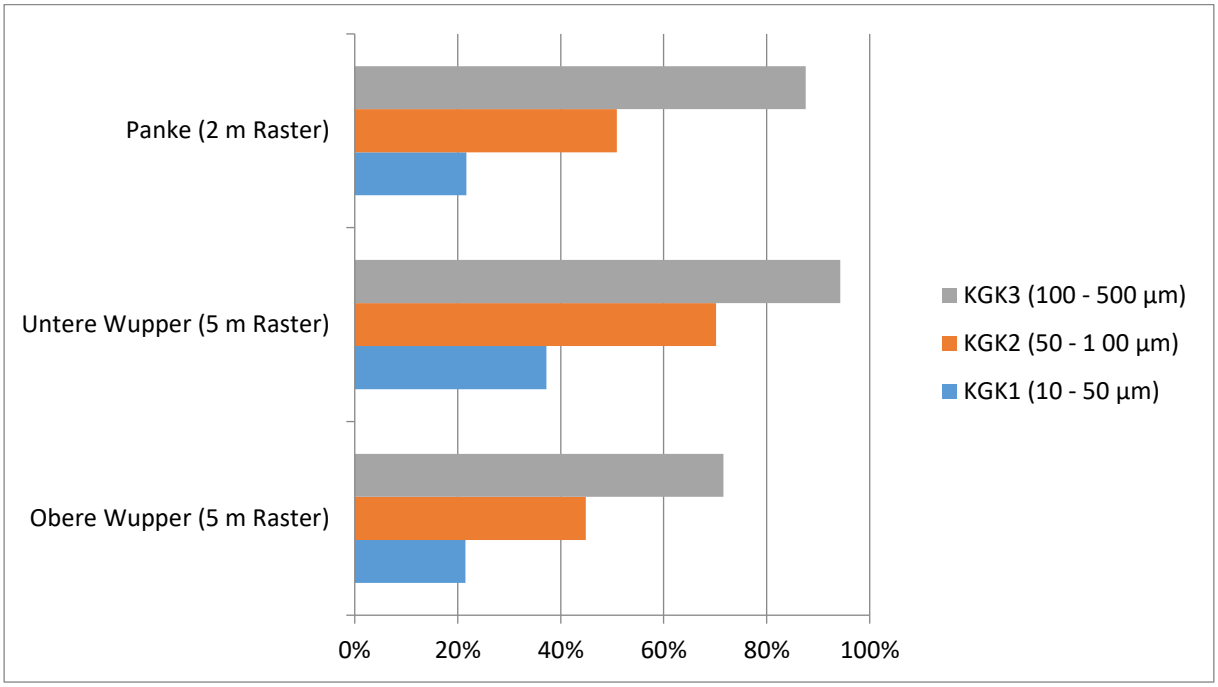


Abbildung 82: Anteil der Deposition auf den Straßenflächen nach Verwehung in den betrachteten Einzugsgebieten

II.1.7.2 Berechnungsansatz für die maximal akkumulierbaren Reifenabriebmengen

Die akkumulierbare Reifenabriebmenge hängt von den Depositions- und Verwehungsraten sowie der Straßenreinigung ab.

Abhängigkeit der Depositions- und Verwehungsraten

Auf Grundlage der berechneten Depositionsraten konnte ein Akkumulationsansatz für den Reifenabrieb auf den Fahrbahnflächen hergeleitet werden.

Dabei wurde wie folgt vorgegangen: Das physikalische Abriebmodell generiert mittlere jährlich Reifenabriebemissionen je betrachteten Fahrbahnabschnitt. Durch Vergleich der mittleren täglichen Emissions- und Depositionsraten lässt sich ermitteln, wieviel Reifenabrieb täglich – aufgeteilt nach Korngrößenklassen – außerhalb der betrachteten Fahrbahnflächen verweht wird.

Hierbei lässt sich mittels eines mathematischen Modells, welches aus der Zinzeszinzberechnung abgeleitet wird, ermitteln, wieviel Reifenabrieb maximal je betrachteten Straßenabschnitt und Korngrößenklasse akkumulieren kann. Die verwendete Formel lautet:

[2] Grenzen der Fahrbahn durch die vorhandenen Polygonflächen im GIS festgelegt

$$RA_A_kum = r * q * \frac{(q^t - 1)}{q - 1} + 0{,}5 * r$$

RA_A_kum - kumulierte Reifenabriebmenge je Fläche

r - tägliche Neuemission in mg/m²

t - Akkumulationszeit in Tagen

q - Verbleib nach Verwehung pro Tag (-)

Das Ergebnis dieses Ansatzes wird in einer Beispielrechnung in Abbildung 83 dargestellt.

Die halblogarithmische Darstellung zeigt, dass die max. Menge an akkumulierbaren Reifenabrieb je nach gewählter Verwehungsrate limitiert ist. Die blaue Kurve zeigt, wie bei einer Verwehungsrate von 0 % eine konstante, unlimitierte Steigerung der akkumulierten Reifenabriebmenge entsteht (Gerade mit einer konstanten Steigung bei einer linearen Achsenskalierung!). Die Differenzen zwischen den maximal akkumulierbaren Mengen je nach Verwehungsrate und dem Ansatz ohne Verwehung (Verwehungsrate = 0 %) sind die Verwehungsverluste.

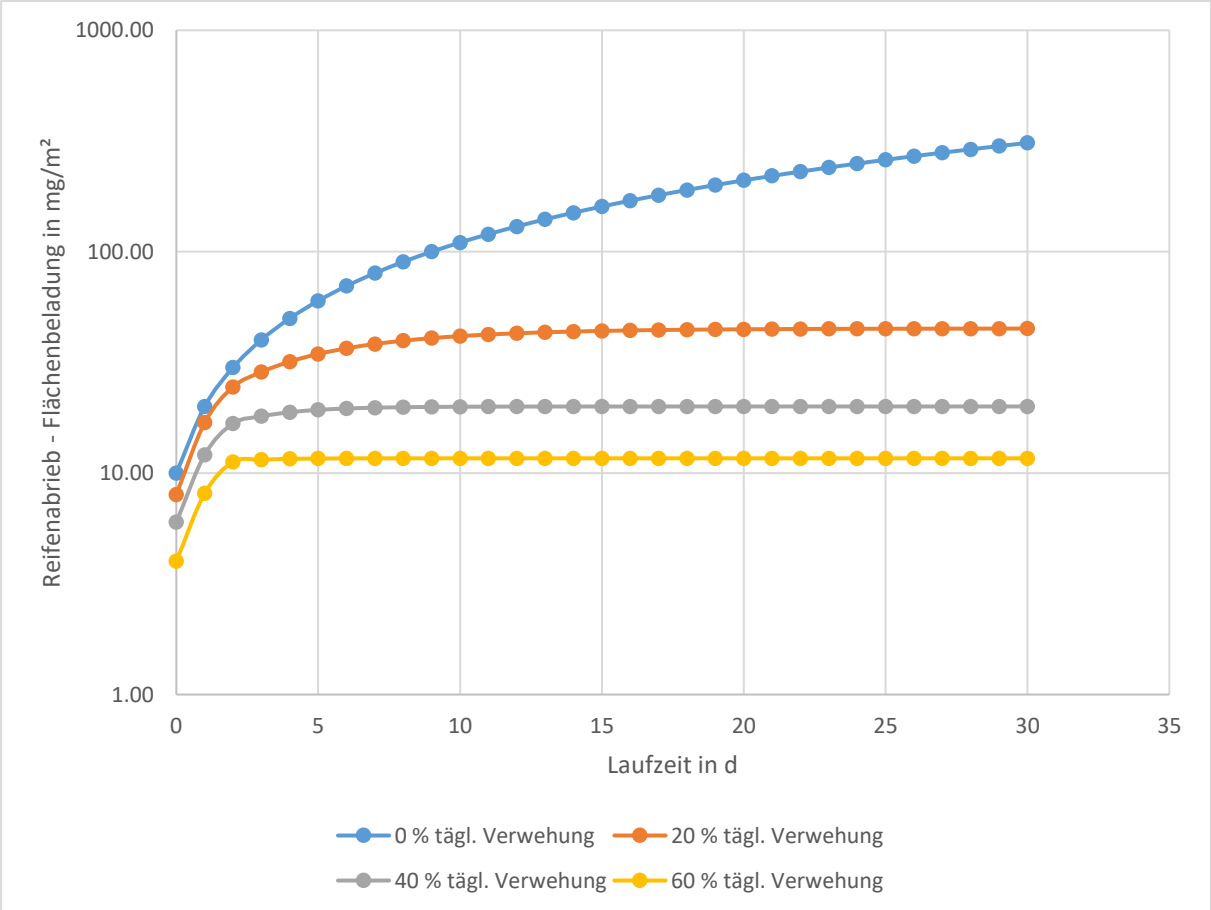


Abbildung 83: Beispielrechnung für die Akkumulation von Reifenabrieb der Korngrößenklasse 50-100 µm nach unterschiedlichen täglichen Verwehungsraten (0 60 %)

Der dargestellte Ansatz wurde für jeden vorhandenen Straßenabschnitt in den betrachteten EZG berechnet. Abbildung 82 zeigt, dass die Partikelgröße entscheidend für die Depositions- bzw. Verwehungsrate ist. Je kleiner die Partikel/Korngrößenklasse desto kleiner die Depositionsrate bei gleichen Windgeschwindigkeiten und dementsprechend die maximal akkumulierbare Menge je

Fläche. Zu beachten ist jedoch, wie im vorhergehenden Abschnitt II.1.7.1 dargestellt, dass vor allem kleinere Rasterauflösungen zu größeren Fehlern bei der Ermittlung der Depositions- und Akkumulationsraten führen. Da im Pankeeinzugsgebiet mit einer Rasterauflösung von 2 m und im Wuppereinzugsgebiet mit einer Rasterauflösung von 5 m gerechnet wurde, sind die Depositions- und Akkumulationsberechnungen für das erstgenannte Einzugsgebiet wesentlich genauer.

Wirkung der Straßenreinigung [4]

Die zweite Senke für die ermittelten Mengen an Reifenabrieb je Straßenabschnitt war die Straßenreinigung. Aus der Literaturrecherche und den durchgeführten Arbeiten im parallelen Projekt *RAU* [BMBF-2017] lagen Kenntnisse vor, die zeigen, dass die Straßenreinigung ein großes Reduktionspotenzial für die aufkommende Menge an Reifenabrieb hat. Die Wirkung setzt sich aus der Reinigungseffizienz, der gereinigten Fläche und der Reinigungsfrequenz zusammen.

Analog zu der oben genannten Akkumulation, welche durch die tägliche Verwehung bedingt wird, lässt sich ein Akkumulationsansatz aufstellen, welcher nur die Häufigkeit und Reinigungseffizienz der Straßenreinigung berücksichtigt. Eine Beispielrechnung für die Akkumulation von Reifenpartikeln der Korngrößenklasse 50-100 µm je nach Häufigkeit der Straßenreinigung, ohne Berücksichtigung von Verwehungseffekten wird in Abbildung 84 (halblogarithmische Darstellung) dargestellt.

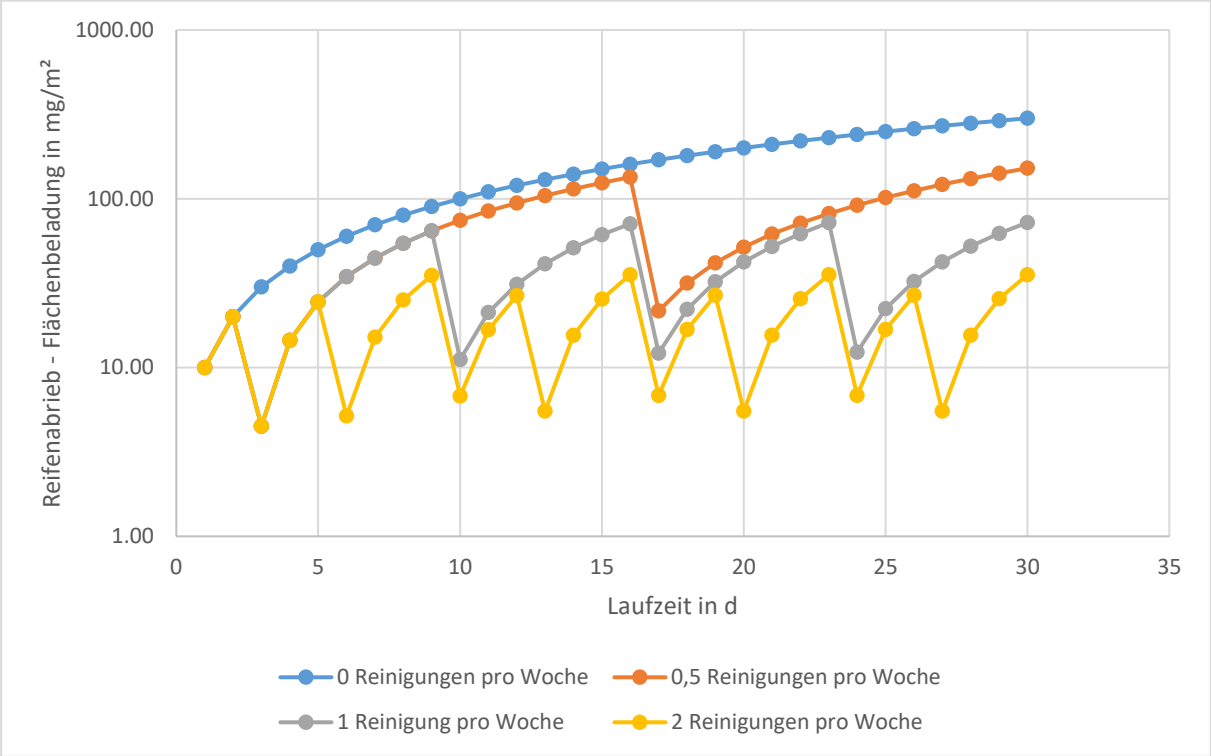


Abbildung 84: Beispielrechnung für die Akkumulation von Reifenabrieb der Korngrößenklasse 50-100 µm nach unterschiedlichen Frequenzen der Straßenreinigung, Reinigungseffizienz: 85%, keine Verwehungseffekte

Die Abbildung 84 zeigt, dass bereits eine reine Berücksichtigung der Straßenreinigung unter Vernachlässigung der täglichen Verwehungsraten zu einer Limitierung der maximal akkumulierbaren Menge an Reifenabrieb auf den Straßenflächen führt. Die Differenzen zwischen den maximal akkumulierbaren Mengen je nach Reinigungsintervall und dem Ansatz ohne Straßenreinigung (Reinigungsintervall = 0 x pro Woche) zeigen die von der Straßenreinigung entfernten Mengen an Reifenabrieb. Weiterhin lässt sich erkennen, dass die Reinigungsintervalle einen sehr großen Einfluss auf die maximal akkumulierbare Reifenabriebmenge hat.

Abhängigkeit der Depositions- und Verwehungsraten *und* der Wirkung der Straßenreinigung

Die Kombination der dargestellten Konzepte „Akkumulation nach Verwehung“ und „Akkumulation nach Straßenreinigung“ wurden für die Ermittlung der Reifenabriebmengen auf den Straßenflächen vereinigt.

Abbildung 85 zeigt eine beispielhafte Berechnung der Akkumulation des Reifenabriebs (Korngrößenklasse 50-100 µm) bei Berücksichtigung der beiden genannten Effekte.

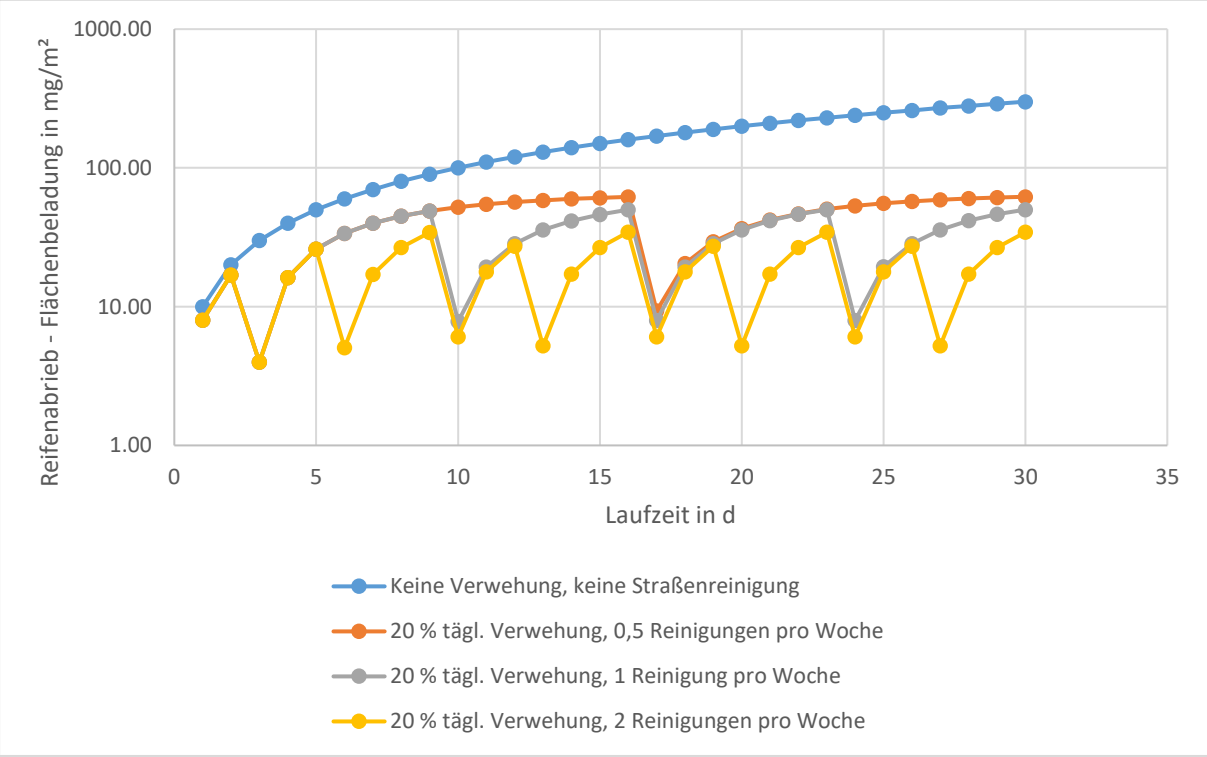


Abbildung 85: Beispielrechnung für die Akkumulation von Reifenabrieb der Korngrößenklasse 50-100 µm nach unterschiedlichen Frequenzen der Straßenreinigung, Reinigungseffizienz: 85 % und einer täglichen Verwehungsrate von 20 %

Abbildung 85 zeigt, dass die Kombination von Luftverwehung und Straßenreinigung zu einer deutlich reduzierten maximalen Akkumulation von Reifenabrieb im Straßenraum führt. Trotzdem kann der Reifenabrieb nicht vollständig entfernt werden. Die dargestellte Methodik wurde verwendet, um die Inputdaten für die nachfolgende hydrologische Modellierung zu berechnen.

Da keine konkreten Daten zu den Faktoren gereinigte Fläche und Reinigungsfrequenz für die EZG vorlagen, wurden für die Siedlungsgebiete[3] folgende Annahmen getroffen:

- Straßen außerorts: Keine Reinigung, auch kein Eintrag in Kanalisation, Annahme Verlust in Boden durch dezentrale Entwässerung
- Hauptstraßen innerorts: 1x pro Woche
- Nebenstraßen innerorts: 1x pro Monat

Auf Grundlage dieser Annahmen wurde der Einfluss der Straßenreinigung berechnet.

[3] Die Straßenreinigung ist außerorts nicht regelmäßig tätig.

II.1.7.3 Datenaufbereitung für die hydrologische Modellierung [5]

Im Rahmen der Stofffrachtsimulation zur Ermittlung der Quellen und Senken des Reifenabriebs wurden die Einzugsgebiete der Wupper und Panke eingehend untersucht.

Die Wupper ist ein Mittelgebirgsfluss mit 115 km Länge und einem mittleren Abfluss von 17 m³/s an der Mündung in den Rhein. Ihr Einzugsgebiet beträgt ca. 813 km². Auf ihrem Weg vom Quellgebiet durch das Bergische Land bis zur Mündung in der Rheinebene überwindet die Wupper ein Gefälle von 397 Metern [Wupperverband-2010].

Das Wuppereinzugsgebiet wird in Abbildung 86 dargestellt.

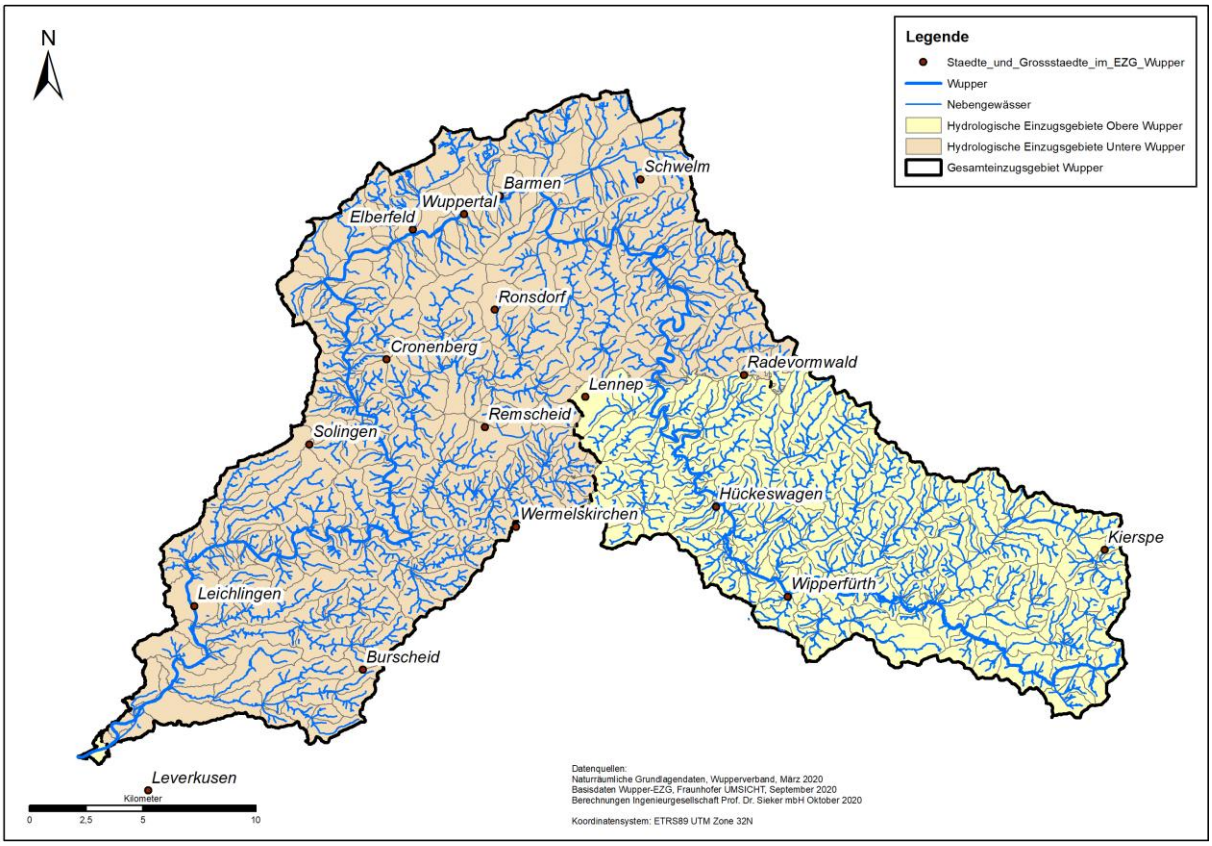


Abbildung 86: Darstellung des Wuppereinzugsgebiets

Die Panke ist ein Fließgewässer, das im Naturpark Barnim nahe der Stadt Bernau entspringt und am Nordhafen in den Berlin-Spandauer-Schifffahrtskanal mündet. Die Länge der Panke beträgt 29 km. Davon befinden sich 17,6 km auf dem Gebiet der Stadt Berlin [Berlin-2020.

Das EZG der Panke erstreckt sich über 216 km² und befindet sich zu Teilen in Berlin und Brandenburg [Quelle: Berechnung SIEKER]. Das Pankeeinzugsgebiet wird in Abbildung 87 dargestellt.

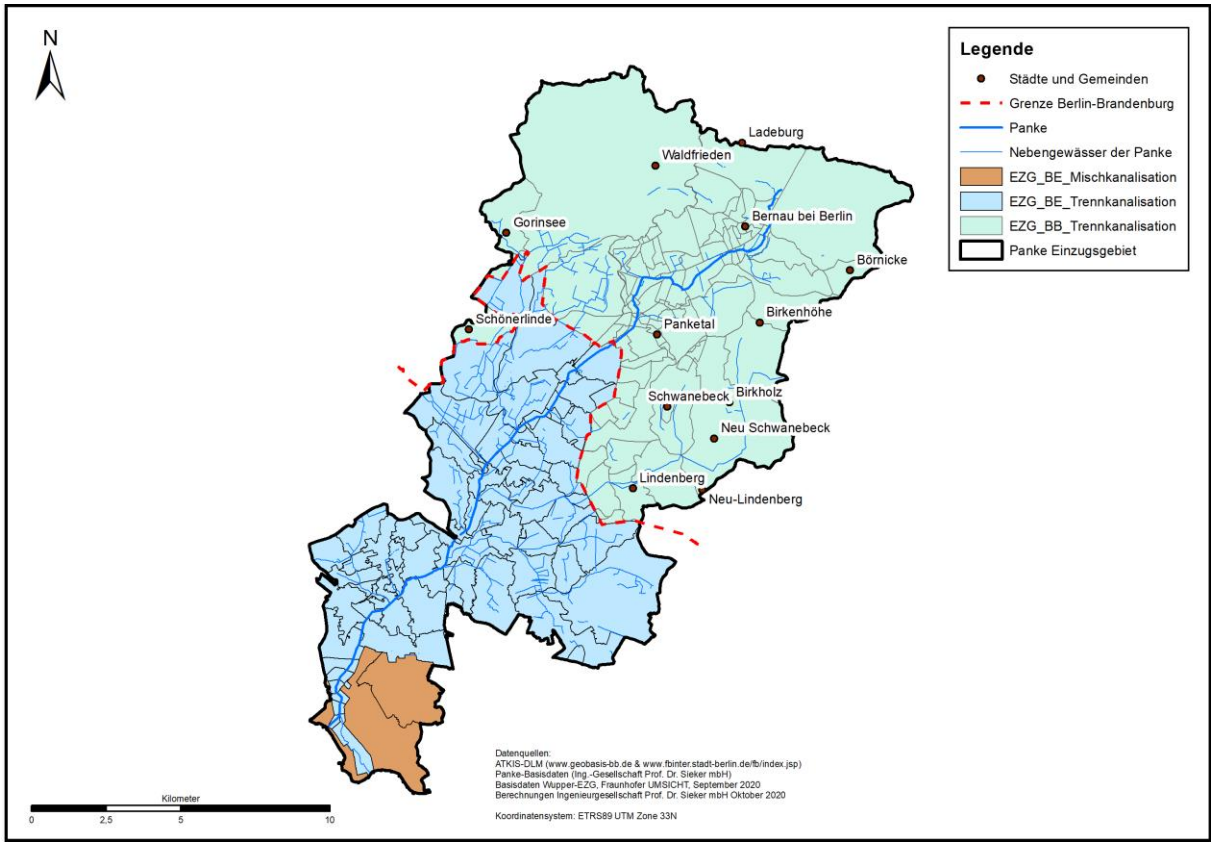


Abbildung 87: Darstellung des Pankeeinzugsgebiets

Für die Ermittlung der Eintragsfrachten und –orte von Reifenabrieb in den EZG der Panke und Wupper wurden vorhandene hydrologische Modelle der Panke und der Unteren Wupper genutzt und unter anderem mit den ermittelten Fahrbahnflächen abgeglichen. Für die Obere Wupper wurde mittels umfangreichen Einzugsgebietsdaten des Wupperverbands ein vollständig neues Modell aufgebaut. Die abgebildeten Kläranlageneinzugsgebiete der Oberen Wupper werden in Abbildung 88 dargestellt. Zu erkennen ist, dass der überwiegende Teil der Flächen innerhalb der Kläranlageneinzugsgebiete an die Mischkanalisation angeschlossen ist. Deutlich erkennbar ist auch, dass sehr viele Straßenflächen außerhalb der Einzugsgebiete der Kläranlagen verortet sind und diese dementsprechend dezentral entwässert werden.

Die vorhandenen STORM-Modelle[4] der Panke und der Unteren Wupper sind hydrologisch kalibriert; jedoch waren sie in der bestehenden Konfiguration nicht für eine Stoffstrommodellierung partikulärer Stoffe geeignet. Daher waren umfangreiche Anpassungen und Plausibilitätsprüfungen nötig, um die Stoffströme des Reifenabriebs abzubilden. Die Modellstruktur des Modells der Unteren Wupper verhinderte eine Kopplung mit den ermittelten Fahrbahnflächen und Reifenabriebmengen, da die fehlende Verortung der dortigen Modellflächen ein Verschneiden mit den neuen Daten nicht zuließ. In dem STORM-Modell der unteren Wupper existieren zwar verortete und geometrisch genau definierte Teileinzugsgebiete; jedoch beinhalten diese eine Vielzahl von Elementarflächen[5], dessen Ausdehnung innerhalb des Teileinzugsgebiets unbekannt ist. Dieses Problem trat in dem vorhandenen Pankemodell nicht auf, weil sich hier eine Zuordnung zwischen den vorhandenen Elementarflächen und den neu ermittelten Flächen gut erreichen ließ.

[4] STORM ist ein Niederschlags-Abfluss-Modell, entwickelt von der Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. SIEKER mbH

[5] Homogene Flächentypen wie natürliche Flächen, Dachflächen, Straßenflächen, etc.

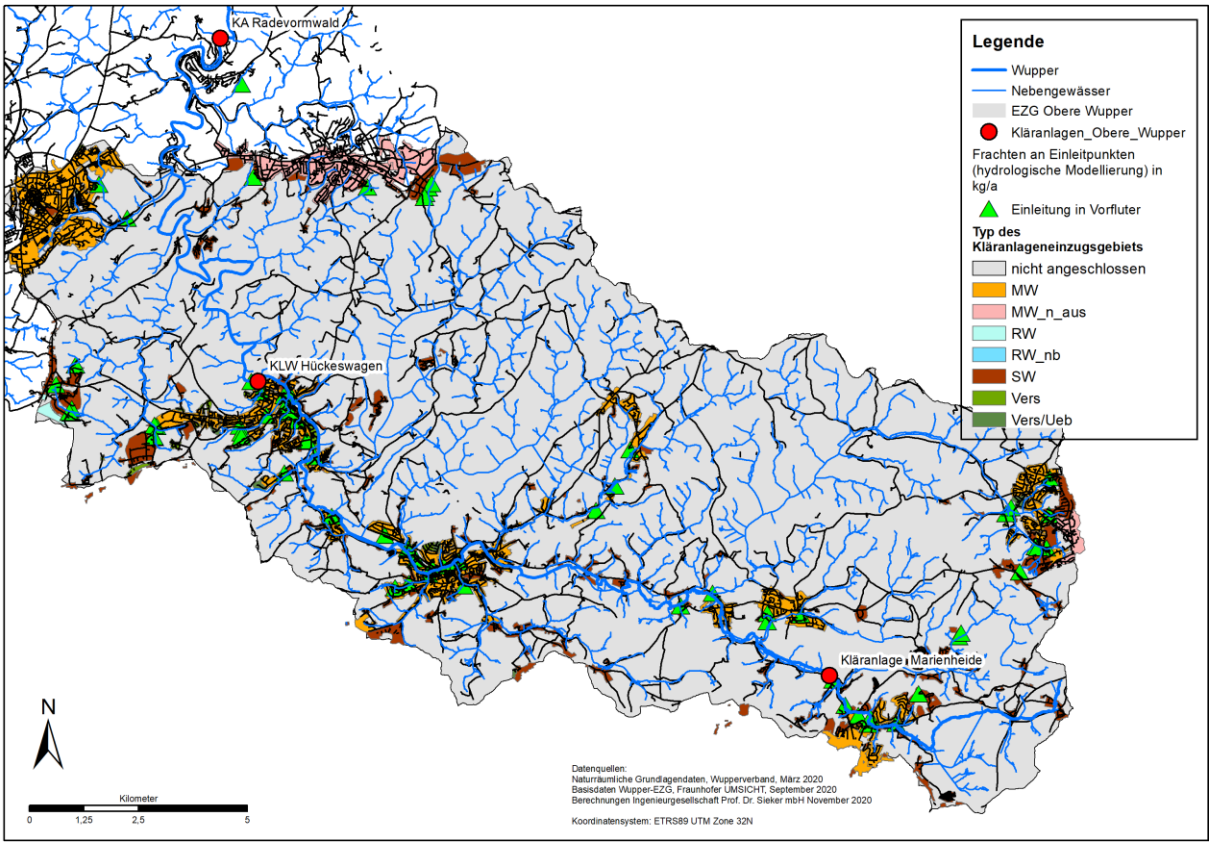


Abbildung 88: Darstellung der Kläranlageneinzugsgebiete innerhalb des Einzugsgebiets der Oberen Wupper

Für das neu erstellte Modell der Oberen Wupper lagen detaillierte Daten zu den Entwässerungsflächen innerhalb der jeweiligen Kläranlageneinzugsgebiete vor. Hier wurden per Model Builder Skript Teileinzugsgebietsflächen und Straßenflächen samt berechnetem Reifenabrieb verschnitten/zugeordnet. Als Ergebnis lagen pro Teileinzugsgebiet sehr differenzierte Elementarflächen vor, die sowohl eine Vielzahl von benötigten Attributen wie Teileinzugsgebiet, Flächengröße. Flächentyp, Häufigkeit der Straßenreinigung etc. als auch die Reifenabriebbelastung enthielten. Im Anschluss wurde das Modell um das Entwässerungsnetz der Misch- und Trennkanalisation ergänzt. Dies umfasst wasserbauliche Anlagen samt Dimensionen, Drosseleinstellungen, Verknüpfungen etc. Zuletzt wurden die zu entwässernden Flächen mit dem Entwässerungssystem verknüpft. Zu beachten ist, dass das hydrologische Modell nur Siedlungsflächen innerhalb der Kläranlageneinzugsgebiete enthält und nicht kalibriert ist. Die hydrologische Kalibrierung ist aber für die Stofffrachtsimulation nicht von belang, weil die Systemgrenzen der Modellierung an den Einleitpunkten des Gewässers enden.

Parallel zu den Arbeiten im Model Builder wurden die benötigten Stoffparameter – ein Stoffparameter je Korngrößenklasse - per Tabellenkalkulation berechnet. Hintergrund ist, dass jeder Straßenfläche in der Stofffrachtsimulation eine jährliche Stofffracht zugeordnet werden muss. Für das Modell der Oberen Wupper wurden diese aus dem Model Builder-Skript übernommen. Da die Flächengrößen im Pankemodell nicht mit den ermittelten Straßenflächen aus dem physikalischen Reifenabriebmodell (GIS-Modell) übereinstimmten, wurden die Stofffrachten proportional auf die bestehenden Straßenflächen übertragen. Ziel war es, die hydrologische Kalibrierung nicht durch eine Veränderung der Flächen zu stören, die ermittelte Reifenmenge aber korrekt über den Proportionalitätsfaktor umzurechnen. Im Ergebnis werden die korrekten Stofffrachten übertragen, unabhängig von den im Modell vorhandenen Flächengrößen.

Für die Umsetzung eines dynamischen Akkumulation- und Abtragansatzes wurden umfangreiche Literaturrecherchen im Rahmen zweier Masterarbeiten und einer Studienarbeit durchgeführt. Diese Recherchen und weitere praktische Tests zeigten, dass es zur Zeit keine praktikablen Ansätze gibt, um verifizierbare Ergebnisse zu erzielen, die über eine Nutzung eines Jahresmittelwerts hinausgehen. Bei der Akkumulation wurde aus diesem Grund ein eigens hierfür entwickelter Ansatz verfolgt, der sowohl Verwehungseffekte als auch die Wirkung der Straßenreinigung dynamisch berücksichtigt (Abschnitt II.1.7.2). Die Akkumulation wurde in der Stofffrachtmodellierung so umgesetzt, dass den jeweiligen aggregierten Straßenflächen in den Teileinzugsgebieten die mittlere jährliche Fracht der *Reifenabriebemissionen* zugeordnet wurde. Diese wurden mit einer Jahresganglinie gekoppelt, die das Verhältnis von Verwehungsansatz und Straßenreinigung sowie Verwehungsansatz ohne Straßenreinigung für 365 Tage einzeln berechnet. So wird eine relative Ganglinie erzeugt, dessen Werte zwischen 0 und 1 liegen. Bei der Stofffrachtsimulation wird der entsprechende Wert mit der mittleren jährlichen Emissionsfracht multipliziert, um zu ermitteln, welche Reifenabriebmenge auf der jeweiligen Straßenfläche vorhanden ist. Diese kann im Regenwetterfall abgewaschen werden. Eine Beispielrechnung dieses Ansatzes für verschiedene Straßenreinigungsintervalle wird in Abbildung 89 dargestellt.

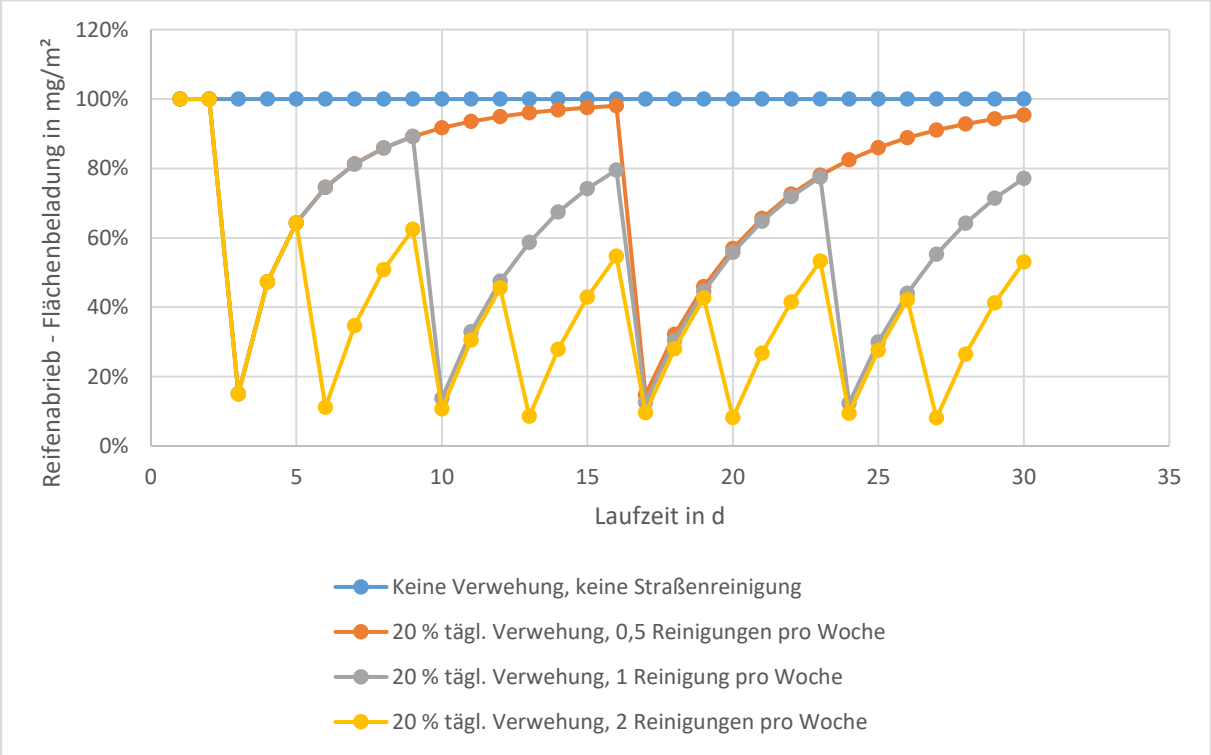


Abbildung 89: Beispielrechnung für den Berechnungsansatz, der zur Abbildung von Akkumulationseffekten infolge von Verwehung und Straßenreinigung genutzt wurde. Ganglinien für Stofffrachtsimulation: Reifenabrieb der Korngrößenklasse 50-100 µm nach unterschiedlichen Frequenzen der Straßenreinigung, Reinigungseffizienz: 85% und einer täglichen Verwehungsrate von 20%

In der Schmutzfrachtmodellierung wurden damit Konzentrationen im Abfluss im Falle von Regenereignissen auf Grundlage der übergebenen mittleren Jahresemissionsfrachten ermittelt, die programmintern über Multiplikation mit den hinterlegten Ganglinien (Abbildung 89) zur finalen Konzentration von Reifenabrieb im abfließenden Regenwasser umgerechnet wurden. Die Abbildung 90 zeigt die in STORM hinterlegte Ganglinie für die Ermittlung der abwaschbaren Reifenabriebfrachten der Korngrößenklasse 50-100 µm im Modell der Oberen Wupper

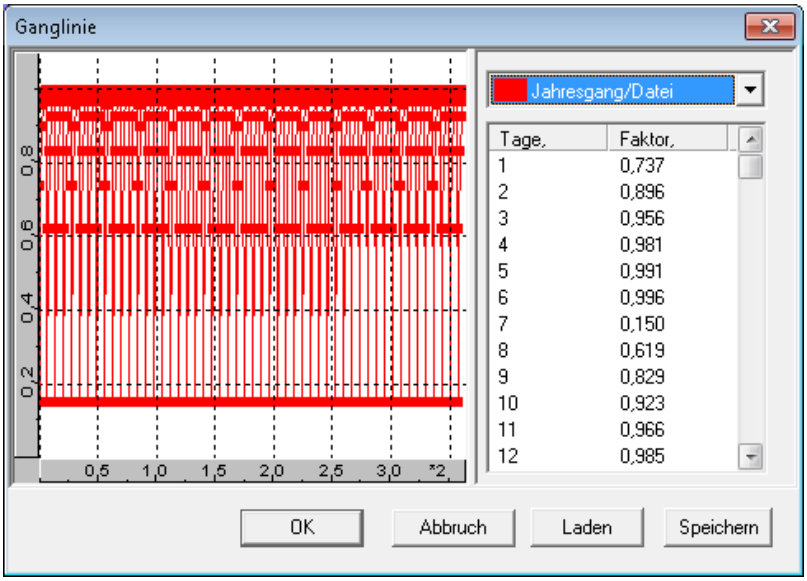


Abbildung 90: Ganglinie für die Ermittlung der abwaschbaren Reifenabriebfrachten für die Korgrößenklasse 50-100 µm im Modell der Oberen Wupper

Für die Stoffstrommodellierung ist die Absetzleistung bzw. Reinigungsleistung von Reifenabriebpartikeln in den wasserbaulichen Anlagen und den Kläranlagen von außerordentlicher Bedeutung. Die Sedimentation von Partikeln im wässrigen Milieu ist von der Partikelgröße und der Partikeldichte abhängig. Die Partikelgröße wird modelltechnisch über die Korngrößenklassen definiert, wobei für die Berechnung der Sedimentation die obere Grenze der Korngrößenklasse aufgrund der Massen-Volumen-Beziehung[6] gewählt wurde.

Der aktuelle Wissenstand zur Dichte von hier: TyreRoadWearParticles (TRWP) und Straßenabrieb ist noch sehr lückenhaft. Die mittlere Dichte von TRWP beträgt 1,8 g/cm³ (Abschnitt I.4.1). Dieser Wert wurde für die Stofffrachtmodellierung verwendet.

Für die Berechnung der Sedimentationsgeschwindigkeit wurde von einer laminaren Strömung ausgegangen. Die Menge der abgeschiedenen Partikel in Abhängigkeit der Durchflusszeit wurde in STORM über Ganglinien abgebildet. Die Kennlinie für das Absetzverhalten von Partikeln der Korngrößenklasse 50 – 100 µm ist in Abbildung 91 dargestellt.

[6] Vor allem größere Partikel tragen zu den hier wichtigen Mengen bzw. Massen bei.

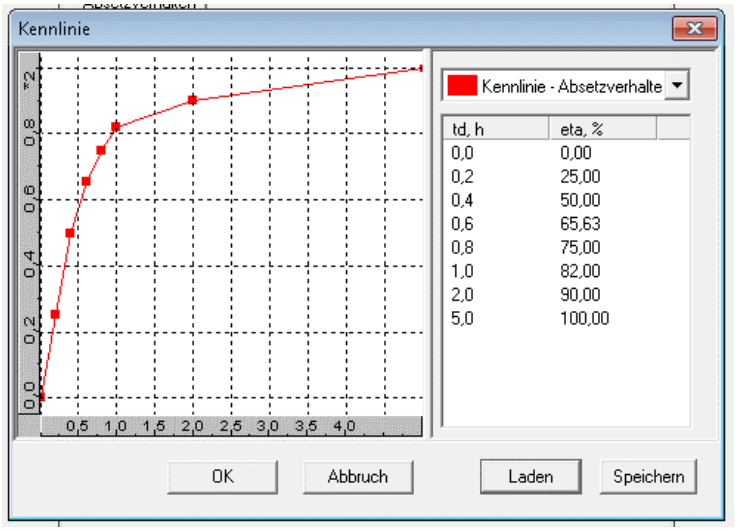


Abbildung 91: Kennlinie zum Absetzverhalten von TRWP der Konrgrößenklasse 50 – 100 µm

Anhand der Beziehung Absetzrate – Durchflusszeit wird von STORM dynamisch berechnet, wieviel Reifenabrieb sich in den jeweiligen wasserbaulichen Anlagen absetzt.

Für die Kläranlagen wurden folgende Entfernungsraten pauschal festgelegt:

- Korngrößenklasse 10-50 µm: 95%
- Korngrößenklasse 50-100 µm: 98%
- Korngrößenklasse 100-500 µm: 99%

Diese pauschale Festlegung wird zum einen mit der besseren Absetzleistung bei steigender Korngröße und der generell sehr hohen Entfernungsleistung von Kläranlagen in Bezug auf partikuläre Stoffe begründet.

II.1.7.4 Hydrologische Modellierung zur Ermittlung der Einträge von Reifenabrieb in die aquatische Umwelt [6]

Mit den in Abschnitt II.1.7.3 vorbereiteten Stofffrachtmodellen für die Obere Wupper und Panke wurden 10-jährige Langzeitsimulationen durchgeführt. Die nötigen Regendaten waren im Pankemodell bereits hinterlegt. Im Wuppermodell wurden die vom Wupperverband zur Verfügung gestellten Regendaten verwendet. Da die Regendaten unterschiedlicher Stationen vorlagen, wurden die Teileinzugsgebiete der jeweiligen Station zugeordnet, die geographisch am nächsten lag. Mit diesen Regendaten wurden die jeweiligen Flächen im Zuge der genannten Langzeitsimulationen beregnet. Als Zeitschritt wurden 5 Minuten gewählt, um die Dynamik der Absetzprozesse gut abbilden zu können.

In Abbildung 92 wird das hydrologische Modell (STORM-Modell) für das EZG Obere Wupper mit den graphisch projizierten Fahrbahnflächen dargestellt.

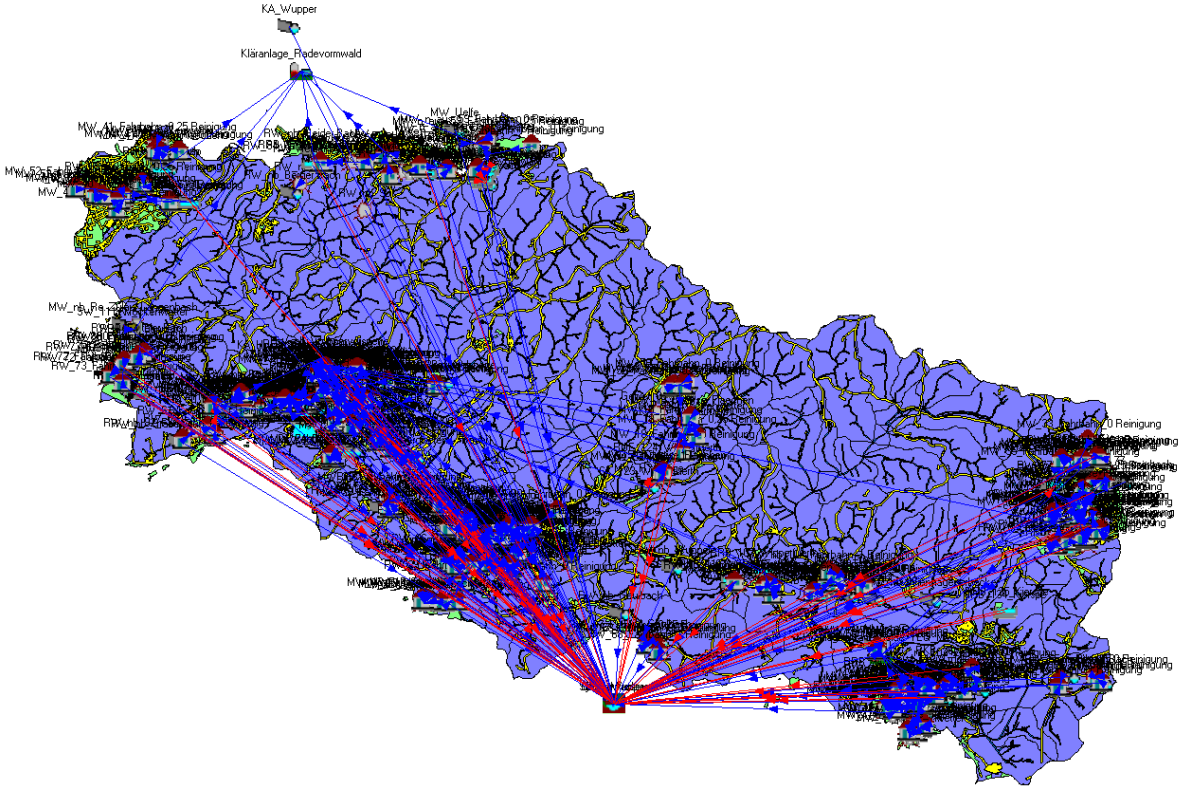


Abbildung 92: EZG Obere Wupper: STORM-Modell für die Ermittlung der Reifenabriebeinträge, Gesamtdarstellung

In Abbildung 93 wird ein Ausschnitt des STORM-Modells für die Obere Wupper dargestellt. Deutlich sind das Kanalnetz mit den Hauptsammlern (rot) und die Gewässer (blau) zu erkennen.

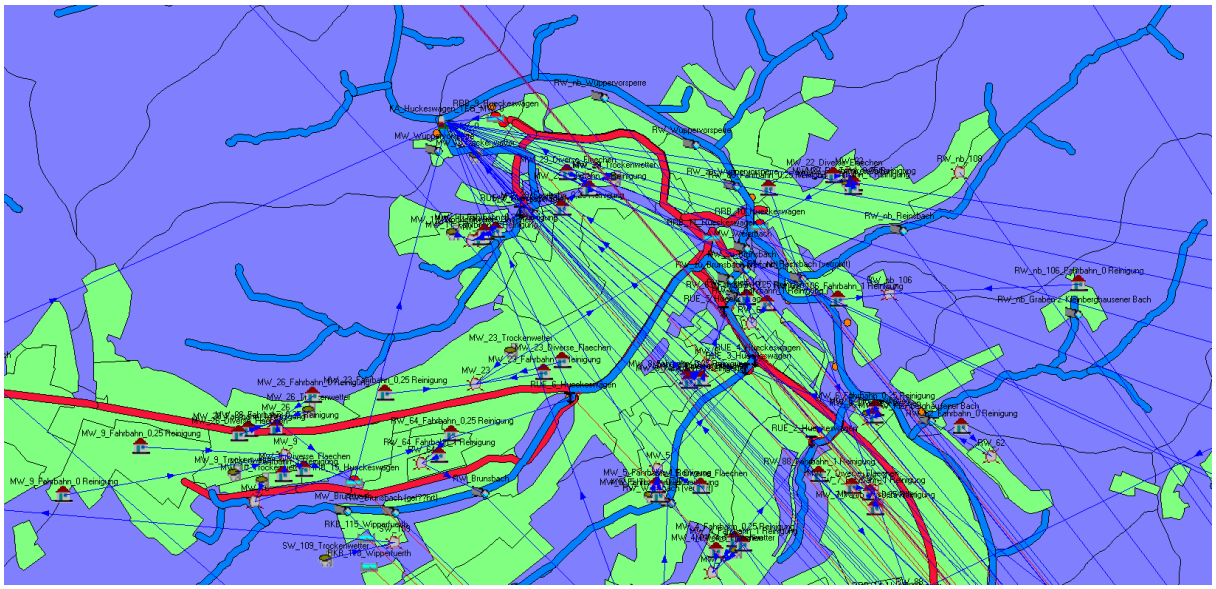


Abbildung 93: EZG Obere Wupper: STORM-Modell für die Ermittlung der Reifenabriebeinträge, Ausschnitt

In Abbildung 94 wird das parallel betrachtete hydrologische Modell (STORM-Modell) für das EZG Panke mit den Einzugsgebieten und dem Gewässernetz dargestellt. Darin sind die Einzugsgebietsobjkete des Modells sowie die abflusswirksamen Flächen zu erkennen.

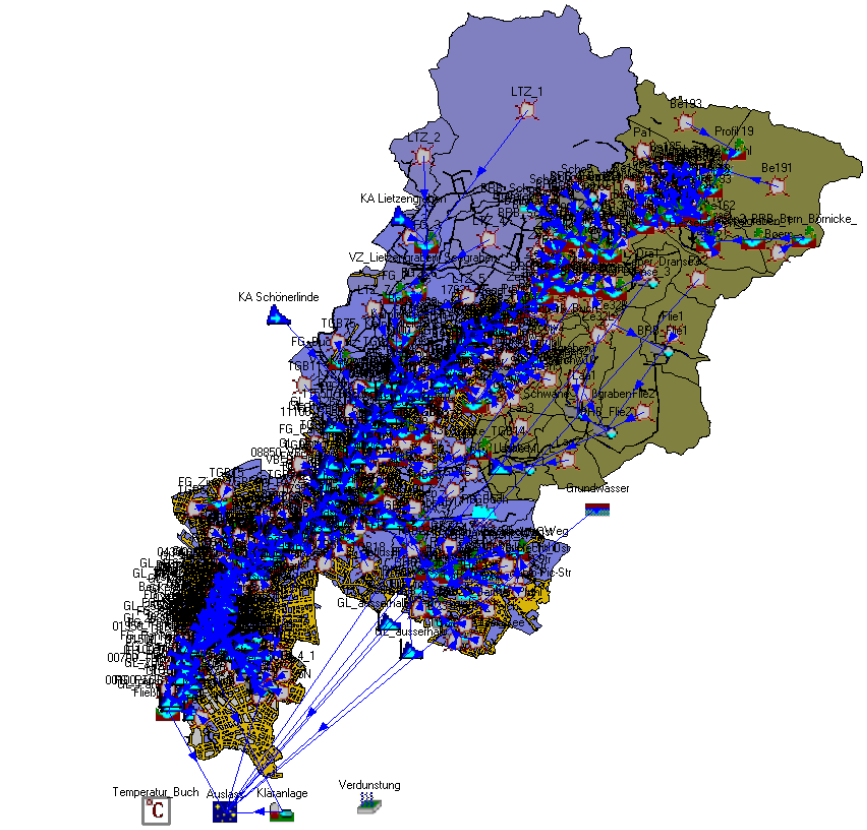


Abbildung 94: : EZG Panke: STORM-Modell für die Ermittlung der Reifenabriebeinträge, Gesamtdarstellung

In Abbildung 95 wird ein Ausschnitt des hydrologischen Modells (STORM-Modell) für das EZG Panke mit den graphisch projizierten Fahrbahnflächen in den Einzugsgebieten dargestellt. Diese werden als reifenabtragwirksame Flächen an die Einzugsgebiete angeschlossen.

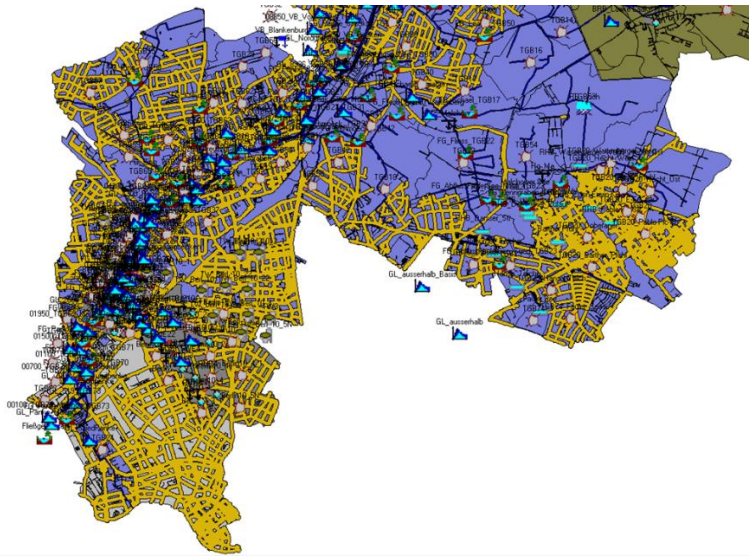


Abbildung 95: : EZG Obere Wupper: STORM-Modell für die Ermittlung der Reifenabriebeinträge, Ausschnitt, Berliner Teil

Die Reifenabriebe wurden nach der oben dargestellten Methodik ermittelt und unter Berücksichtigung der Verwehungsverluste und den angesetzten Straßenreinigungseffekten auf die Flächen übertragen.

Nach Abschluss der Langzeitsimulationen wurden die Simulationsergebnisse in den vorhandenen GIS der EZG Wupper und Panke visualisiert (Kartendarstellungen) und für die Berechnung von Stoffflussdiagrammen (Sankey-Diagramme) sowie der numerischen Auswertung verwendet.

II.1.7.5 Ergebnisauswertung für das Einzugsgebiet Panke [7]

Im Folgenden werden die Eingangsdaten der Gebiete und die Ergebnisse für die Gesamtmodellierung der Emission, Immission und Verteilung im Einzugsgebiet für das Einzugsgebiet Panke dargestellt und bewertet.

In der Abbildung 96 werden die verwendeten Straßenkategorien im Panke EZG dargestellt. Diese waren im Basisdatensatz von UMSICHT hinterlegt.

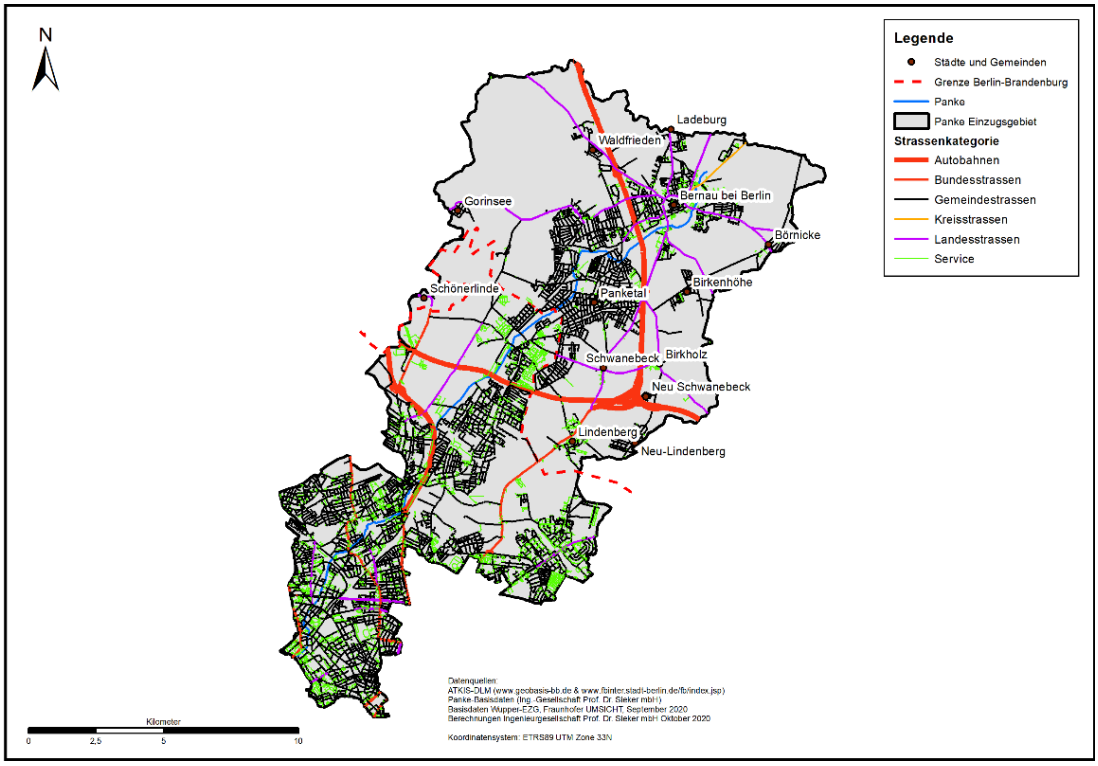


Abbildung 96: EZG Panke – Kartendarstellung der Straßenkategorien

In Abbildung 97 werden die Straßenlängen und –flächen differenziert nach der jeweiligen Straßenkategorie dargestellt. Es fällt auf, dass sowohl die Gemeindestraßen (Nebenstraßen) als auch die untergeordneten Servicestraßen und –wege sowohl bei der Länge als auch der Fläche überwiegen. Autobahn, Bundes- und Landesstraßen haben nur einen geringen Anteil. Kreisstraßen sind kaum vorhanden und nur im Brandenburger Teil zu finden.

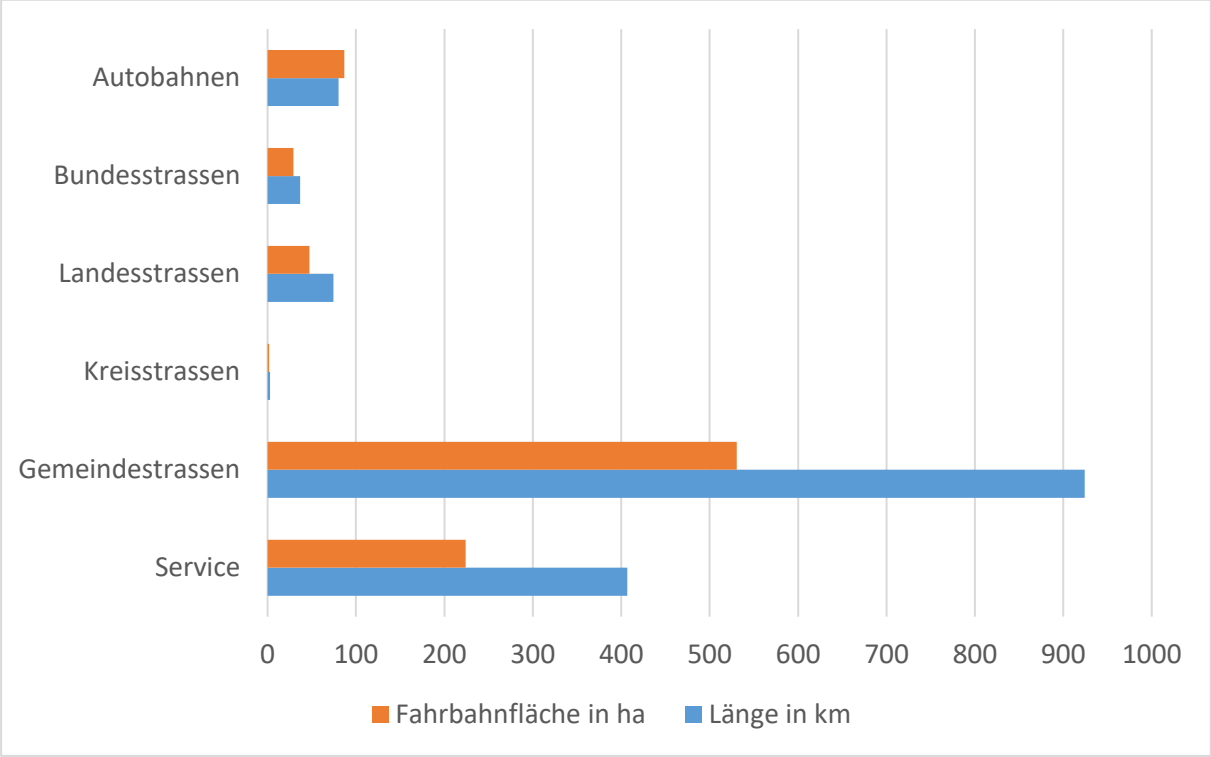


Abbildung 97: EZG Panke - Bilanz der Straßenlängen und –flächen nach Straßenkategorie

Bei den DTV ist allerdings in Abbildung 98 zu sehen, dass im EZG der Panke vor allem die übergeordneten Straßen mit den höheren Verkehrsbelastungen im Mittel ab 6000 bis zu 16000 KFZ/d belegt sind. Die Auswertung der mittleren Belastung (Abbildung 99) zeigt, dass Gemeindestraßen eine geringere Belastung von im Mittel ca. 2200 KFZ/d haben.

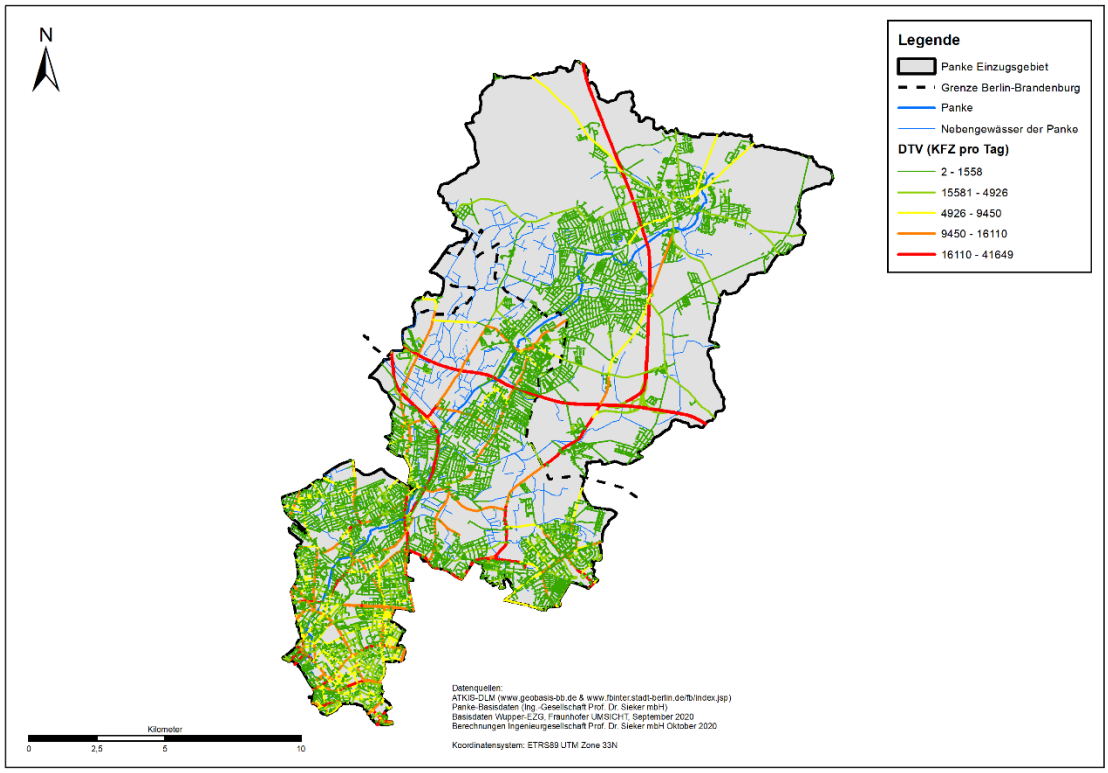


Abbildung 98: EZG Panke - Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV), (Offizielle Zähldaten, ergänzt um Modellierung vom Projektpartner UMSICHT

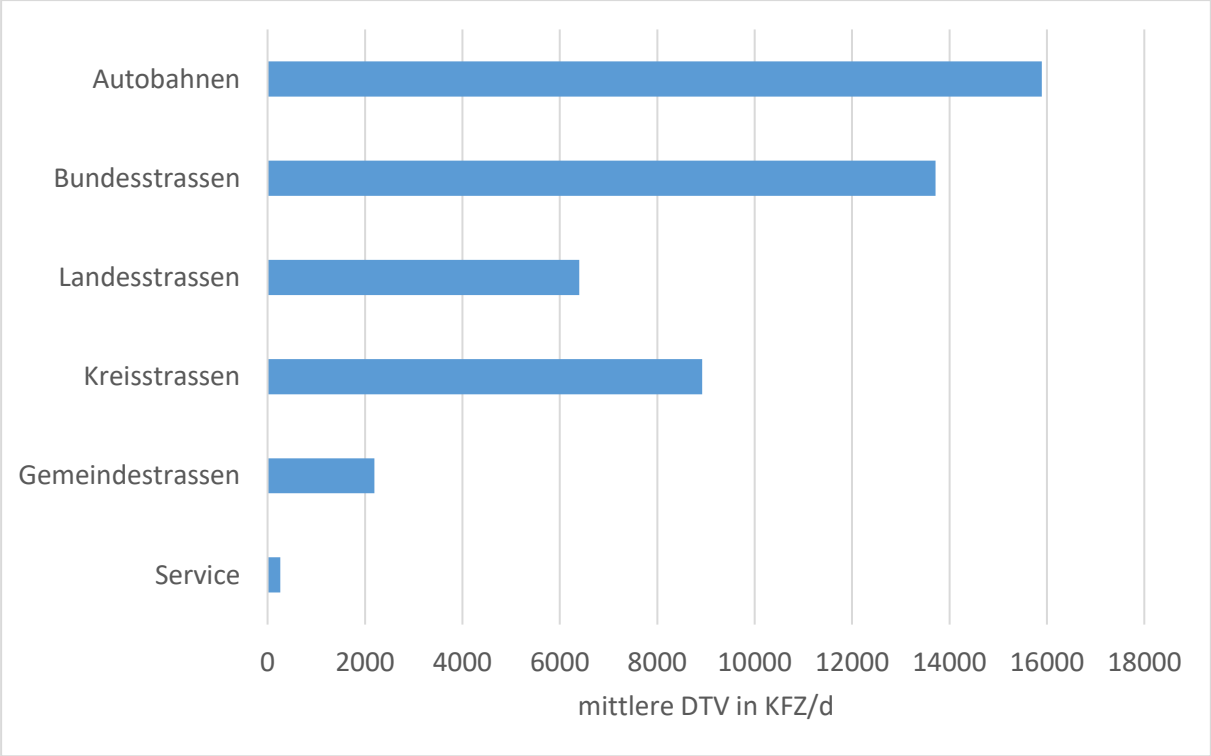


Abbildung 99: EZG Panke - Bilanz der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV), (Offizielle Zähldaten ergänzt um Modellierung vom Projektpartner UMSICHT

Tabelle 11 zeigt den ermittelten mittleren Verschleiß je PKW, LWK und KFZ[7], differenziert nach der jeweiligen Straßenkategorie. Aufgrund der hohen Geschwindigkeiten finden sich die höchsten Reifenabriebe je KZF in mg/km im Wesentlichen bei den Autobahnen. Bei den übrigen Straßen sind die Häufigkeit von Fahrsituationen mit Kurven, Kreisverkehren und Kreuzungen, im Fall der Servicestraßen ist der hohe LKW-Anteil maßgebend für den hohen mittleren Verschleiß je KFZ.

Tabelle 11: EZG Panke - Mittlere Reifenabriebemissionen je KFZ, PKW und LKW, differenziert nach vorhandenen Straßenkategorien

Straßenkategorie	mittlerer Verschleiß je KFZ in mg/km	mittlerer Verschleiß je PKW in mg/km	mittlerer Verschleiß je LKW in mg/km
Autobahnen	251	115	1.088
Bundesstraßen	195	98	1.420
Gemeindestraßen	182	84	1.332
Kreisstraßen	101	77	752
Landstraßen	176	88	1.402
Service	343	78	2.403

Abbildung 100 stellt den Anteil der ermittelten Reifenabriebemissionen je Straßenkategorie den entsprechenden Anteilen der Fahrbahnfläche für das gesamte EZG Panke gegenüber. Die Auswertung zeigt, dass sowohl Autobahnen, als auch Bundesstraßen und Landesstraßen überproportional viel Reifenabrieb erzeugen.

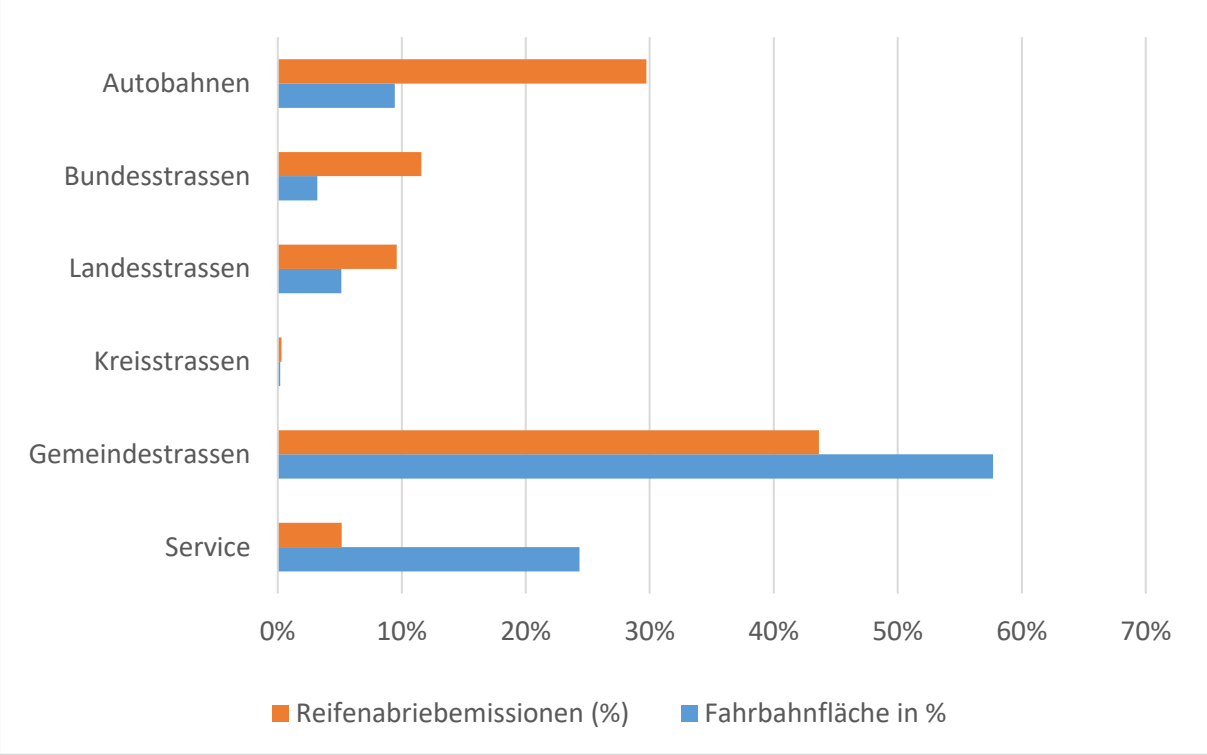


Abbildung 100: EZG Panke – Straßenkategorie versus Reifenabriebemissionen

[7] Der mittlere Verschleiß von KFZ ergibt sich aus dem gewichteten Mittelwert des Verschleißes von PKW und LKW.

Bei den Fahrsituationen über alle Straßenklassen (Tabelle 12) zeigt sich, wie vorher angemerkt, dass Kreuzungen und Kurven entscheidend für die hohen Werte des fahrzeugbezogenen Verschleißes beim Reifen sind. Steigungen spielen im Einzugsgebiet der Panke nur eine unwesentliche Rolle. Dabei spielt auch eine Rolle, dass die Autobahnen wohl nur leicht kurvig sind, es fahren aber sehr viele Fahrzeuge mit höheren Geschwindigkeiten.

Tabelle 12: EZG Panke - Mittlere Reifenabriebemissionen je KFZ, PKW und LKW, differenziert nach den vorliegenden Fahrsituationen

Fahrsituation	mittlerer Verschleiß je KFZ in mg/km	mittlerer Verschleiß je PKW in mg/km	mittlerer Verschleiß je LKW in mg/km
Gerade	29	17	171
Kreuzung	863	530	6.327
Kurve	647	338	4.325
Steigung	142	83	1.061

Abbildung 101 stellt die Anteile der Fahrbahnflächen je Fahrsituation und die entsprechenden relativen Reifenabriebemissionen gegenüber. Es wird ersichtlich, dass das physikalische Reifenabriebmodell vor allem Kreuzungen als Hotspot für den Reifenabrieb ermittelt, wohingegen in geraden Straßenabschnitten unterproportional wenig Reifenabrieb erzeugt wird.

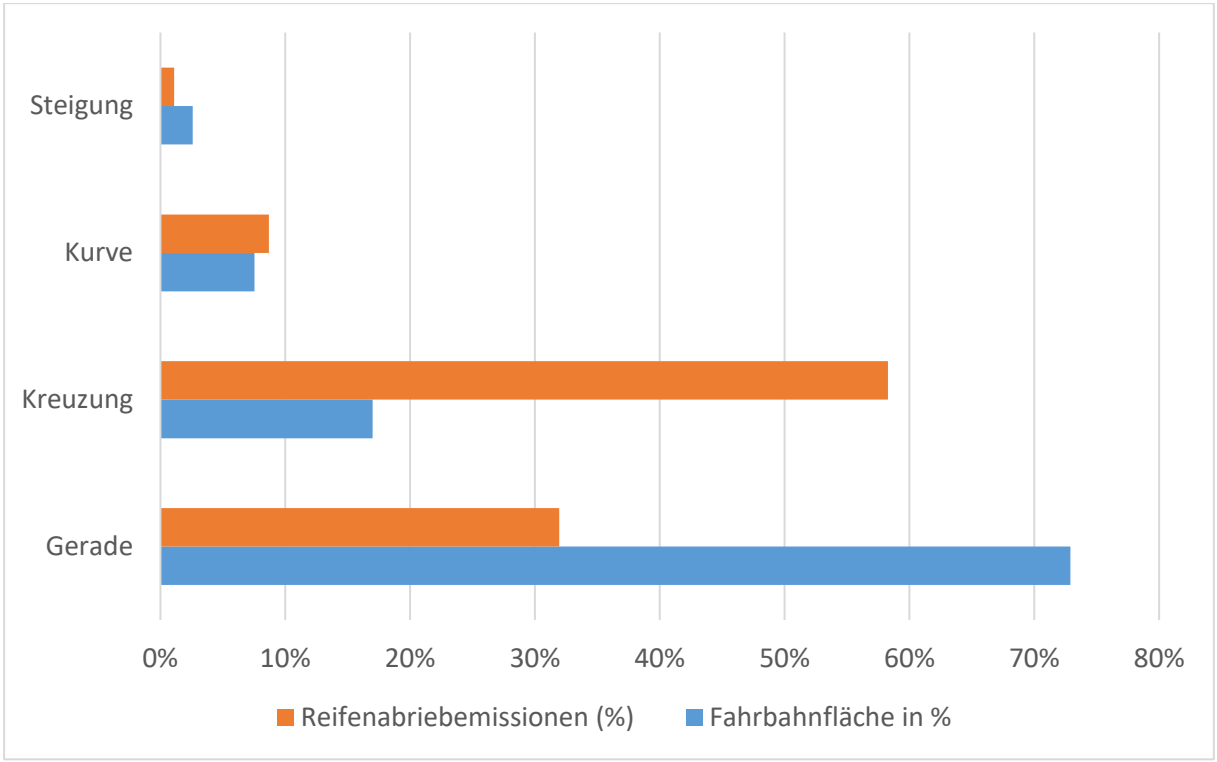


Abbildung 101: EZG Panke – Fahrsituation versus Reifenabriebemissionen

Tabelle 13 zeigt den mittleren Verschleiß im Gesamtgebiet bezogen auf PKW, LKW und KFZ. Das gewichtete Mittel der Reifenabriebemissionen liegt bei 228 mg/km/KFZ. Bei PKW liegt der mittlere Verschleiß bei rund 135 mg/km und somit über dem gesamtdeutschen Mittelwert von 110 mg/km. Das gewichtete Mittel von rund 228 mg/km/KFZ zeigt, dass der Anteil von PKW an der DTV im physikalischen Reifenabriebmodell deutlich überwiegt.

Tabelle 13: EZG Panke - Mittlere Reifenabriebemissionen je KFZ, PKW und LKW im gesamten Einzugsgebiet

Fahrzeugart	Mittlerer Verschleiß, gesamt in mg/km/KFZ
KFZ (gewichtetes Mittel)	228
PKW	135
LKW	1609

Abbildung 102 veranschaulicht die Punkte, an denen die fahrzeugbezogenen Abriebe vorwiegend entstehen. Die Straßenabschnitte mit den höchsten Abriebmengen pro Fahrzeug sind orange und rot markiert. Es sind klar einzelne Hotspot bei der Verschleißintensität zu identifizieren.

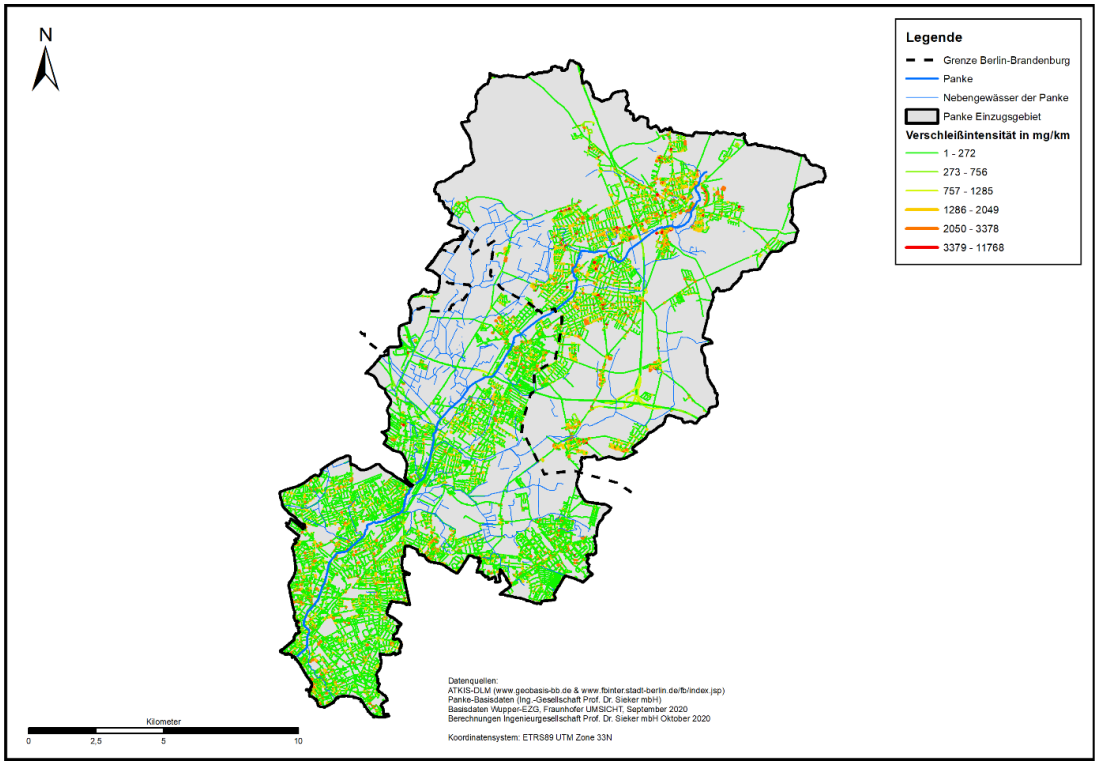


Abbildung 102: EZG Panke - Kartendarstellung der Verschleißintensität von KFZ (mg/km)

Bei Multiplikation der entstehenden Menge an Reifenabrieb pro Fahrzeug mit der Anzahl der Fahrzeuge, die pro Straßenabschnitt fahren, ergibt sich die Gesamtmenge an Reifenabrieb, die pro Tag und Straßenabschnitt erzeugt wird. Wird diese auf die Fläche des Straßenabschnitts und einem Zeitraum von 365 Tagen bezogen, so berechnet sich die zeitliche, flächenbezogene Frachtbelastung in mg/(m²*a). Abbildung 103 zeigt, dass die Autobahnen und andere übergeordnete

Straßen sowie Kreuzungen und Kurven die Straßenabschnitte mit den höchsten Abriebfrachten sind. Des Weiteren ist erkennbar, dass der urbane Berliner Raum farblich deutlich hervortritt.

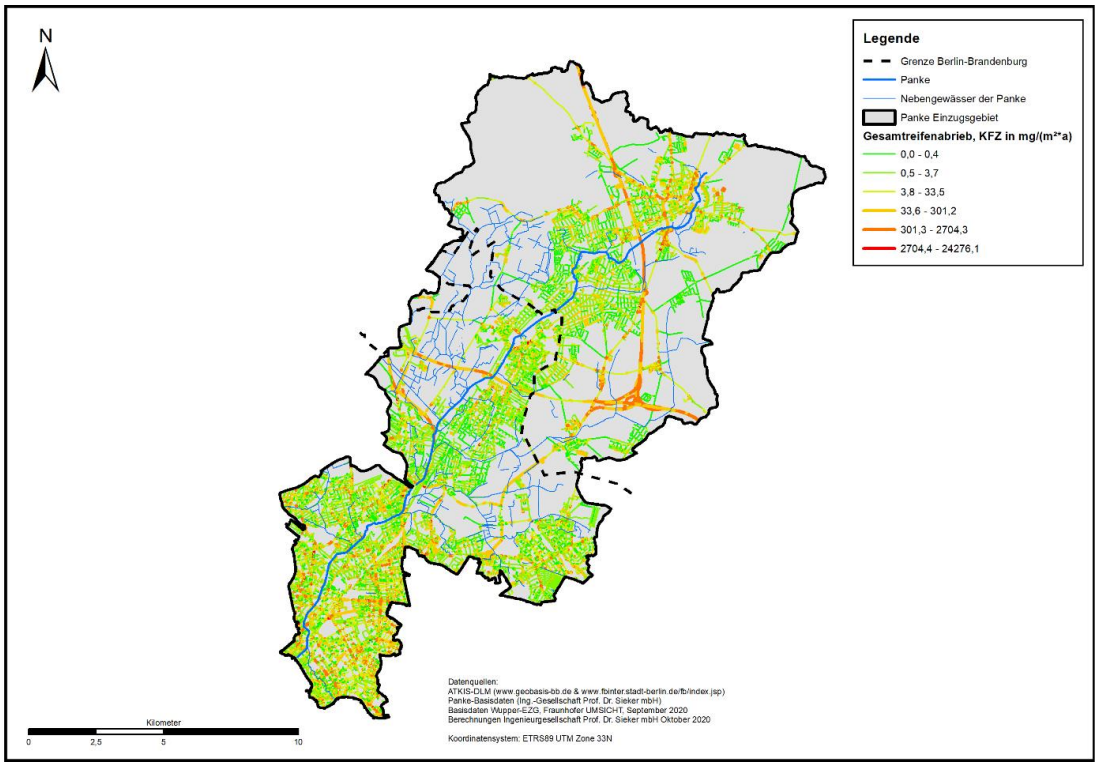


Abbildung 103: EZG Panke - Kartendarstellung der Reifenabriebemission von KFZ (mg/(m²*a))

Die Vergrößerung (Abbildung 104) veranschaulicht im Stadtgebiet Berlins die Straßenabschnitte, auf denen je KFZ die höchsten Reifenabriebsmengen entstehen. Hierbei handelt es sich vorwiegend um Kreuzungen, Kurven und Kreisverkehre.

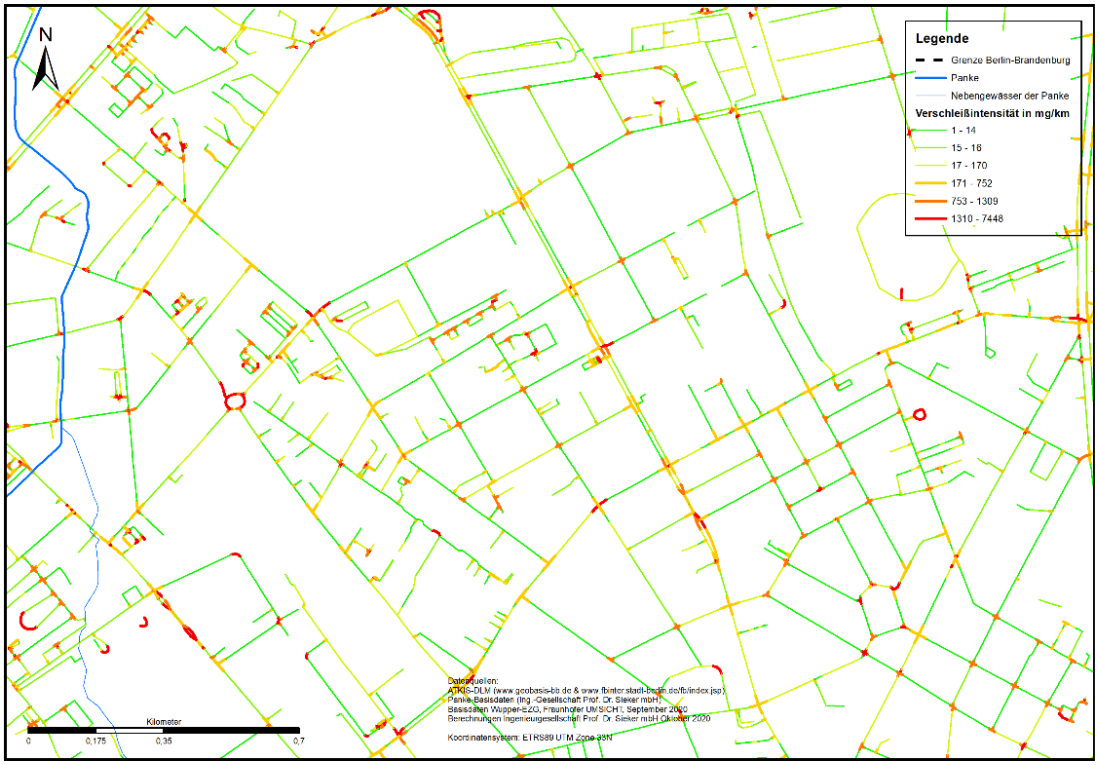


Abbildung 104: EZG Panke - Ausschnitt aus Mischwassereinzugsgebiet im Berliner Teil - Kartendarstellung der Verschleißintensität von KFZ (mg/km)

Abbildung 105 zeigt den gleichen Vergrößerungsausschnitt wie Abbildung 104 mit der Gesamtemission an Reifenabrieb je Quadratmeter und Jahr unter Berücksichtigung der DTV. Es werden die Hotspots aus der vorhergehenden Karte gefunden, jedoch ist ersichtlich, dass die DTV auch an geraden, tendenziell verschleißarmen Streckenabschnitten zu höherem Abriebaufkommen führt bzw. manche verschleißenden Kreuzungen auf das Jahr bezogen weniger ins Gewicht fallen.

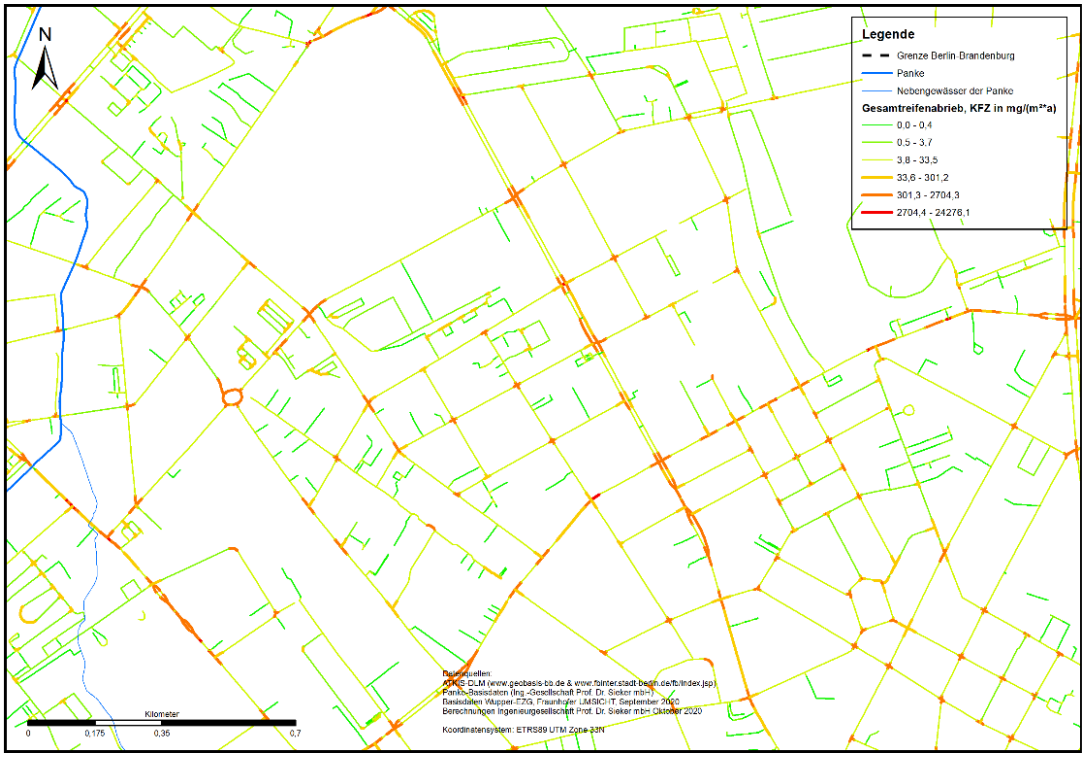


Abbildung 105: EZG Panke - Ausschnitt aus Mischwassereinzugsgebiet im Berliner Teil - Kartendarstellung der Reifenabriebemission von KFZ (mg/(m²*a))

Abbildung 106 veranschaulicht die einzugsgebietsbezogenen Reifenabriebemisssionen als absolute Fracht in kg/a. Hier stechen die Autobahnbereiche und zentrale innerstädtischen Bereiche hervor.

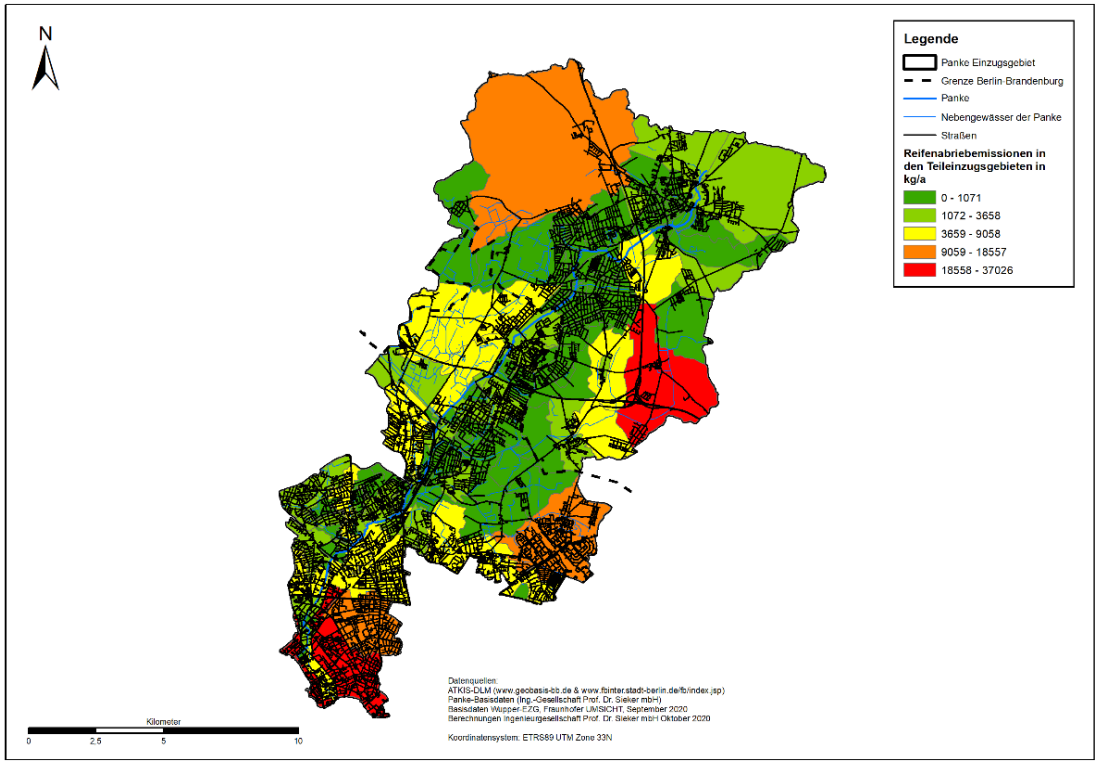


Abbildung 106: EZG Panke – absolute Gesamtabriebemission in den Teileinzugsgebieten (kg/a)

Abbildung 107 stellt die Reifenabriebemissionen in Bezug auf die jeweilige Fahrbahnfläche in den einzelnen Teileinzugsgebieten als Fracht in g/(m²*a) dar. Auch hier stechen die Autobahnbereiche und der zentraleren innerstädtischen Bereiche hervor. Es werden aber auch weitere Bereiche dazwischen sichtbar, die auch relevante Anteile an Reifenabrieb liefern.

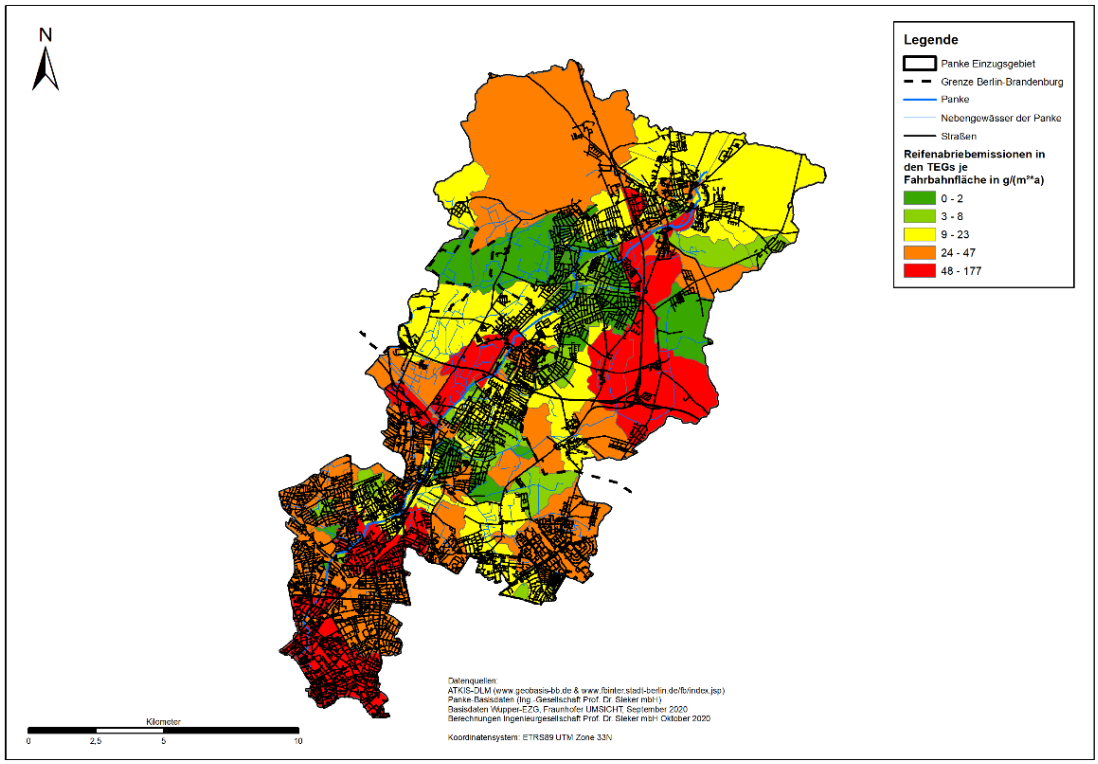


Abbildung 107: EZG Panke – mittlere Fracht je Straßenfläche in den Teileinzugsgebieten (g/(m²*a))

Abbildung 108 zeigt die betrachteten Einleitpunkte in die Panke. Die meisten Einleitpunkte befinden sich im Trennsystem. Im Mischsystem des zentralen innerstädtischen Bereichs gibt es nur wenige Überläufe.

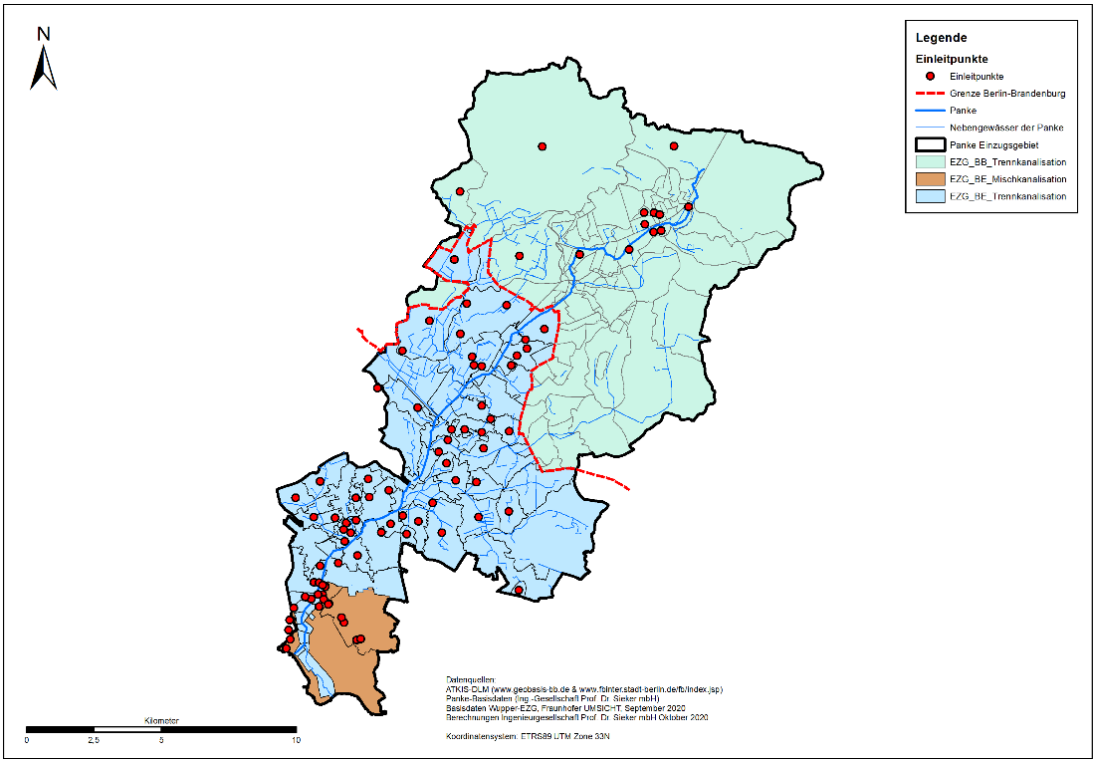


Abbildung 108: EZG Panke – Darstellung der Einleitpunkte in den Teileinzugsgebieten

Abbildung 109 gibt die verorteten Ergebnisse der durchgeführten Stofffrachtsimulation wieder. Die höchsten Einleitfrachten befinden sich erwartungsgemäß im innerstädtischen Bereich. Neben den Mischwasserüberläufen sind es vor allem die Einleitungen aus den Trennsystemen, die in der zweiten, vergrößerten Graphik (Abbildung 110) genauer erkennbar sind. Die drei betrachteten Korngrößenklassen (10 – 50 µm, 50 - 100 µm und 100 – 500 µm) sind in den Balkendiagrammen dargestellt. Die größte Korngrößenklasse bestimmt die Masse der Fracht zusammen mit der mittleren Korngrößenklasse. Der Anteil der Größenklasse 10-50 µm ist dagegen überall

erwartungsgemäß sehr klein. Die maximale Reifenabriebfracht an einem Einleitpunkt beträgt 4921 kg/a.

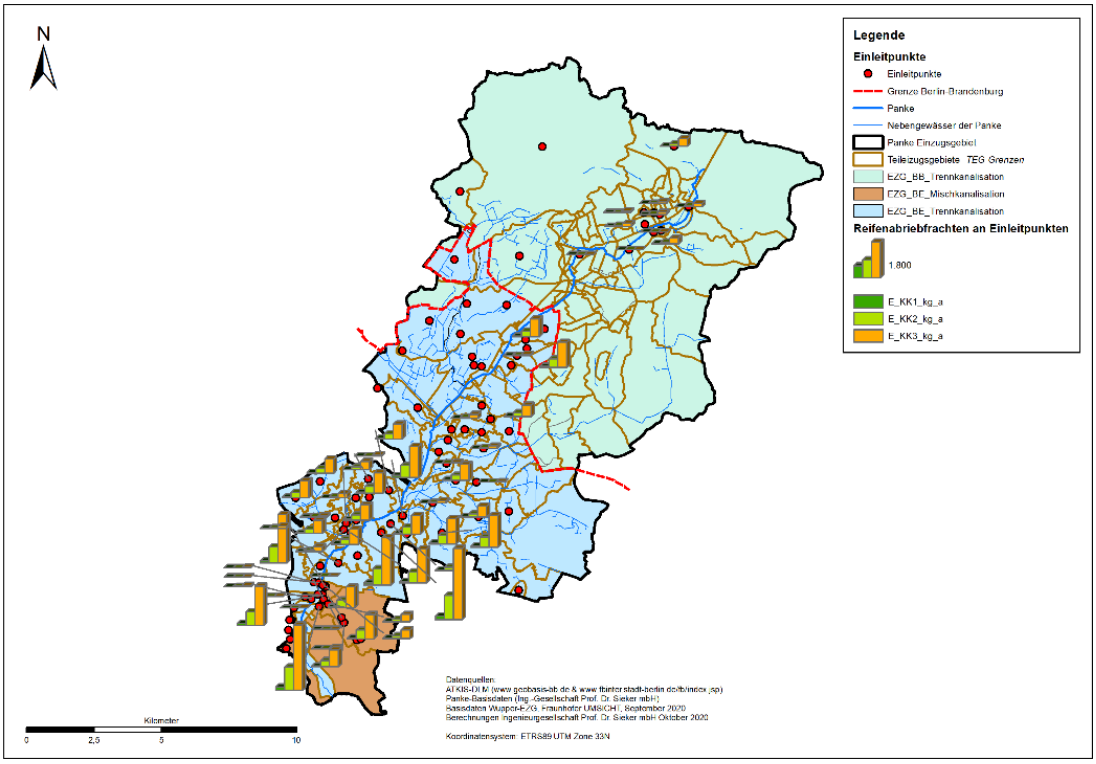


Abbildung 109: EZG Panke - Darstellung der eingeleiteten Jahresfrachten an Reifenabrieb für die relevanten Einleitpunkte in kg/a

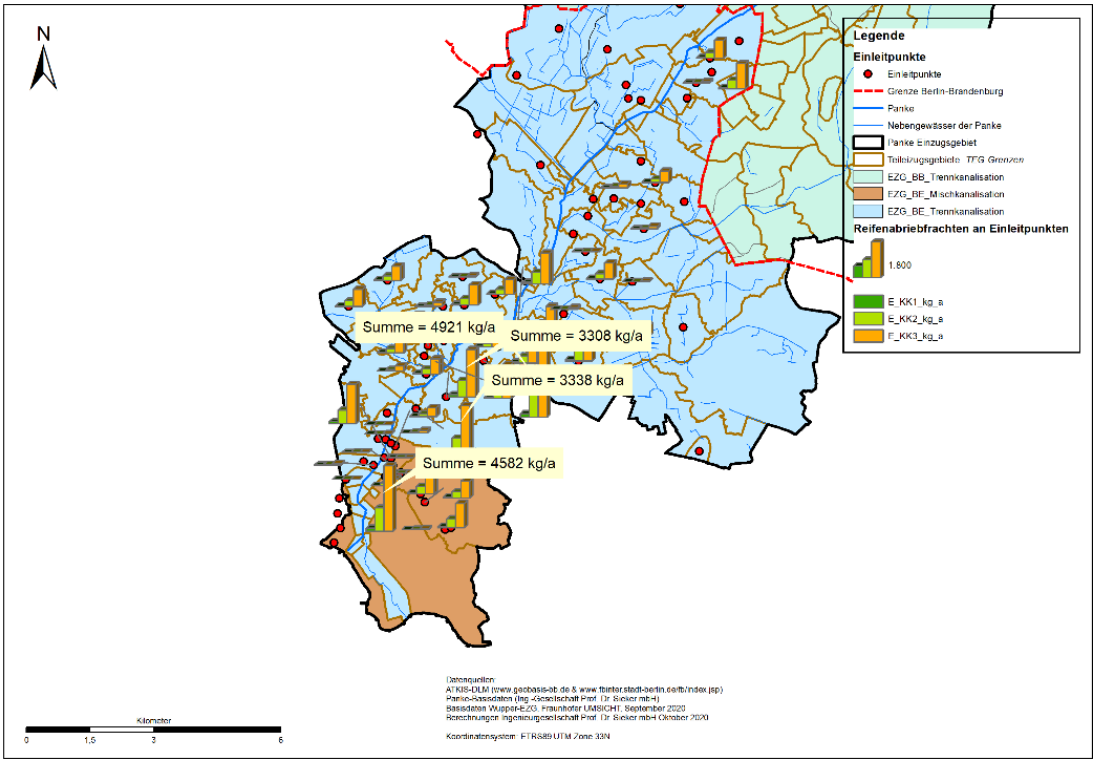


Abbildung 110: EZG Panke - Darstellung der eingeleiteten Jahresfrachten an Reifenabrieb für die relevanten Einleitpunkte in kg/a, Berliner Teil

Um den Gesamtüberblick aus der Kopplung des physikalischen und des hydrologischen Stofffrachtmodells zu erhalten, wurde ein Stoffstrom-(Sankey)-Diagramm mit allen relevanten Stoffströmen erstellt (Abbildung 111).

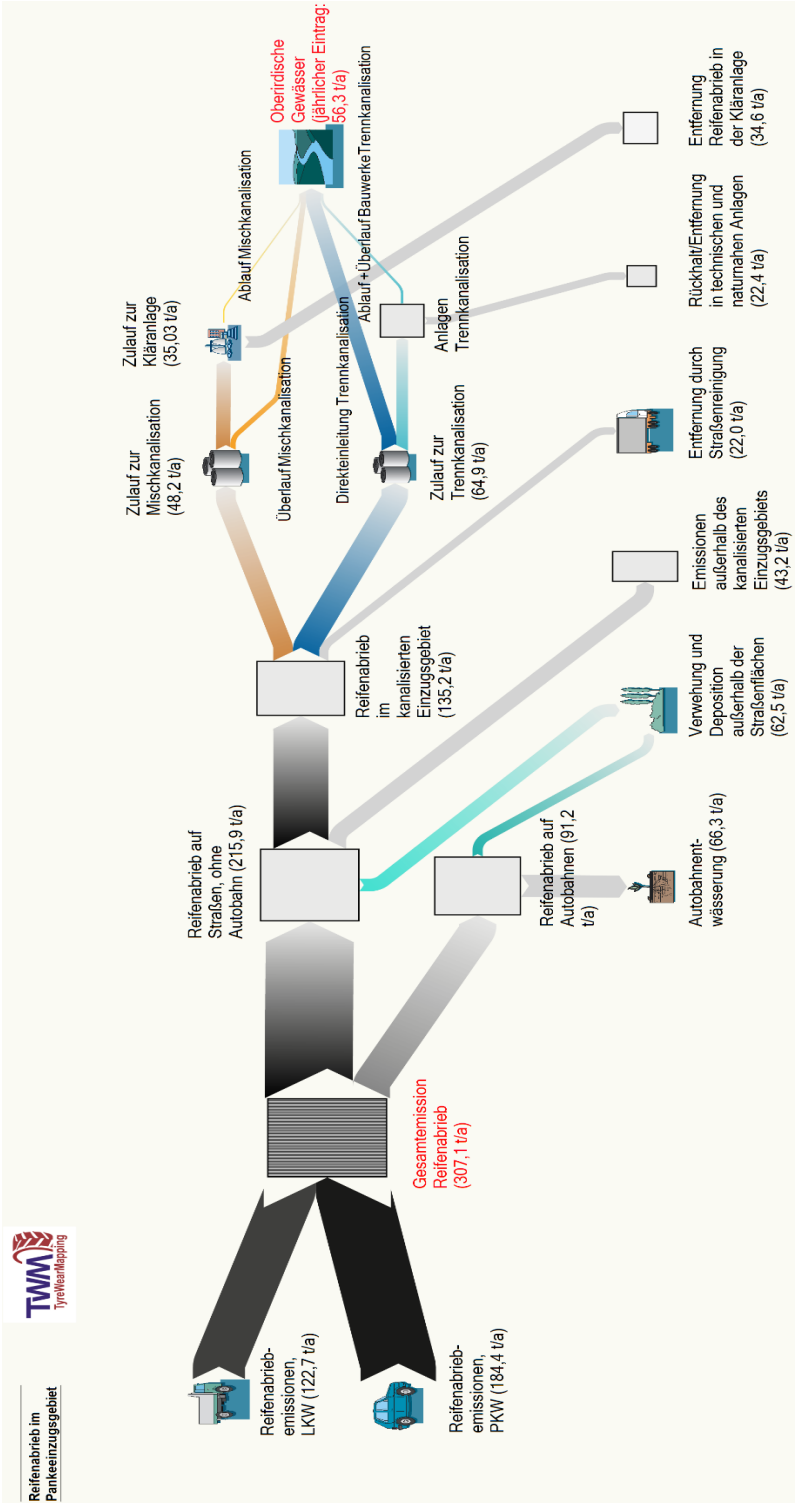


Abbildung 111: EZG Panke – Stofffrachtdiagramm für die Entstehung, Verteilung und den Verbleib von Reifenabrieb gemäß Kopplung von physikalischem Emissionsmodell und Stofffrachtmodellierung

Die tabellarische Auswertung der Stoffströme ist in Tabelle 14 dargestellt. Von der Gesamtmenge an Reifenabrieb gelangen 55,7 %[8] über Verwehung bzw. Entwässerung mit Versickerung über die Böschung in seitlich angrenzende Bereiche. Ein geringer Teil davon kann auch in Straßengräben gelangen, die an Gewässer angeschlossen sind. Ungefähr 7,2 % werden von der Straßenreinigung entfernt. Von den 15,7 % im Mischsystem gelangen 4,5 % im Wesentlichen über Mischwasserüberläufe, von den 21,2 % im Trennsystem 13,1 % ins Gewässer. Insgesamt gelangen 18,3 % des gesamten entstehenden Reifenabriebes in die oberflächlichen Gewässer, im Wesentlichen dabei über direkte Einleitungen aus dem Trennsystem. Der Anteil an Reifenabrieb, der über die Luftverwehung direkt in die Panke eingeleitet wird, wird als vernachlässigbar gering betrachtet.

Tabelle 14: EZG Panke - Bilanzierung der Reifenabriebemissionen und –verteilung im Einzugsgebiet (KA: Kläranlage, RW: Regenwasser, RA: Reifenabrieb)

Entstehung und Einleitung in Gewässer	Fracht (t/a)	Fracht (%)	KA und zentrale RW-Behandlung (t/a)	KA und zentrale RW-Behandlung (%)	Davon Einleitfracht in Gewässer (t/a)	Davon Einleitfracht in Gewässer (%)
Gesamtmenge RA	307,1	100,0				
Straßenentwässerung außerhalb des Kanaleinzugsgebiets (Versickerung Böschung, Versickerungsanlagen, Rückhaltung)	109,5	35,7				
Verwehung im gesamten Einzugsgebiet	62,5	20,4				
Straßenreinigung	22	7,2				
Mischsystem gesamt, davon Überlauf	48,2	15,7			13,17	4,3
Mischsystem, davon über KA			35,03	11,4%	0,49	0,2
Trennsystem gesamt, davon Direkteinleitung	64,97	21,1			36,26	11,8
Trennsystem, davon über Bauwerke Rückhaltung			28,7	9,3%	6,35	2,1
Summe	***307,1***	***100***			***56,27***	***18,3***

[8] 66,3 t Autobahnentwässerung + 62,5 t Verwehung und Deposition außerhalb von Straßenflächen

In Abbildung 112 wird der Verbleib der einzelnen Partikelkorngrößenklassen von der Gesamtemission bis zum Eintrag in die Gewässer des Einzugsgebietes der Panke dargestellt.

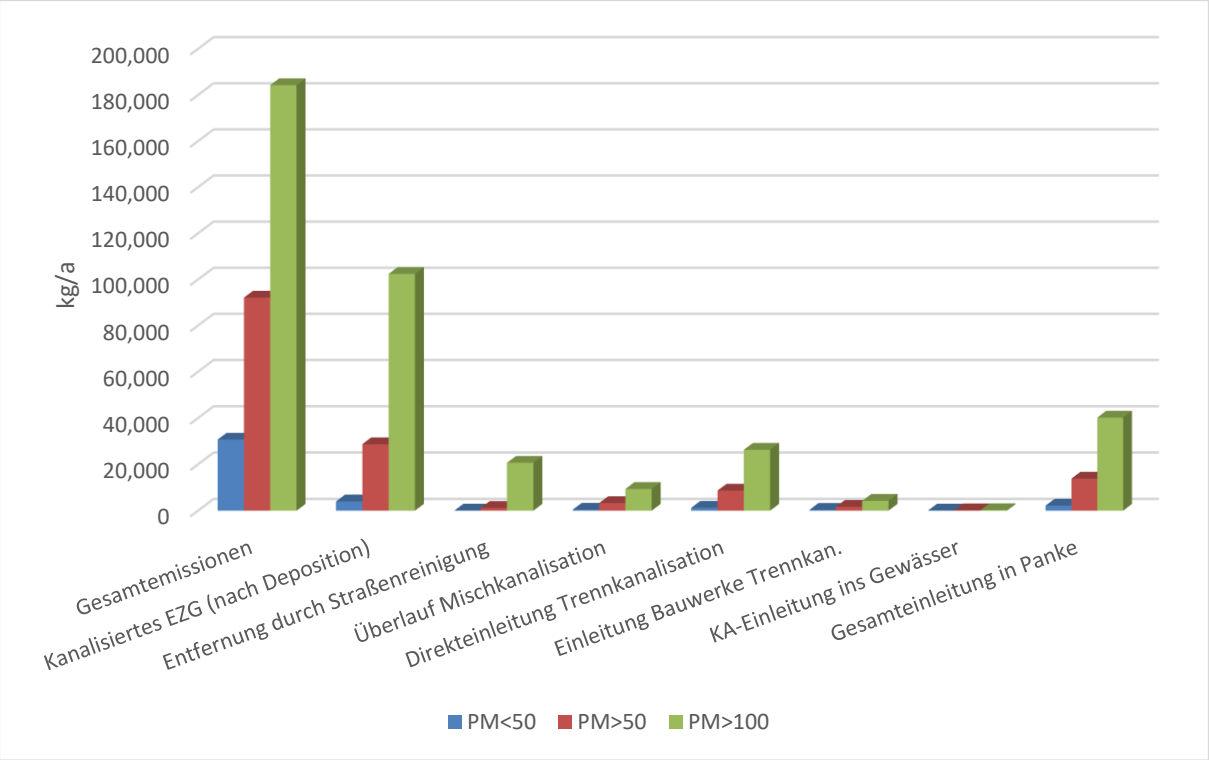


Abbildung 112: EZG Panke - Partikelverteilung Reifenabrieb von der Quelle bis zur Einleitung in die Oberflächengewässer

Es zeigt sich, dass bis zum Eintrag in die Kanalisation erhebliche Mengen der Feinfraktion < 50 µm durch Verwehung in die Umgebung der Straßenflächen bzw. in dezentralen, nicht angeschlossenen Straßenentwässerungselementen verbleiben. Die Straßenreinigung entfernt hauptsächlich die beiden größten Partikelkorngrößenklassen. Der höchste Anteil des Eintrags in die Gewässer entfällt auf die Direkteinleitung aus dem Trennsystem. Hier wird deutlich, dass durch Behandlungsanlagen im Trennsystem die kleinste Partikelfraktion nur zu einem geringeren Anteil zurückgehalten werden kann. Ein geringer Anteil wird über das Mischsystem eingeleitet.

II.1.7.6 Ergebnisauswertung für das Einzugsgebiet Wupper [7]

In Abbildung 113 werden die verwendeten Straßenkategorien im Wupper-EZG dargestellt. Diese waren im Basisdatensatz von UMSICHT hinterlegt.

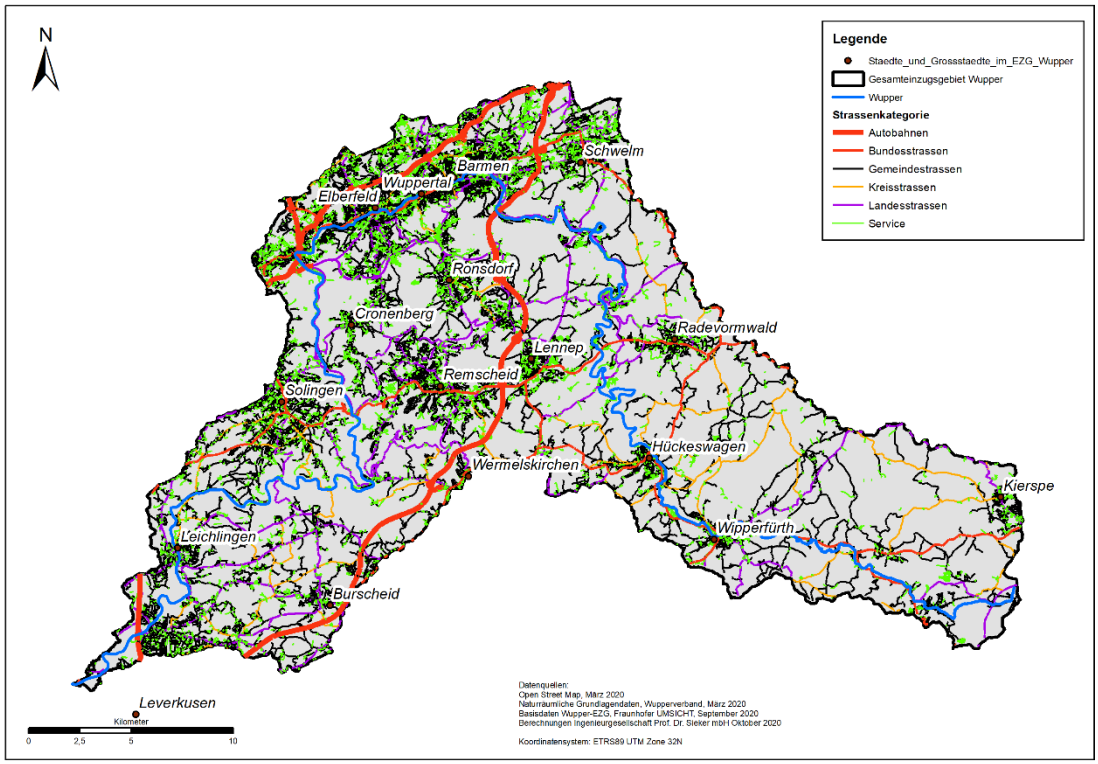


Abbildung 113: EZG Wupper – Kartendarstellung der Straßenkategorien

In Abbildung 114 werden die Straßenlängen und –flächen differenziert nach der jeweiligen Straßenkategorie dargestellt. Es fällt auf, dass – analog zum Panke-EZG – sowohl die Gemeindestraßen (Nebenstraßen) als auch die untergeordneten Servicestraßen und –wege bei der Länge als auch der Fläche überwiegen. Autobahn, Bundes-, Landes- und Kreisstraßen haben nur einen geringen Anteil an den Gesamtlängen bzw. -flächen.

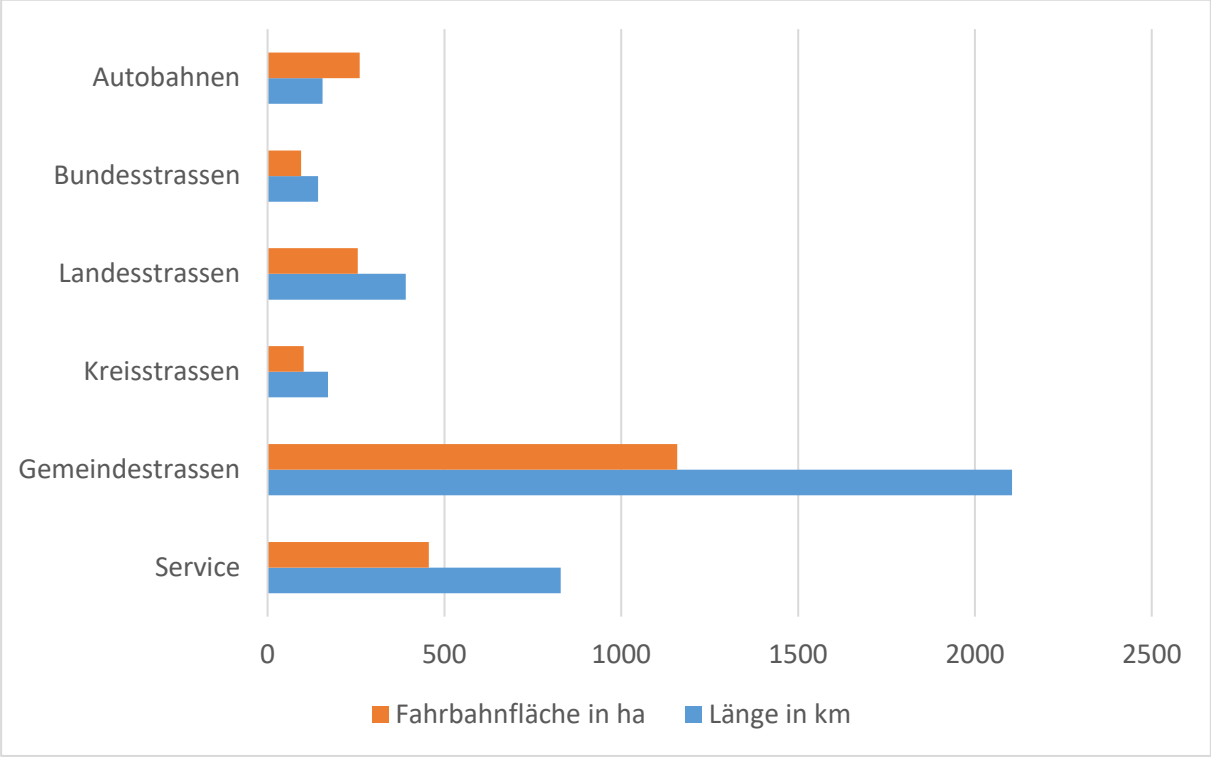


Abbildung 114: EZG Wupper - Bilanz der Straßenlängen und –flächen nach Straßenkategorie

Bei den DTV ist allerdings zu sehen (Abbildung 115), dass im EZG der Wupper vor allem die übergeordneten Straßen mit zum Teil wesentlich höheren mittleren Verkehrsbelastungen als im Panke-EZG belegt sind. Die Auswertung der mittleren Belastung (Abbildung 116) zeigt auch, dass Gemeindestraßen eine deutlich geringere mittlere Belastung als im Panke-EZG besitzen (290 KFZ/d versus 2200 KFZ/d).

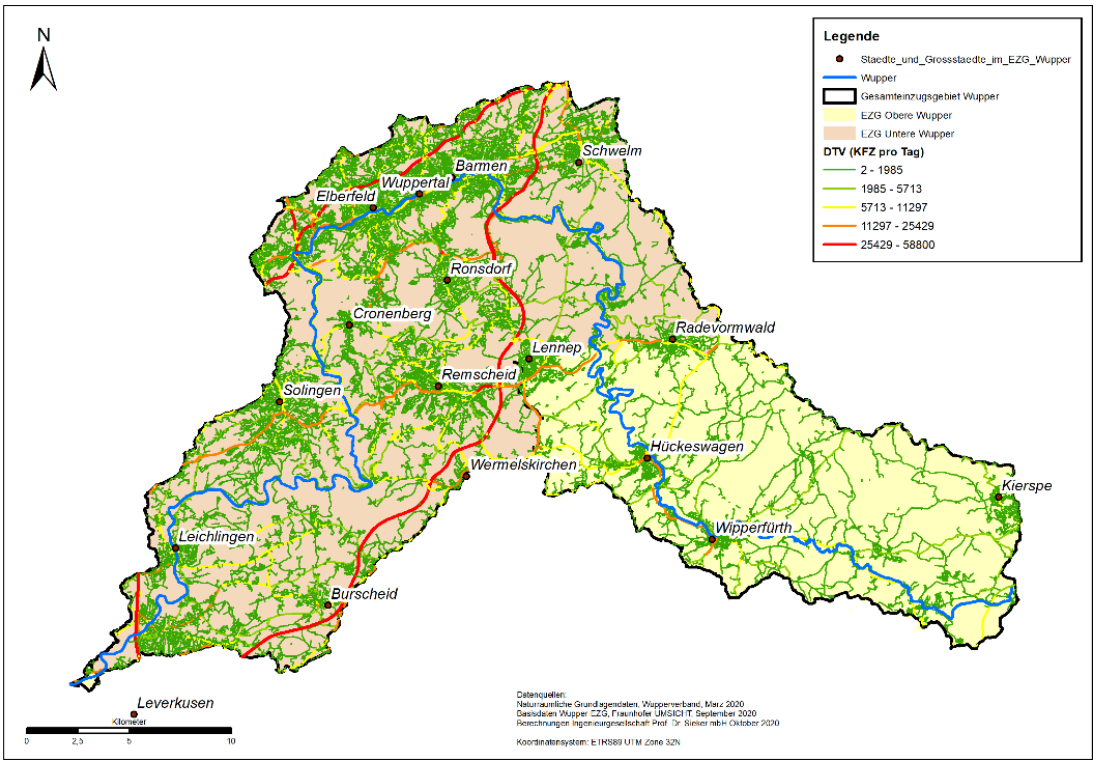


Abbildung 115: EZG Wupper - Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV); offizielle Zähldaten, ergänzt um Modellierung von Fraunhofer UMSICHT

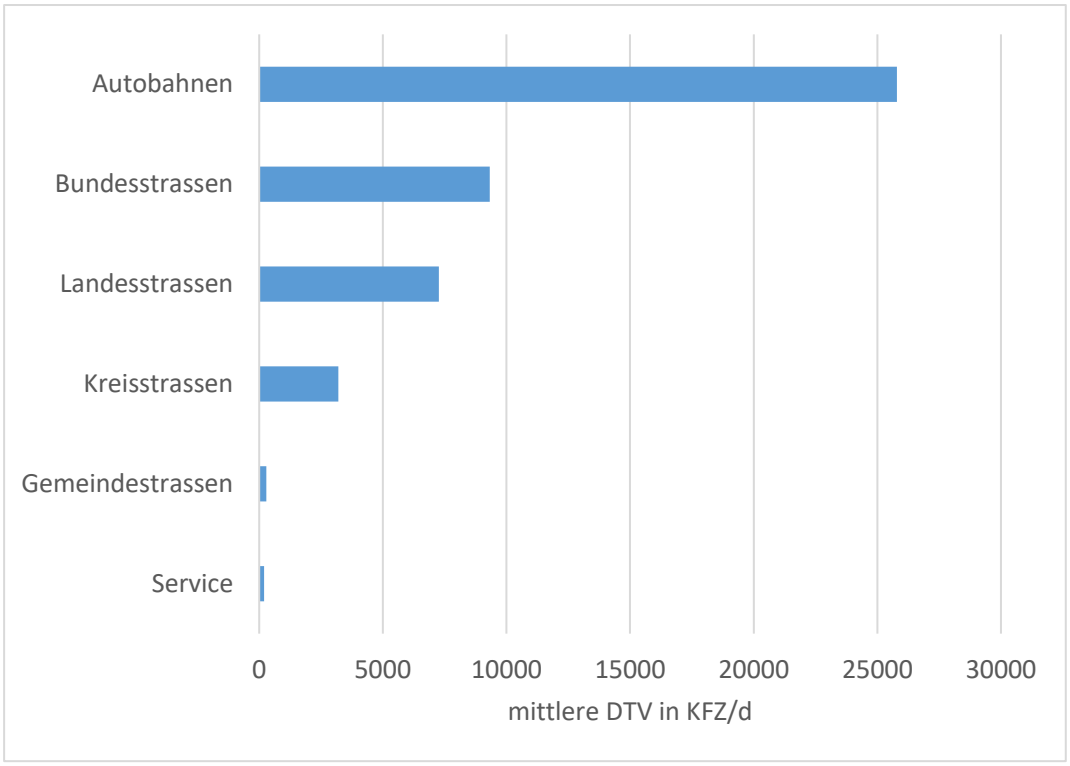


Abbildung 116: EZG Wupper - Bilanz der durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV); offizielle Zähldaten, ergänzt um Modellierung von Fraunhofer UMSICHT

Tabelle 15 zeigt den ermittelten mittleren Verschleiß je PKW, LWK und KFZ[9], differenziert nach der jeweiligen Straßenkategorie. Aufgrund der hohen Geschwindigkeiten finden sich die höchsten Reifenabriebe je KZF in mg/km im Wesentlichen bei den Autobahnen. Bei den übrigen Straßen sind die Häufigkeit von Fahrsituationen mit Kurven, Kreisverkehren und Kreuzungen, im Fall der Servicestraßen ist der hohe LKW-Anteil maßgebend für den hohen mittleren Verschleiß je KFZ. Tendenziell sind die mittleren Verschleißraten höher als im Einzugsgebiet der Panke.

Tabelle 15: EZG Wupper - Mittlere Reifenabriebemissionen je KFZ, PKW und LKW, differenziert nach vorhandenen Straßenkategorien

Straßenkategorie	mittl. Verschleiß KFZ (mg/km)	mittl. Verschleiß PKW (mg/km)	mittl. Verschleiß LKW (mg/km)
Autobahnen	379	178	1.925
Bundesstraßen	300	189	2.004
Gemeindestraßen	362	242	2.633
Kreisstraßen	273	200	2.311
Landesstraßen	282	197	2.179
Service	357	185	2.428

Abbildung 117 stellt den Anteil der ermittelten Reifenabriebemissionen je Straßenkategorie den entsprechenden Anteilen der Fahrbahnfläche für das gesamte EZG Wupper gegenüber. Die Auswertung zeigt, dass sowohl Autobahnen, als auch Bundesstraßen und Landesstraßen – analog zum EZG Panke - überproportional viel Reifenabrieb erzeugen.

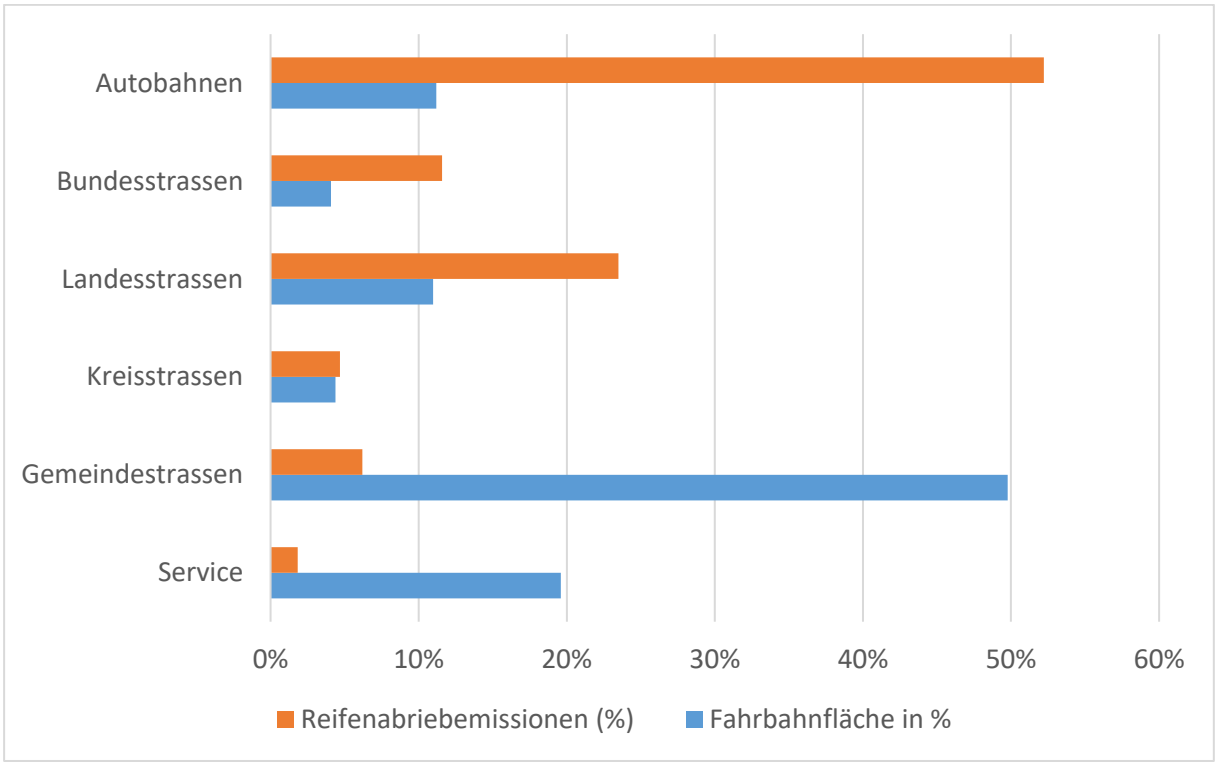


Abbildung 117: EZG Wupper – Straßenkategorie versus Reifenabriebemissionen

[9] Der mittlere KFZ-Verschleiß ergibt sich aus dem gewichteten Mittelwert der Verschleiße von PKW und LKW.

Bei den Fahrsituationen über alle Straßenklassen (Tabelle 16) zeigt sich, wie vorher angemerkt, dass Kreuzungen und Kurven entscheidend für die hohen Werte des fahrzeugbezogenen Verschleißes beim Reifen sind. Steigungen spielen topographisch bedingt –anders als im EZG der Panke – eine wesentliche Rolle.

Tabelle 16: Mittlere Reifenabriebemissionen je KFZ, PKW und LKW, differenziert nach den vorliegenden Fahrsituationen

Fahrsituation	mittl. Verschleiß KFZ (mg/km)	mittl. Verschleiß PKW (mg/km)	mittl. Verschleiß LKW (mg/km)
Gerade	42	24	242
Kreuzung	993	637	7.091
Kurve	580	359	4.272
Steigung	70	42	469

Abbildung 118 stellt die Anteile der Fahrbahnflächen je Fahrsituation und die entsprechenden relativen Reifenabriebemissionen gegenüber. Es wird ersichtlich, dass das physikalische Reifenabriebmodell, genau wie im Panke EZG, vor allem Kreuzungen als Hotspots für den Reifenabrieb ermittelt.

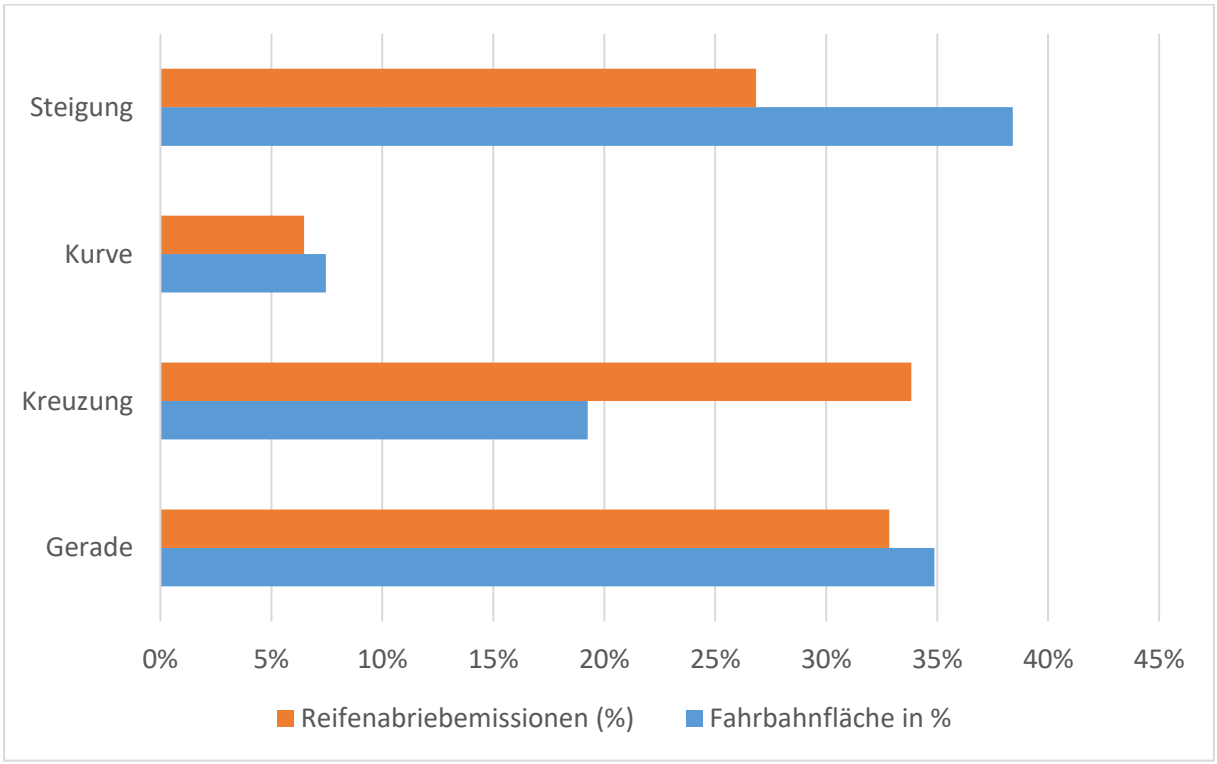


Abbildung 118: EZG Wupper – Fahrsituation versus Reifenabriebemissionen

Tabelle 17 zeigt den mittleren Verschleiß im Gesamtgebiet bezogen auf PKW, LKW und KFZ. Das gewichtete Mittel der Reifenabriebemissionen liegt bei 347 mg/km/KFZ. Bei PKW liegt der mittlere Verschleiß bei rund 218 mg/km und somit deutlich über dem gesamtdeutschen Mittelwert von 110 mg/km und auch signifikant höher als im Panke EZG mit 135 mg/km. Das gewichtete Mittel von rund 347 mg/km je KFZ zeigt, dass der Anteil von PKW an der DTV im physikalischen Reifenabriebmodell deutlich überwiegt.

Tabelle 17: Mittlere Reifenabriebemissionen je KFZ, PKW und LKW, differenziert nach den vorliegenden Fahrsituationen

Fahrzeugart	Mittlerer Verschleiß, gesamt in mg/km
KFZ (gewichtetes Mittel)	347
PKW	218
LKW	2.474

Abbildung 119 veranschaulicht die Punkte, an denen die fahrzeugbezogenen Abriebe vorwiegend entstehen. Die Straßenabschnitte mit den höchsten Abriebmengen pro Fahrzeug sind orange und rot markiert. Es sind klar einzelne Hotspot bei der Verschleißintensität zu identifizieren. Diese treten überwiegend im EZG der Unteren Wupper auf.

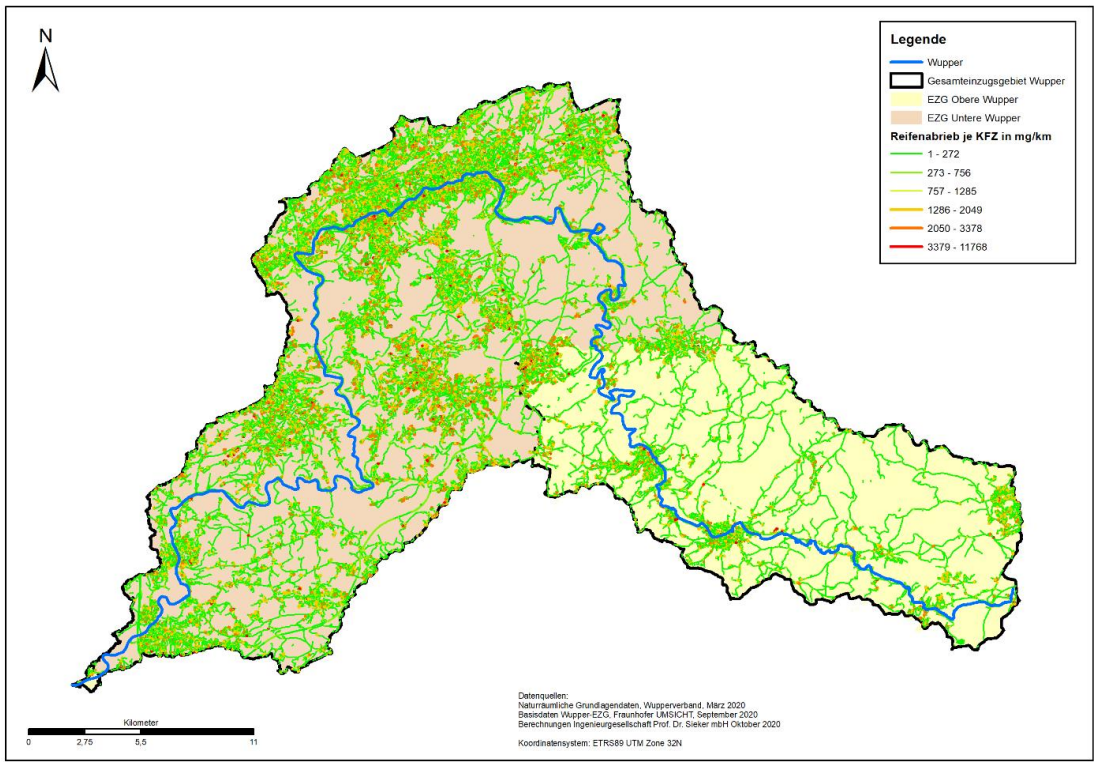


Abbildung 119: EZG Wupper - Kartendarstellung der Verschleißintensität von KFZ (mg/km)

Bei Multiplikation der entstehenden Reifenabriebmenge pro Fahrzeug mit der Anzahl der Fahrzeuge, die pro Straßenabschnitt fahren, ergibt sich die flächenbezogene Frachtbelastung in mg/(m²*a) (Abbildung 120). Hier sind Autobahnen und andere übergeordnete Straßen sowie Kreuzungen und Kurven die Straßenabschnitte mit den höchsten Abriebraten. Erkennbar ist auch, dass der Hauptanteil an Reifenabrieb im EZG der Unteren Wupper entsteht.

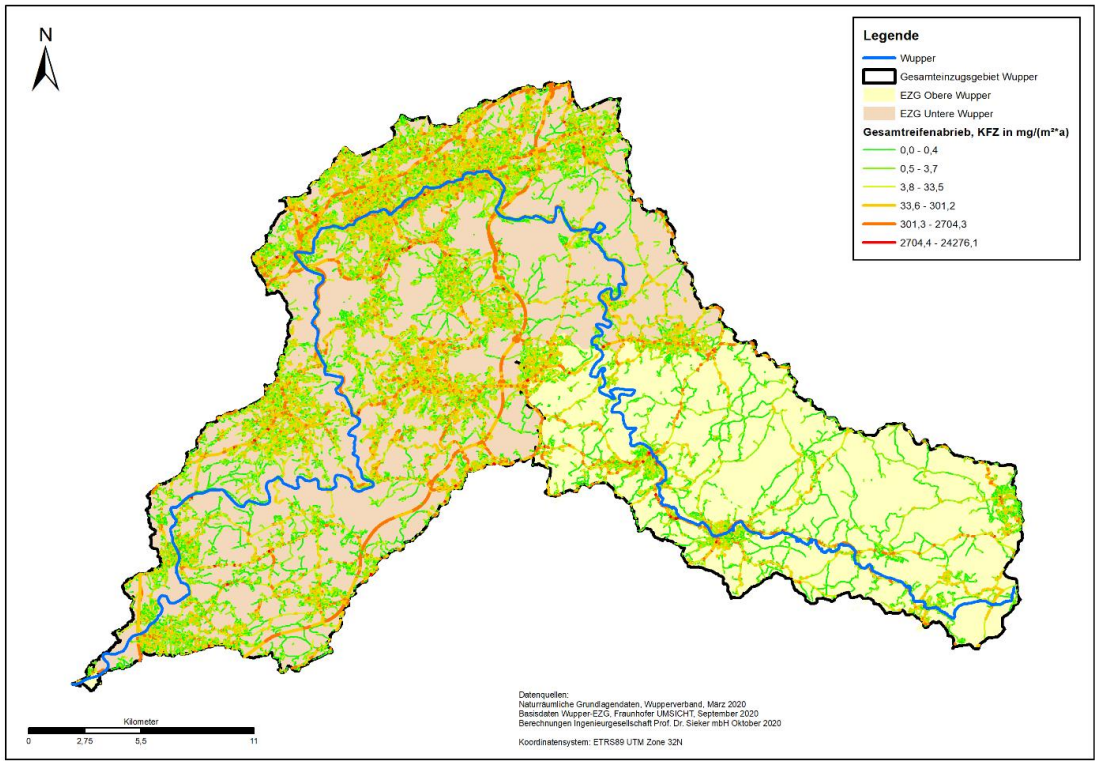


Abbildung 120: EZG Wupper - Kartendarstellung der Reifenabriebemission von KFZ (mg/(m²*a))

Die Vergrößerung (Abbildung 121) veranschaulicht für einen Teil der Stadt Wuppertal die Straßenabschnitte, auf denen je KFZ die höchsten Reifenabriebmengen entstehen. Es handelt sich vorwiegend um Kreuzungen, Kurven und Kreisverkehre.

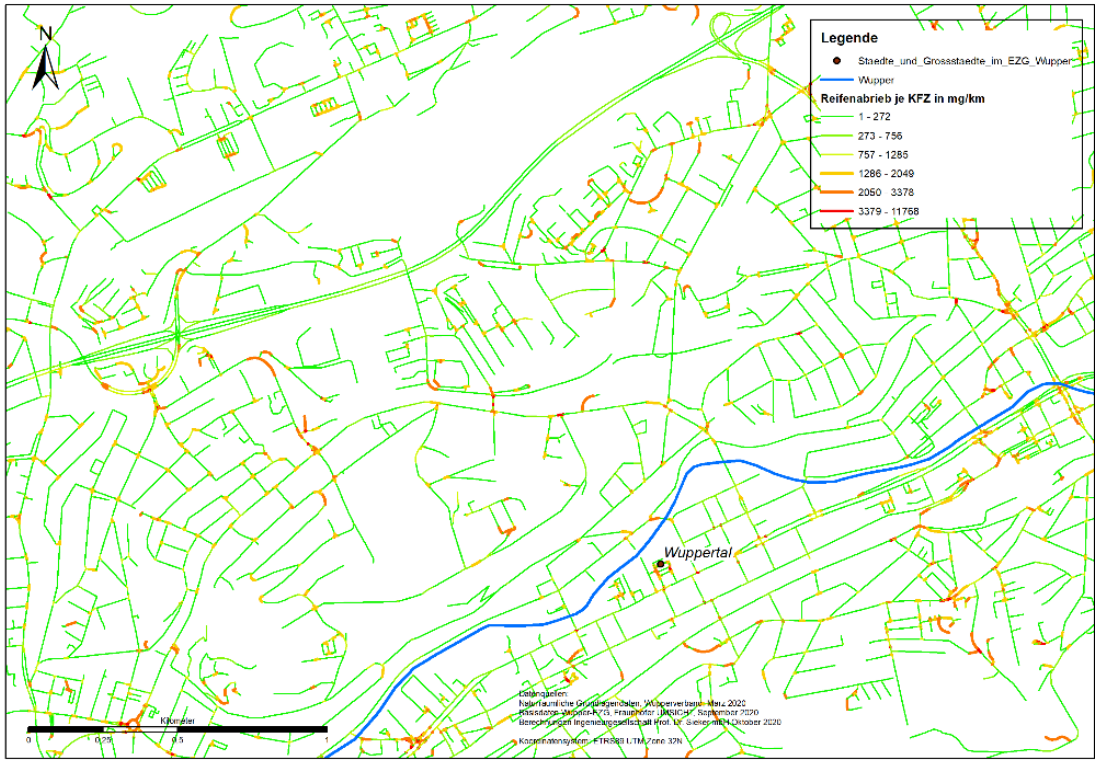


Abbildung 121: EZG Wupper - Ausschnitt aus Stadtgebiet Wuppertal - Kartendarstellung der Verschleißintensität von KFZ (mg/km)

Abbildung 122 zeigt den gleichen Vergrößerungsausschnitt wie Abbildung 121, mit der Gesamtemission an Reifenabrieb je Quadratmeter und Jahr unter Berücksichtigung der DTV. Es werden die Hotspots aus der vorhergehenden Karte gefunden, jedoch ist ersichtlich, dass stark befahrene Straßen bzw. Streckenabschnitte über das Jahr betrachtet signifikant hohe Reifenabriebaufkommen haben.

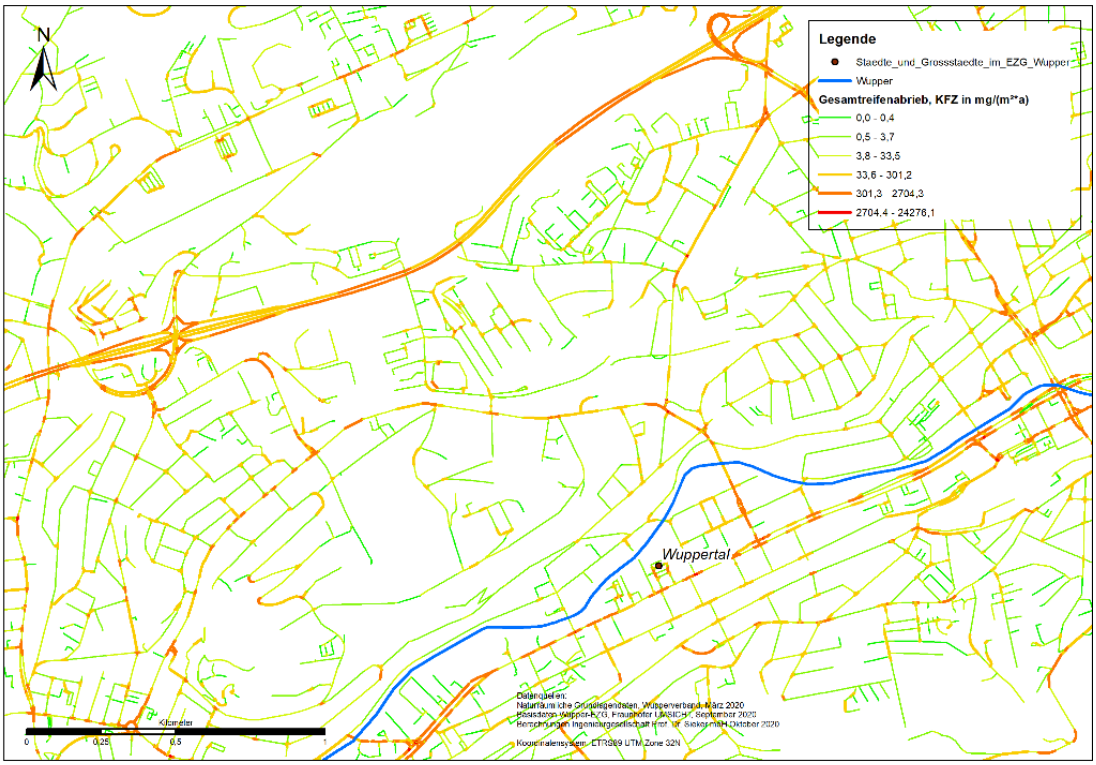


Abbildung 122: EZG Wupper - Ausschnitt aus Stadtgebiet Wuppertal - Kartendarstellung der Reifenabriebemission von KFZ (mg/(m²*a))

Abbildung 123 veranschaulicht die einzugsgebietsbezogenen Reifenabriebemissionen als absolute Fracht in kg/a. Es zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den EZG der Oberen und Unteren Wupper. Dies liegt an der deutlich höheren Fahrleistung und dementsprechend der entstehenden Reifenabriebmenge im EZG der Unteren Wupper begründet.

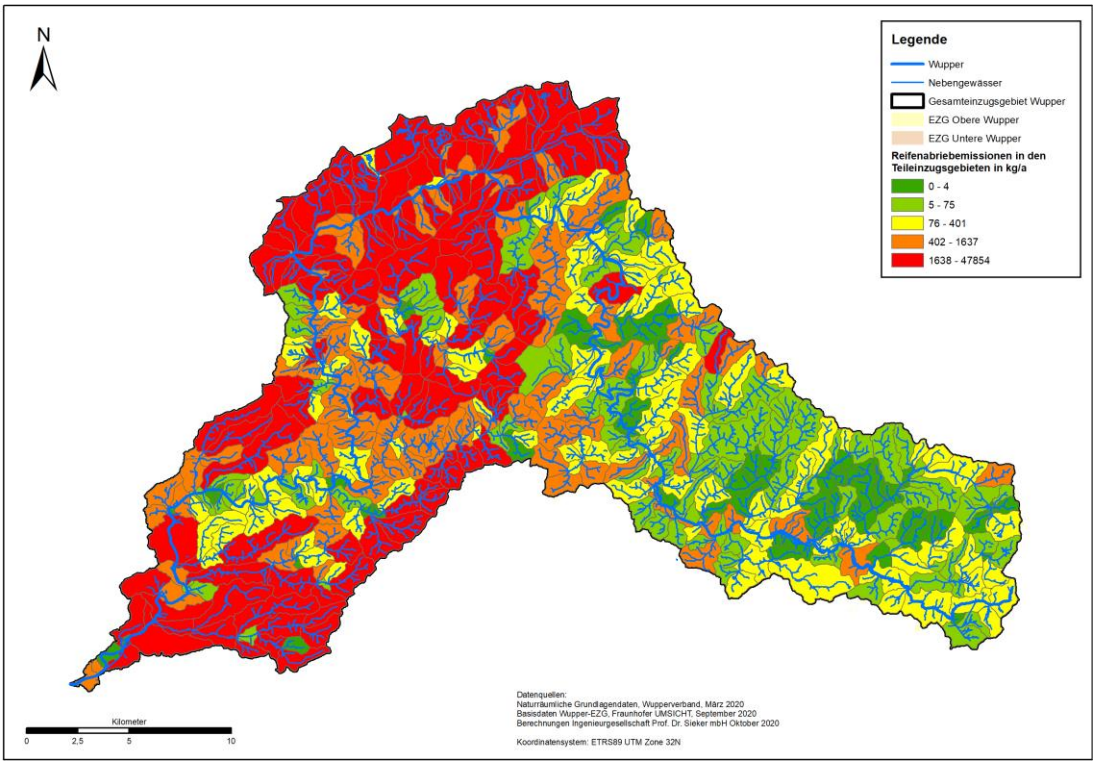


Abbildung 123: EZG Wupper – absolute Gesamtabriebemission in den Teileinzugsgebieten (kg/a)

Abbildung 124 stellt die Reifenabriebemissionen in Bezug auf die jeweilige Fahrbahnfläche in den einzelnen Teileinzugsgebieten als flächenbezogene Jahresfracht in g/(m²*a) dar. Auch hier stechen die Autobahnbereiche und die zentralen innerstädtischen Bereiche entlang der Wupper und den Tallagen im Bereich der Unteren Wupper hervor. Es werden aber auch weitere Bereiche dazwischen sichtbar, die auch relevante Anteile an Reifenabrieb liefern. Insgesamt zeigen sich farblich geringere Unterschiede zwischen den EZG der Oberen und Unteren Wupper als in Abbildung 123, weil auch im EZG der Unteren Wupper punktuell hohe Flächenbelastungen in den urbanen Räumen auftreten.

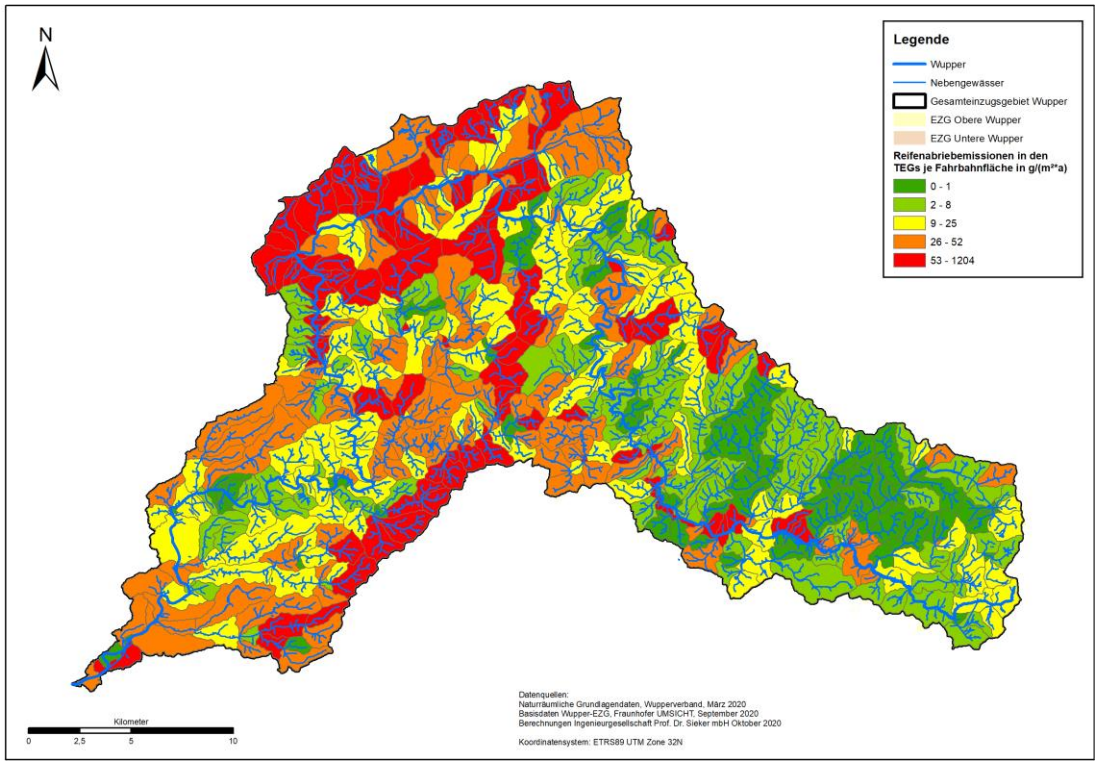


Abbildung 124: EZG Wupper – mittlere Fracht je Straßenfläche in den Teileinzugsgebieten (g/(m²*a))

Abbildung 125 zeigt die betrachteten Einleitpunkte in die Oberflächengewässer im EZG der Oberen Wupper. Anders als im EZG Panke befinden sich die meisten Einleitpunkte im Mischsystem.

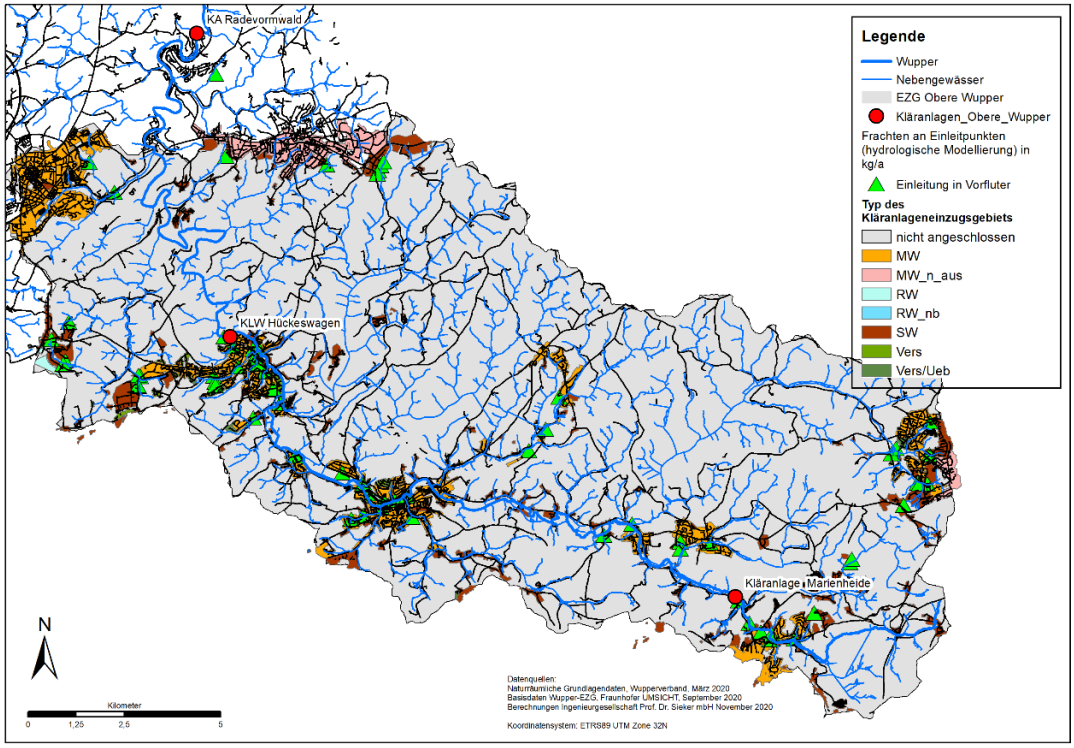


Abbildung 125: EZG Obere Wupper – Darstellung der Kläranlageneinzugsgebiete und der Einleitpunkte

Abbildung 126 gibt die verorteten Ergebnisse der durchgeführten Stofffrachtsimulation wieder. Die höchsten Einleitfrachten befinden sich erwartungsgemäß im urbanen Bereich. Die drei betrachteten Korngrößenklassen (10 – 50 µm, 50 - 100 µm und 100 – 500 µm) sind in den Balkendiagrammen dargestellt. Der Frachtanteil ist bei der größten Kornklasse am höchsten. Die Einträge stammen zum größten Teil aus Mischsystemüberläufen.

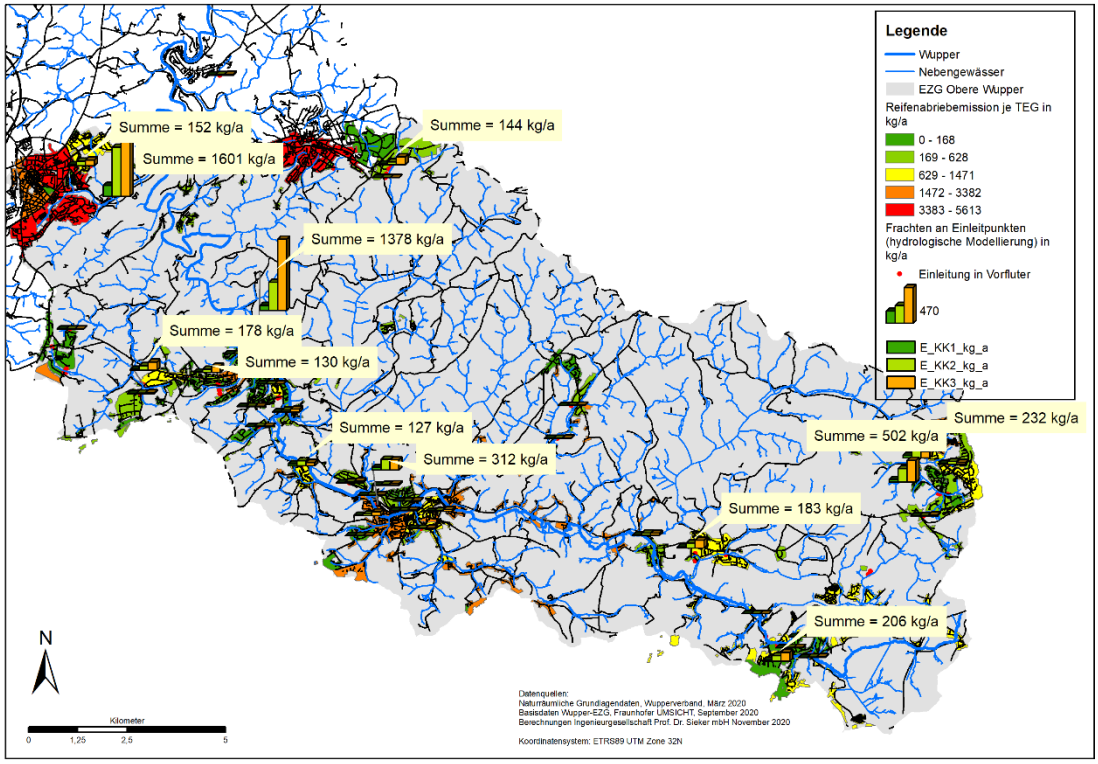


Abbildung 126: EZG Obere Wupper - Darstellung der absoluten Reifenabriebemissionen in den Teileinzugsgebieten und den eingeleiteten Jahresfrachten an den Einleitpunkten in kg/a

Um den Gesamtüberblick aus der Kopplung des physikalischen und des hydrologischen Stofffrachtmodells zu erhalten, wurde ein Stoffstrom-(Sankey)-Diagramm mit allen relevanten Stoffströmen erstellt (Abbildung 127.)

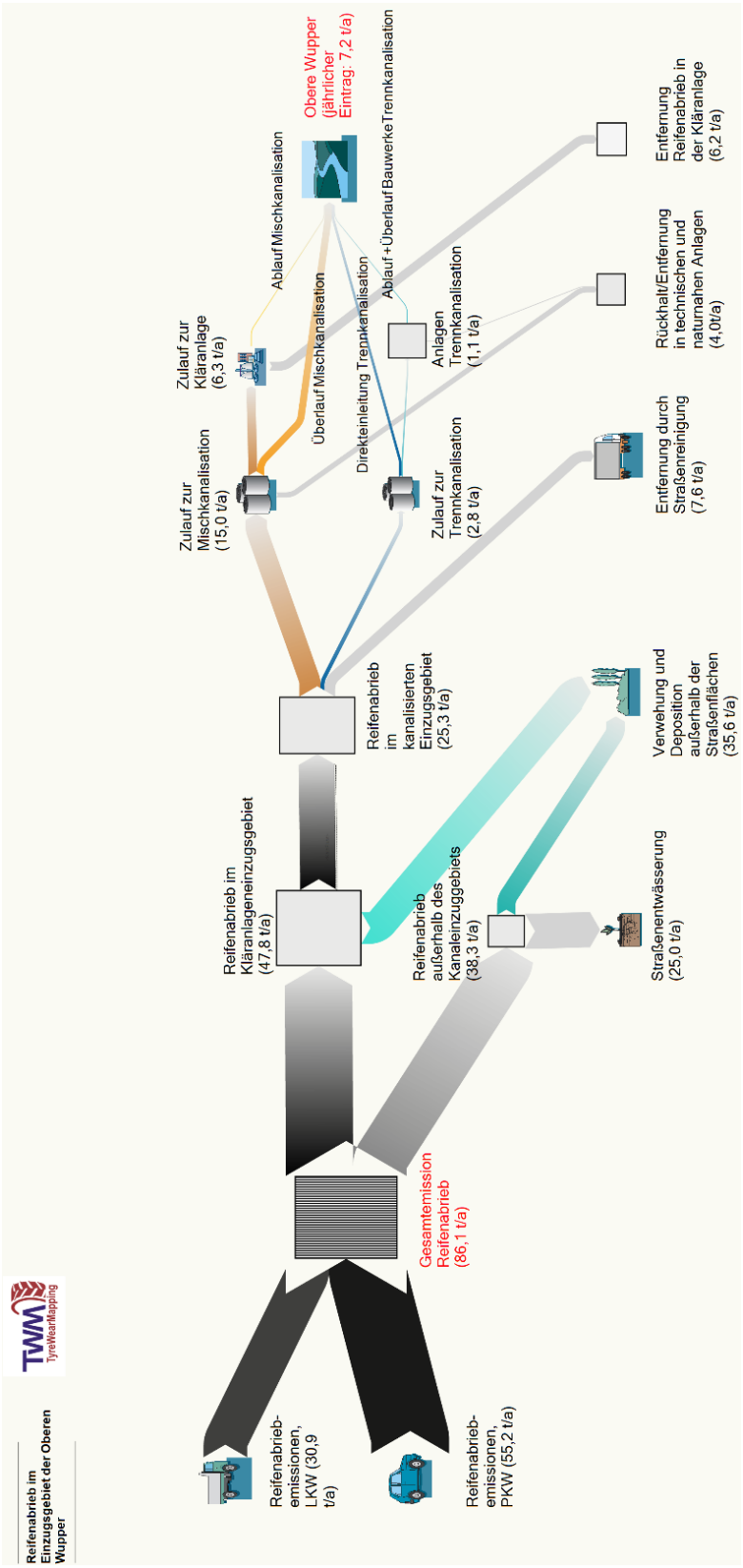


Abbildung 127: EZG Obere Wupper – Stofffrachtdiagramm für die Entstehung, Verteilung und den Verbleib von Reifenabrieb gemäß Kopplung von physikalischem Emissionsmodell und Stofffrachtmodellierung

Die tabellarische Auswertung der Stoffströme ist in Tabelle 18 dargestellt. Von der Gesamtmenge an Reifenabrieb gelangen 70,2 % über Verwehung bzw. Entwässerung mit Versickerung über die Böschung in seitlich angrenzende Bereiche. Hier gilt zu beachten, dass die notwendige Verwendung eines relativ groben 5 m Rasters bei der Berechnung der Verwehung und Deposition zu systematisch größeren Verwehungsraten als bei dem Panke EZG, wo mit 2 m Rastern gearbeitet wurde, führt. Ein geringer Teil davon kann dabei auch Straßengräben gelangen, die in Gewässer weiterleiten. Etwa 9,1 % werden von der Straßenreinigung entfernt. Von den 17,4 % im Mischsystem gelangen 5,9 %im Wesentlichen über Mischwasserüberläufe und von den 3,3 % im Trennsystem 2,4 % in Oberflächengewässer. Insgesamt gelangen 8 % des gesamten entstehenden Reifenabriebes im EZG Obere Wupper in Oberflächengewässer, im überwiegenden Teil dabei über Überläufe aus dem Mischsystem.

Da das Einzugsgebiet der Oberen Wupper in einer Talsperre endet ist anzunehmen, dass die Reifenabriebpartikel in der Talsperre sedimentieren und nicht weitergetragen werden.

Tabelle 18: EZG Obere Wupper - Bilanzierung der Reifenabriebemissionen und –verteilung im Einzugsgebiet (KA: Kläranlage, RW: Regenwasser, RA: Reifenabrieb)

Entstehung und Einleitung in Gewässer	**Fracht (t/a)**	**Fracht (%)**	**KA und zentrale RW-Behandlung (t/a)**	**KA und zentrale RW-Behandlung (%)**	**Davon Einleitfracht in Gewässer (t/a)**	**Davon Einleitfracht in Gewässer (%)**
Gesamtmenge RA	86,1	100,0				
Straßenentwässerung außerhalb des Kanaleinzugsgebiets (Versickerung Böschung, Versickerungs-anlagen, Rückhaltung)	24,9	28,9				
Verwehung im gesamten Einzugsgebiet	35,6	41,3				
Straßenreinigung	7,8	9,1				
Mischsystem gesamt, davon Überlauf	15	17,4			5	5,8
Mischsystem, davon über KA			6,3	7,3%	0,09	0,1
Trennsystem gesamt, davon Direkteinleitung	2,8	3,3			1,8	2,1
Trennsystem, davon über Bauwerke Rückhaltung			1,1	1,3%	0,3	0,3
Summe	***86,1***	***100,0***			***7,19***	***8***

In Abbildung 128 wird der Verbleib der einzelnen Partikelkorngrößenklassen von der Gesamtemission bis zum Eintrag in die Gewässer des Einzugsgebietes der Oberen Wupper dargestellt.

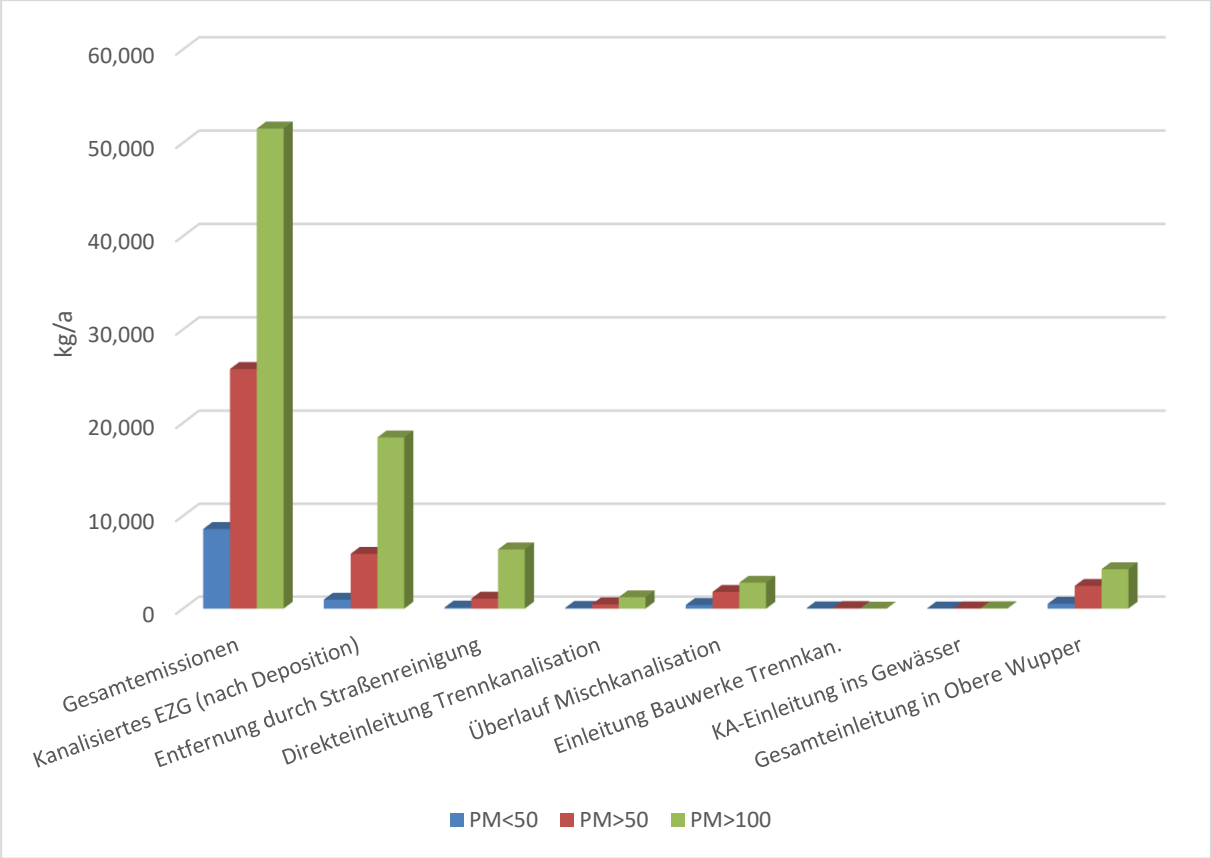


Abbildung 128: EZG Obere Wupper - Partikelverteilung Reifenabrieb von der Quelle bis zur Einleitung in die Oberflächengewässer

Es zeigt sich auch bei der Oberen Wupper, dass bis zum Eintrag in die Kanalisation erhebliche Mengen des Anteils der Feinfraktion < 50 µm durch Verwehung in die Umgebung der Straßenflächen abgegeben werden bzw. in dezentralen, nicht angeschlossenen Straßenentwässerungselementen verbleiben. Die Straßenreinigung entfernt hauptsächlich die größte Partikelkorngrößenklasse. Der höchste Anteil des Eintrags in die Gewässer entfällt auf die Überläufe aus dem Mischsystemsystem. Es zeigt sich, dass durch Mischwasserüberläufe, wie auch bei Behandlungsanlagen im Trennsystem, die kleinste Partikelfraktion nur zu einem kleinen Anteil zurückgehalten werden kann. Nur ein geringer Anteil wird über das Trennsystem eingeleitet.

II.1.7.7 Vergleich beider Einzugsgebiete

Beide Einzugsgebiete sind in ihrer Struktur verschieden. Bei der Panke handelt es sich um ein hauptsächlich urban geprägtes Einzugsgebiet. Nur in den Außengebieten und dem Brandenburger Teil ist es mit dem Einzugsgebiet der Oberen Wupper vergleichbar. Die Untere Wupper dagegen stellt auf Grund der Siedlungsdichte eher ein urbanes Einzugsgebiet dar.

Der Anteil der übergeordneten Straßen, insbesondere der Autobahnen ist im Einzugsgebiet der Oberen Wupper höher als im Panke Einzugsgebiet. Ferner sind die Straßen auf Grund der Topografie der beiden Wuppereinzugsgebiete kurviger und haben mehr und größere Steigungen.

Weiterhin haben die beiden Wuppereinzugsgebiete einen wesentlich höheren Anteil an Entwässerung über Mischkanalisation. Hier gilt es, sowohl die Mischwasserüberläufe zu reduzieren als

auch die Trennsystemeinleitungen zu behandeln. Im Pankeeinzugsgebiet liegt der Fokus im Außenbereich mehr auf den Trennsystemeinleitungen, die behandelt werden müssen.

II.1.7.8 Fehlerbetrachtung und Unsicherheiten

- Verteilung des berechneten Reifenabriebs auf 3 Korngrößenklassen

Aus dem modifizierten physikalischen Reifenabriebmodell von Fraunhofer UMSICHT wurden Gesamtreifenabriebe pro Straßenabschnitt berechnet. Für die Verteilung dieser ermittelten Emissionen in den Umweltkompartimenten Luft und Wasser mussten eine Korngrößenverteilung bzw. Korngrößenklassierung zugrunde gelegt werden. Hier wurde auf Literaturwerte von [Kreider et al.-2009] zurückgegriffen. Die Massenaufteilung betrugen 10 % / 30 % und 60 % für die Korngrößenklassen von 10 – 50 µm, 50 – 100 µm und 100 – 500 µm. Diese Verteilung kann je nach Standort, Saison und Art der Probenahme abweichen. Hier wird auf das BMBF-Projekt *RAU* verwiesen [BMBF-2017], in dem eine Vielzahl von Umweltproben unter anderem auf die Korngrößen- und Masseverteilung von Reifenabrieb untersucht werden. Die Korngrößenverteilung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Verteilung der Partikel in der Umwelt. Dies gilt sowohl für die luftgetragene Aufwirbelung und Deposition als auch für die Sedimentation und Filtration in wasserwirtschaftlichen Anlagen und Gewässern. Die gewählte Methodik für die Berechnung der Verteilung von Reifenabrieb in der Umwelt ist flexibel und könnte auch mit anderen Korngrößenverteilungen durchgeführt werden.

- Dichte der Tyre Road Wear Particles (TRWP)

Für die Durchführung der Verteilung von Reifenabrieb in den Medien Luft und Wasser wurde eine Dichte von 1,8 g/cm³ für Reifenabriebpartikel aller drei genannten Korngrößenklassen gewählt. Grundlage für diese Wahl war die Studie von [Kreider et al.-2009], welche diese Dichte als Mittelwert ihrer Berechnungen ausgewiesen hat. Die Dichte hat, genau wie die Korngrößenklassen, einen entscheidenden Einfluss auf die luftgetragene Aufwirbelung und Deposition sowie auf die Sedimentation und Filtration in wasserwirtschaftlichen Anlagen und Gewässern. Auch hier gilt, dass die gewählten Berechnungsansätze flexibel sind und auch mit anderen Dichten durchgeführt werden könnten.

- Auswahl der Anlagen zur Rückhaltung

Aus der Dichte der abgetragenen Partikel ergeben sich die Möglichkeiten für die Behandlung. Bei Annahme einer Dichte von 1,8 g/cm³ sind für Partikel größer 100 µm Sedimentationsanlagen noch ausreichend. Je kleiner die Partikel sind, umso eher sind Anlagen mit geeigneter Oberflächen- oder Tiefenfiltration für eine ausreichende Entfernung notwendig.

- Differenzierung Stofffrachtmodelle für die Einzugsgebiete der Panke und Oberer Wupper

Der Aufbau der verwendeten Stofffrachtmodelle ist entscheidend für die Güte der Aussagen aus den Modellen. Eine differenzierte Flächenbetrachtung auf Basis einer geeigneten GIS-Flächengrundlage ist entscheidend.

- Verschiedene Parameter nicht erfassbar, z.B. Fahrweise, Sommer-/Winterreifen, Fahrbahnmaterial etc.

Wichtige relevante Parameter wurden bei der Modellierung der Einzugsgebiete berücksichtigt: z. B. die Abschätzung der Verkehrsdichte, der gefahrenen Geschwindigkeit und des Abbiegeverhaltens. Allerdings werden weiche Parameter wie Fahrweise, der Reifentyp (Sommer oder

Winterreifen), Fahrbahnmaterial, Temperatur und ähnliches nicht im physikalischen Modell abgebildet, weil sie nicht verortbar sind und demensprechend eine Art Hintergrundbelastung bilden, die sich im Mittel – so die Annahme - aufheben. Insofern bilden die Parameter nur den Teil der erfassbaren und mit Daten hinterlegbaren Faktoren ab.

- Grunddaten Straßen sind nicht vollständig/unterschiedlich

    - abhängig von der Genauigkeit der GIS-Datei
    - Radius, Kreuzungen, Geschwindigkeiten
    - Bewertung Abbiegevorgänge

Die GIS-Daten, die die Grundlage für die Modellierung der Reifenabriebdarstellung sind, müssen für sehr lokale Betrachtungen an den Betrachtungspunkten präzisiert werden, um die lokale Situation besser als im bestehenden Modell abzubilden. Hintergrund ist, dass die für die Erstellung des GIS-Modells verwendeten Datengrundlagen oftmals lückenhaft und nicht alle valide sind. Dies gilt sowohl für Verkehrsdichte, Geometrien der Straßen, Straßenbreiten als auch für gefahrene Geschwindigkeiten. Auch die Abbildung der Abbiegeverhältnisse, die als Kurvenfahrt erheblichen Einfluss auf die Entstehung von Reifenabrieb hat, liegt im EZG Panke nur punktuell vor. Flächendeckende Übertragungen sind mit Unsicherheiten behaftet.

- Messdaten zum Abrieb und Reifenpartikel nicht in ausreichender Menge und Güte vorhanden

Eine weitere Lücke, die derzeit noch vorhanden ist, stellt die geringe Dichte vorhandener Messungen von Reifenabriebpartikel in ausgewählten Fahrsituationen dar. Hier besteht noch weiterer systematischer Forschungs- und Untersuchungsbedarf.

II.1.8 Planungs- und Entscheidungstools, Nutzerintegration,

In *TyreWearMapping* wurden nachfolgende Modelle als Planung- und Entscheidungstool umgesetzt:

- Verkehrsdatenmodell

Im Ergebnis wurde ein Verkehrsdatenmodell für ganz Deutschland als Planungstool vorrangig für Behörden im Bereich Verkehr, Umwelt und Wasserwirtschaft entwickelt, das es erlaubt, verkehrsbedingte Emissionen sowohl auf lokaler als auch regionaler Ebene zu ermitteln.

Das Verkehrsdatenmodell stellt Verkehrsdatensätze, ein Straßenkataster und Hotspot-Karten für den Verkehr zur Verfügung.

- TWM-Modell

Das probabilistische Modell in Kombination mit dem Verkehrsdatenmodell resultiert in das TWM-Modell und wird als Planungs- und Entscheidungstool umgesetzt, welches es den Behörden der Verkehrs- und Umweltplanung sowie der Wasserwirtschaft ermöglicht, im Kleinen die Effekte von lokalen Fahrsituationen z. B. an Ampelkreuzungen und die Wirkung punktueller Rückhaltesysteme wie Filtereinsätze in Gullis auf die Entstehung von Reifenabrieb zu erkennen. Auf regionaler bis nationaler Ebene können als Teil einer strategischen Umwelt- und Verkehrsplanung von den Kommunen und Ministerien Verkehrsszenarien zur Minimierung von Reifenabriebemissionen entwickelt oder die Effekte von Mobilitätszenarien untersucht werden.

Das TMW-Modell liefert digitale Landkarten – auch als Hotspot-Karten - zur Verteilung des Reifenabriebs entlang von Verkehrswegen.

- Hydrologisches und atmosphärisches Stofffrachtmodell

Die Integration des TWM-Modells in hydrologische und atmosphärische Stofffrachtmodelle unterstützt die Behörden bei der Entwicklung lokaler und regionaler Wasserbewirtschaftungspläne und Luftreinhaltepläne.

Die Stofffrachtmodelle liefern im Fall des atmosphärischen Transports digitale Landkarten zur Ausbreitung von Reifenabrieb über die Luft (Verwehung und Deposition); bei der Ausbreitung im Wasser generieren die Modelle digitale Landkarten des Verbleibs von Reifenabrieb in Flusseinzugsgebieten. Auch diese Landkarten erlauben die Lokalisierung von Hotspots und die gezielte Entwicklung von z. B. abwassertechnischen Maßnahmen wie Sedimentationsbecken.

Für jedes einzelne am Gesamtprozess beteiligte Modell wurde die genaue Aufgabe und Funktion definiert und nach Harmonisierung ein Workflow formuliert, der in den vorhergehenden Abschnitten dokumentiert ist. Der Workflow des TWM-Modell wurde in dem hydrologischen Stofffrachtmodell STROM für die Einzugsgebiete von Wupper und Panke mit Erfolg getestet. Die Daten zum Verbleib der Reifenemissionen waren im Vergleich der beiden Einzugsgebiete plausibel.

Der Prozess zur Entwicklung und Umsetzung der Planungs- und Entscheidungstools wurde eng von potentiellen Nutzern (Abwasserverbände, kommunale Planung, Reifenindustrie) begleitet, um die Nutzeranforderungen hinsichtlich Bedienbarkeit, Inhalten und Datenformaten kennenzulernen und zu analysieren. So konnte der Funktionsumfang der Planungsinstrumente präzisiert werden.

Beispielhaft für die Nutzerintegration war der eintägige Workshop, den Fraunhofer UMSICHT am 03.12.20 in Berlin mit Vertretern aller relevanten Akteurskreise und potenzielle Nutzern, unter anderem. Ingenieur- und Planungsbüros, öffentliche Verwaltung, wie z.B. Vertreter von Baubehörden und Umweltbehörden, Kommunen und Kreise, BMVI, Abwasserverbänden, Reifen- und Automobilindustrie sowie Wissenschaft organisierte und gemeinsam mit den Partnern durchführte. Nach einleitenden Vorträgen aus Wissenschaft, Industrie und von dem Projektteam haben

die 27 geladenen Teilnehmer an drei Thementischen die verschiedenen relevanten Fragestellungen zum Thema Reifenabrieb mit Bezug zu *TyreWearMapping* diskutiert:

TT1 | Reifenemissionen und Umwelt | Probenahme und Analytik, Luft und Wasser | Verantwortung und Verursacher, Maßnahmen

TT2 | Reifenemissionen und Daten | Verfügbarkeit, Formate, Lücken von Daten, Verkehrs-, GIS- und Sachdaten, Integration in Anwendungen

TT3 | Reifenemissionen und Management | Akteursnetzwerk, Organisation, Strategie, Handlungsoptionen

Die Teilnehmer sahen neben einer Bewusstseinsbildung für die Problemstellung Reifenabrieb und entsprechenden „Reifenabrieb reduzierendem" Verhalten vor allem auch die Notwendigkeit, Wissenslücken zu füllen, Hotspots zu identifizieren, planerische und technische Maßnahmen einzuleiten und die Akteure besser zu vernetzen.

Der Nutzerworkshop in Berlin vergrößerte nicht nur das (internationale) Akteursnetzwerk des Projektteams deutlich, sondern weitete auch den Blick auf die Reifenabriebproblematik in Gänze. Die Ergebnisse waren sehr hilfreich für die anwendungsbezogene Entwicklung des Planungstools und verlegte den Schwerpunkt der noch ausstehenden Arbeiten im Projekt auf die Entwicklung von Hotspot-Karten. Den Wunsch nach besserer Vernetzung der Akteure hat das Projektteam aufgenommen und ein Jahr später das Abschlusstreffen wieder als Anwenderworkshop mit 34 Teilnehmern konzipiert und umgesetzt. Die Planungsinstrumente haben den Test durch die Nutzer bestanden.

II.1.9 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse

Ganz generell hat *TyreWearMapping* sowohl fundamentale neue wissenschaftliche Erkenntnisse zur Modellierung von Reifenabrieb (neue Modelle und Methoden) als auch praktisch nutzbare Ergebnisse (Reifenabrieblandkarten, Sensitivitätsanalysen, Kalkulationen) generiert und in Anwender-Workshops zur Diskussion gestellt. Das Interesse an den Ergebnissen war gleichermaßen groß bei den Wissenschaftlern, die die Modelle auf ihre eigenen Forschungsgebiete anwenden können, z. B. zur Modellierung des Reifenabriebs von großräumigen Einzugsgebieten, als auch bei den Endanwendern wie den Behörden, denen eine Planungshilfe an die Hand gegeben wird, um Reifenabrieb lokal und regional zu vermeiden oder zu beseitigen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse zur Modellierung der Verteilung von Reifenabrieb (TWM-Modell), der atmosphärischen Ausbreitung und dem Verbleib in der aquatischen Umwelt zusammengefasst.

II.1.9.1 TWM-Modell: Verkehrsdatenmodell und probabilistisches Modell

Die Ermittlung der Verkehrsstärken durch vorhandene Datensätze, ergänzende Quellen und durch die Abschätzung in Wohn-, Gewerbe- und Mischgebieten ermöglichen eine realitätsnahe Beschreibung potenzieller Verkehrsverhältnisse. Daraus resultieren einzigartige, deutschlandweite Verkehrsdatenmodelle, die unabhängig von den eigentlichen Projektzielen in der Verkehrsplanung allgemein einen sehr großen Nutzen stiften. Im Kontext von *TyreWearMapping* bilden sie die Basis für die anschließende Ausbreitungsmodellierung.

Ausgehend von den Verkehrsmengen war es notwendig, eine Vielzahl von Quellen zu identifizieren, um diese letztlich mit hohem Arbeits- und Zeitaufwand in einem einheitlichen Verkehrsdatensatz für die Bundesländer zu vereinen. Gemessen an der Gesamtstraßenlänge in Deutschland konnte so nur ein kleiner Teil des Straßennetzes attributiert werden. Daher wurden mittels zahlreicher Modellierungen die Verkehrsmengen über Kenngrößen des Mobilitätsverhaltens abgeschätzt. Insgesamt kann dieser Ansatz als geeignet für die Beschreibung der Verkehrsmengen eingestuft werden; jedoch wird unter anderem der Durchgangsverkehr nicht mitberücksichtigt, was zu Fehleinschätzungen bei Ortsdurchfahrten führen kann.

Die lückenhaften Datengrundlagen schränkten ebenfalls die Möglichkeit ein, zwischen einzelnen Fahrzeugkategorien zu unterscheiden. Aus diesem Grund wurde bei den ermittelten Quellen lediglich zwischen Leichtverkehr und Schwerverkehr differenziert. Das Fahrverhalten als Einflussgröße auf die Emissionsstärken wird neben den unterschiedlichen Straßenkategorien auch über die Geschwindigkeit beschrieben, wobei Geschwindigkeitsbegrenzungen als Indikatoren dienen. Um diese in die Modellierung einzubeziehen, wurden Informationen über die Geschwindigkeitsbegrenzungen und ihre räumliche Einordnung aus dem OSM-Datensatz, abschnittsweise dem Basis-DLM Datensatz, hinzugefügt. Die Erfassung von Geschwindigkeitsbegrenzungen bei amtlichen Geodaten (Basis-DLM) ist nur ein Beispiel, wie der amtliche Geodatensatz über die Erweiterung mit verkehrsrelevanten Attributen verbessert werden sollte, zumal auch die Genauigkeit beim OSM-Datensatz zu hinterfragen ist.

Die definierten Verkehrsmengen, die Zusammensetzung des Verkehrs sowie die zugeteilten Geschwindigkeitsbegrenzungen und weitere abriebsrelevante Attribute des Straßenverkehrsnetzes sind Eingangsgrößen für die Bestimmung von straßenbezogenen Abriebsmengen für ganz Deutschland.

Es wurde ein Modell erstellt, das die Reifen-Verschleißintensität auf einem bestimmten Streckenabschnitt auf Basis von physikalisch-empirischen Beziehungen aus den Eigenschaften des Straßenabschnitts plausibel abschätzt. Berücksichtigt werden zurzeit: Radius, Querneigung, erlaubte Geschwindigkeit. Zusätzlich werden Luftwiderstand und Rollwiderstand der Fahrzeuge einbezogen. Noch nicht berücksichtigt werden Straßenbelag und Niederschlag, da kein belastbarer Modellzusammenhang gefunden wurde. Das Modell wird so kalibriert, dass durchschnittliche Abriebsmengen bzw. Jahresgesamtemission, die aus der Fachliteratur bekannt sind, erreicht werden. Mit den bekannten (bzw. abgeschätzten) Verkehrsdaten können jedem Straßensegment Reifenabriebsmengen zugewiesen werden.

Das TWM-Modell folgt einer Methodik, die so entwickelt wurde, dass das Modell ohne weiteren Aufwand einer neuen oder veränderten Datenlage angepasst werden kann.

II.1.9.2 Atmosphärische Ausbreitung von Reifenabrieb

Den wesentlichen Anteil der Deposition bestimmen die großen Partikel. Diese sind deutlich geringer von den Ausbreitungsverhältnissen beeinflusst als die kleinen und leichten Partikel. Die Deposition kann dadurch unabhängig von einer „exakten" Meteorologie gut eingegrenzt werden. Für luftgetragene Stoffe (Gase und Feinstäube) sind dagegen die meteorologischen Randbedingungen wichtiger. Die wesentlichen Ergebnisse zur atmosphärischen Ausbreitung von Reifenabrieb in der Luft sind wie folgt.

- Eine Methodik für die schnelle Depositionsberechnung wurde entwickelt und auf die einzelnen Bundesländer angewandt.
- Je nach Fragestellung muss die Auflösung angepasst werden.
    - Für die Analyse der Depositionsanteile auf versiegelten Flächen sind hohe Auflösungen (1 – 2 m) erforderlich. Anwendungen bleiben auf kleine Areale beschränkt.
    - Für regionale und überregionale Übersichten und Bilanzen sind Auflösungen von 10 – 100 m ausreichend.
- Bei Massenbetrachtung in Übersichten (Deutschland, Bundesländer) sind die Ergebnisse relativ genau, da die Ausbreitung großer Partikel nur wenig von der Meteorologie abhängig ist.
- Bei mikroskaligen Betrachtungen im Meter-Bereich wären lokale Einflussfaktoren (Randbebauung, straßenbegleitendes Grün, abgestellte Fahrzeuge bis hin zur Bordsteinkante als Hindernis) unter Einsatz anderer Modelltechniken aufzulösen.
- Wenn nicht die Deposition im Fokus steht, gibt es auch bei kleinen Korngrößen einen Bedarf an hoch aufgelöster Meteorologie. Ansätze wurden entwickelt. Eine Anwendung auf Deutschland erfordert einen größeren „Lern-"Datensatz, um der Methodik mittels neuronaler Netze sicher zu machen.
- Die Verarbeitung und Darstellung großer, fein aufgelöster Datenmengen ist herausfordernd! Für Deutschland mussten die Bundesländer auf ein 100 m- Raster aggregiert werden.
- Der wesentliche Stoffeintrag findet im Nahbereich von Verkehrswegen statt. Anders als bei gasförmigen Luftschadstoffen gibt es keine Hintergrundbelastung.
- Große Partikel deponieren im Straßenraum, vorzugsweise in windschwachen Zonen (z.B. am Straßenrand).
- Feine Partikel (PM2,5, PM10) werden weiter verstreut, machen aber nur einen Bruchteil der Emissionen aus. Für die Deposition sind diese Beiträge nicht mehr relevant. Wenn luftgetragenen Konzentrationen betrachtet werden, kommt ihnen jedoch eine Bedeutung im straßennahen Bereich zu.

Die Analysen zeigen auf, wo Hotspots liegen und wieviel Reifenabrieb im Umfeld abgelagert wird. Der größte Anteil an Stoffeinträgen findet mit knapp 57 % in Siedlungsbereichen statt. Ein Großteil davon entfällt auf den Straßenraum, kann aber nicht beziffert werden. 43 % der Stoffeinträge sind an den Straßenrändern der Felder und Wälder zu erwarten. Nur ca. 0,4 % der Deposition entfällt auf Wasserflächen. Etwa 6,5 % der Reifenabriebemissionen werden über größere Strecken verfrachtet. Dies betrifft vor allem die kleineren Korngrößen unter 50 µm.

Wie bei anderen meteorologischen Fragestellungen gibt es auch hier kein Modell, das *alle* räumlichen und zeitlichen Skalen abdeckt.

II.1.9.3 Verbleib von Reifenabrieb in den Einzugsgebieten der Panke und Wupper

In *TyreWearMapping* wurden die in den Einzugsgebieten der Panke und der Wupper entstehenden Reifenabriebmengen und deren Stoffpfade berechnet und bilanziert. Die Quellemissionen wurden als Input für eine Niederschlagsabflusssimulation mit dem Programm STORM genutzt. Das Ergebnis war die Identifikation von Entstehung- und Eintrag-Hotspots von Reifenabrieb im Einzugsgebiet sowie die Quantifizierung der Pfade und Eintragsmengen. Dadurch können Maßnahmen zur Verminderung und Behandlung ausgewiesen werden.

Folgende Bearbeitungsschritte wurden durchgeführt:

1. Zusammenstellung relevanter Faktoren für die Entstehung von Reifenabrieb
2. Auswahl der quantifizierbaren und verortbaren Faktoren
3. Unterstützung bei der Erstellung des physikalischen Modells zur Reifenabriebberechnung
4. Umsetzung eines modifizierten physikalischen Modells im ArcMap-Model Builder
5. Erstellung von fahrsituationsbezogenen Reifenabriebkarten
6. Übergabe der errechneten Quellemissionen an die meteorologische Ausbreitungsmodellierung und Rückübernahme der Depositionsdaten
7. Einfügen der Depositionsdaten in das vorbereitete hydrologische Modell
8. Hydrologische Stofffrachtmodellierung
9. Erstellung von einzugsgebietsbezogenen Reifenabriebkarten
10. Bilanzierung der Reifenabriebströme und Ausweisung von Entstehung- und Eintrag-Hotspots

Die wesentlichen Ergebnisse bei der Modellierung zum Verbleib von Reifenabrieb in den Einzugsgebieten der Panke und Wupper sind wie folgt.

- Karten und hydrologisches Modell STORM aus Grunddaten sind erstellbar
- Verteilung in die Umgebung unklar, Emission abhängig von Rasterauflösung
- Schwerpunkte Emission und Einleitung in Gewässer ermittelbar
- Ermittlung der Reinigungsanlagentypen in Abhängigkeit von Hotspots, Einzugsgebietsstruktur und Gewässer

II.1.10 Fazit und Ausblick

Das TWM-Modell leistet sowohl auf nationaler als auch regionaler und kommunaler Ebene eine räumlich hoch aufgelöste Visualisierung des Reifenabriebs entlang von Verkehrswegen. Eine veränderte Datenlage kann dank der entwickelten Methodik, der eine Verteilungsfunktion zu Grunde liegt, sofort in dem Modell umgesetzt werden. Bisher werden im vorliegenden TWM-Modell alle zeitabhängigen Variablen gemittelt. Aber gerade die Abhängigkeit des Verkehrsaufkommens von der Zeit muss bei der Betrachtung neuer Mobilitätsszenarien unbedingt berücksichtigt werden, um Prognosen treffen zu können.

TyreWearMapping hat gezeigt, dass zahlreiche, teils miteinander gekoppelte Parameter, verteilt über viele Skalen, eine Rolle spielen. Für Übersichten, d.h. großräumige Analysen, ist die entwickelte Methodik zur Depositionsbestimmung gut geeignet. Natürlich gibt es diverse Unschärfen, die schon bei den mangelhaften Informationen über Verkehrsstärken und der Emissionsmodellierung anfangen, gefolgt von Annahmen zur Verteilung der Korngrößen, den meteorologischen Randbedingungen bis hin zu nicht betrachteten zeitlichen Aspekten (Tagesgang des Verkehrsaufkommens in Kombination mit Tagesgängen meteorologischer Verhältnisse, diskontinuierliche Niederschlagsereignisse). Je nach praktischer Anwendung sollte bedarfsgerecht nachgeschärft werden.

Bei *TyreWearMapping* lag der Stoffeintrag in großen Gebieten im Fokus. Dieser hängt wesentlich von den großen Partikeln ab, die wenig sensibel auf die meteorologischen Randbedingungen reagieren. Bei der Berechnung luftgetragener Partikel (PM2,5, PM10), deren Relevanz hauptsächlich in innerstädtischen Bereichen gegeben ist, wären mikroskalige Strömungs- und Ausbreitungsmodelle anzuwenden, die die lokalen Strömungshindernisse explizit auflösen. Ebenso empfiehlt sich bei Betrachtungen von Details in Einzugsgebieten die Verwendung von 1 m-Rastern, da der Verlustfaktor durch die Verwehung maßgeblich von der Rastergröße abhängt. Bei der Berücksichtigung von Bruchkanten im Straßenraum müsste das Raster sogar noch auf 0,1 m oder kleiner angepasst werden.

Es konnten zwar Karten als Grundlage für das hydrologische Modell erstellt werden, es zeigte sich aber auch, dass diese Vorgehensweise mit dezidierten Flächen für den Verkehr schwer in bestehende kalibrierte Modelle einzuarbeiten ist, da diese bei der Flächenbestimmung bislang auf andere Flächendaten gestützt sind oder nur vereinfachte Flächenaufteilungen haben. Bei der Erstellung der Modelle ist auf eine differenzierte Flächenaufnahme zu achten. Zukünftige sind einheitliche Datengrundlagen und die Ermittlung der für die Modellierung erforderlichen Straßenparameter erforderlich, bei denen sich teils erhebliche Datenlücken gezeigt haben.

(Verkehrs-)technische und planerische Maßnahmen empfehlen sich sowohl für die Ausbreitung über die Luft aus auch den Verbleib im Gewässer. Generell wären verschleißarme Reifen und nicht zu Verschleiß neigende Fahrbahnbeläge wünschenswert. Auch Tempolimits und eine Verstetigung des Fahrzeugflusses wirken emissionsmindernd.

Aus lufthygienischer Sicht sollten Minderungsmaßnahmen an der Quelle ansetzen. So sind Maßnahmen wie Kehren und Spülen an Hotspots sinnvoll, auch um zu vermeiden, dass der Reifenabrieb durch Fahrbewegungen weiter zerrieben wird. Um den Austrag aus dem Straßenraum zu reduzieren, kann straßenbegleitendes Grün – insbesondere immergrüne Hecken – hilfreich sein. Auch die Absaugung im Bereich der Radkästen wäre eine geeignete Maßnahme. Eine Absaugung und Filterung durch technische Anlagen wird dagegen eher skeptisch gesehen, da der Abrieb flächig entsteht und Absaugungen punktuell wären. Zudem erfordern solche Anlagen einen hohen Energieeinsatz.

Aus siedlungswasserwirtschaftlicher Sicht ermöglicht die Identifikation von Reifenabrieb-Hotspots in einem Gewässerstrang eines Einzugsgebiets die Entwicklung und Umsetzung von gezielten Vermeidungs- und Beseitigungsstrategien am Entstehungsort. Dies hätte das Vorhalten einer

adäquaten Zahl an Behandlungskapazitäten mit entsprechenden Kosten zur Folge. Wenn die Menge des im Regenwasser enthaltenen Reifenabriebs und deren räumliche Verteilung bekannt sind, können Behandlungsanlagen zielgenau modernisiert, errichtet bzw. eingespart werden, was die enormen Folgekosten für Bau und Aufrüstung von Behandlungsanlagen reduziert.

Eine Dynamisierung der Stofffrachtmodelle würde zudem erlauben, Akkumulationseffekte, die von Niederschlagsereignisse abhängen, zu modellieren und zeitabhängige Frachten an Reifenabrieb zu berechnen. Dies würde eine noch differenziertere Maßnahmenauswahl als bei der zeitinvarianten Hotspot-Analyse erlauben.

II.1.11 Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Tabelle 19: Zielerreichungsgrade (ZEG) der TWM Projektziele (0: nicht erreicht, 1: teilweise erreicht, 2: hauptsächlich erreicht, 3: voll erreicht)

Ziel	ZEG	Begründung
1 Verkehrsdatenmodell und Datenakquise	2-3	Sämtliche verfügbaren Daten wurden ermittelt und bewertet; allerdings zeigten sich erhebliche Datenlücken vor allem bei den verkehrsbezogenen Daten. Die Daten sind miteinander oft nicht kompatibel. Das Verkehrsdatenmodell ist vollständig und ließe sich dynamisch weiterentwickeln
1.1 Evaluierung von Geodaten zum Straßennetz	2-3	Unterschiede und Verbesserungsbedarfe zwischen den Datenquellen konnten aufgezeigt werden. Privatwirtschaftlicher Daten konnten aus Kostengründen punktuelle geprüft, jedoch nicht in das Gesamtmodell eingebunden werden. Dies kann in Zukunft zielgerichtet verbessert werden
1.2 Möglichst ortsgenaue Abbildung der Reifenabriebsentstehung	2	Die GIS-Straßengrundlagendaten für die Ermittlung der Reifenabriebsentstehung sind oft unpräzise und stellen für eine feinere Betrachtung die Situation nur annähernd dar.
1.3 Einbindung der Straßenverkehrszahlen (DTV)	2-3	Obwohl die verfügbaren Zahlen lückenhaft und in den einzelnen Bundesländern unterschiedlich in Kategorie und Dichte sind, wurde ein plausibles allgemeingültiges Modell entwickelt, das gemäß Datenlage flexibel angepasst und erweitert werden kann.
1.4 Anwendung der realen Verkehrsflächengrößen	2	Die Verkehrsflächengröße kann in der Regel aus den verfügbaren Daten nur abgeschätzt werden. Straßenbreiten sind in der Regel nicht angegeben oder pauschalisiert.
1.5 Datenlückenanalyse	3	Die Datenlücken sowohl bei den Sach- als auch den Verkehrsdaten wurden identifiziert und umfänglich dokumentiert.
2 Probabilistisches Modell	2-3	Das Modell ist valide und integrierbar in das TWM-Modell
2.1 Modell für Korrelation zw. Fahrsituation und Abrieb	2-3	Es wurde ein physikalisch begründetes, empirisches Modell entwickelt; es fehlen noch Einfluss von Straßenbelag und Wetter. Es konnte begrenzt mit experimentellen Werten abgeglichen werden.

3 Atmosphärische Ausbreitung von Reifenabrieb	2-3	Eine Methodik für die schnelle Depositionsberechnung wurde entwickelt und auf die einzelnen Bundesländer angewandt.
3.1 Meteorologie hoch aufgelöst mittels neuronaler Netze bestimmen.	2	Die Vorgehensweise und Analyse konnte für eine begrenzte Raumschaft (Ausschnitt aus dem Wuppergebiet) erarbeitet werden. Unschärfen gibt es jedoch aufgrund der Eingangsdaten
3.2 Deposition deutschlandweit hoch aufgelöst ermitteln.	2-3	Die entwickelte Methodik funktioniert für Fragestellungen, bei denen es um einen Überblick des Reifenabriebs geht, recht gut. Das liegt an der relativen Unempfindlichkeit der großen Korngrößen gegenüber meteorologischen Randbedingungen.
4 Verbleib von Reifenabrieb in den Einzugsgebieten	2-3	Modelle wurden entwickelt und auf die Einzugsgebiete erfolgreich angewandt, Ergebnisse sind plausibel
4.1 STORM-Modell	3	Karten und hydrologisches Modell STORM sind aus Grunddaten erstellbar
4.2 Verteilung von Reifenabrieb darstellbar	2	Verteilung in die Umgebung unklar, Emission abhängig von Rasterauflösung
4.3 Ermittlung von Hotspots	2-3	Schwerpunkte Emission und Einleitung in Gewässer für die Einzugsgebietsstruktur ermittelbar,
5 Akteurseinbindung zur Evaluierung des Praxisbezugs	2-3	Akteure konnten einbezogen werden, Corona bedingt musste auf Präsenzworkshops und Livedemonstrationen gegen Projektende verzichtet werden
5.1 Modellbildung, wichtige Parameter	3	Fachdialoge, Interviews wurden durchgeführt
5.2 Anwendung der Ergebnisse	2	Zwei Workshops konnten durchgeführt werden

Messtechnische Evaluation: Verschiedene Labore und Forschungseinrichtungen haben zwar kurzfristig standardisierte Messmethoden in Aussicht gestellt, konnten aber ihre Zeitvorgaben nicht einhalten, so dass im Verlauf des Forschungsvorhabens keine zuverlässige Messmethodik zur Verfügung stand. Die messtechnische Evaluation konnte nicht durchgeführt werden. Stattdessen wurde das Modell in umfassenden theoretischen Parameterstudien (Abschnitt II.1.4.2) und mittels Vergleichen der Ergebnisse von Fraunhofer UMSICHT und SIEKER validiert.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Projektmittel wurden fast vollständig für den Personalaufwand bei den Partnern aufgewendet. An dem Projekt waren seitens Fraunhofer UMSICHT vier wissenschaftliche Mitarbeiter*innen (Geograph, Maschinenbauer, zwei Verfahrenstechniker*innen) und diverse Studenten als Hilfswissenschaftler oder Masterand/Bachelorant beschäftigt. Bei SIEKER wurde *TyreWearMapping* von drei wissenschaftlichen Mitarbeitern (Umwelttechnik, Bauingenieurwesen, Geographie) und bei iMA von zwei wissenschaftlichen Mitarbeiter*innen mit Schwerpunkt Ausbreitungsrechnung bearbeitet. Weitere Kostenpunkte waren Softwarebeschaffungen bei Fraunhofer UMSICHT und bei allen Partnern Reisekosten für Arbeits- und Projekttreffen an unterschiedlichen Orten.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Arbeiten waren notwendig und angemessen, um die vorgegebenen Ziele gemäß Arbeitsplan zu erreichen.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen

Für die Industrie

Die anschauliche Demonstration des neuen Planungs- und Entscheidungsinstruments unterstützt die kurzfristige Vermarktung der Ergebnisse aus *TyreWearMapping* bei interessierten Kunden. Neben großen, deutschen Reifenherstellern und der Automobilindustrie profitieren auch kleine und mittlere Unternehmen im Bereich der Umwelt- und Verkehrsplanung von den Projektergebnissen. Beispielsweise bestehen enge Kontakte zu einem Startup aus dem Bereich Geoinformatik, mit dem schon zwei weitere öffentliche Forschungsanträge für Folgeprojekte gestellt wurden.

Den Reifenherstellern helfen die Ergebnisse von *TyreWearMapping*, mittelfristig das Ausmaß des allgemeinen Umweltschadens infolge des Reifenabriebs zu quantifizieren. Entsprechende Nachhaltigkeitsziele können mittelfristig abgeleitet und bei der Optimierung des Reifendesigns neben den Effizienzzielen berücksichtigt werden. Zudem liefert *TyreWearMapping* den Reifenherstellern kurzfristig wichtige Daten zur Freisetzung, Exposition und Verbreitung von Reifenabrieb, um potentielle Umweltrisiken gemäß REACH Verordnungen zu identifizieren und bewerten. Das rege Interesse der Reifenhersteller bei der Vorstellung der Ergebnisse bei der TRWP Platform zeigt die Bedeutung der Ergebnisse von *TyreWearMapping*. Da die Reifenabrasion wesentlich von dem Fahrverhalten des Fahrzeugs abhängt, lassen sich die Ergebnisse von *TyreWearMapping* zur Freisetzung von Reifenabrieb mittel- bis langfristig direkt von der Automobilindustrie bei dem Design neuer Fahrzeuge verwerten

Für Endanwender

Wenn das Planungs- und Entscheidungsinstrument, das gegenwärtig noch als Demonstrator vorliegt, als Softwareanwendung für interessierte Kunden, wie z.B. Planungs- und Ingenieurbüros bzw. bzw. Verantwortlichen in den öffentlichen Planungsabteilungen weiterentwickelt wird, kann es entweder direkt als Dienstleistung oder in Weiterentwicklung als Softwaretool oder Datenbank vermarktet werden. Die neue Methodik lässt sich mittelfristig auch auf andere Anwendungsfälle generell zur Ausbreitung von Partikeln oder an Partikeln haftenden Schadstoffen und für andere Länder übertragen, so dass sich noch weitere potentielle Märkte erschließen.

Ein kurzfristig umzusetzender unternehmerischer Verwertungsweg ist die Erstellung von Potential-/Hotspotkarten als Grundlage für die Generalentwässerungsplanung. Strategische Planungen zur Regenentwässerung (Generalentwässerungsplanung oder auch Niederschlagswasserbeseitigungskonzepte) müssen heute Aussagen zur Regenwasserbehandlung enthalten. Die Ergebnisse des Projektes *TyreWearMapping* können dazu verwendet werden, Bereiche mit Schadstoffanfall und dementsprechend hohem Behandlungsbedarf zu identifizieren und Prioritätenlisten für die Planung von Strategien zur Regenwasserbehandlung aufzustellen.

Für Behörden

Es wurden neue Planungsinstrumente zur Identifikation von hydrologischen Hotspots mit hohen Verschmutzungspotenzialen entwickelt. Es existieren sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene keine vergleichbaren Tools, um den Reifenabrieb dezidiert in eine hydrologische Betrachtung von Entwässerungsgebieten zu integrieren.

Für das BASt und die Landesbetriebe und -ämter für Straßenwesen/Straßenbau können die gewonnen Informationen konkret zur Priorisierung bei der Ertüchtigung von Abwasserbehandlungsanlagen oder entsprechenden Neubaumaßnahmen dienen. Von großem Nutzen für die Betreiber von Behandlungsanlagen für Niederschlagswässer an Verkehrsflächen (Land-, Bundestraßen, Autobahnen) bei der Entscheidungsfindung zwischen Versickerung und Behandlung sind außer der messtechnischen Bewertung auch die in *TyreWearMapping* ermittelte geographische Zuordnung von Reifenabrieb-Hotspots. Aufbereitungsanlagen für Niederschlagswässer könnten gezielt verortet und erforderliche Behandlungskapazitäten vorgehalten werden. Die Erstellung einer Anwendung zur Bereitstellung von universell nutzbaren Daten ist im diesem Zusammenhang ein wichtiger Aspekt.

Die Ergebnisse können beispielhaft auf die hochaktuelle Thematik der Verkehrsflächenentwässerung angewandt werden. Die Ermittlung von Reifenabrieb als Teil des in der Wasserwirtschaft maßgeblichen Parameters - abfiltrierbare Stoffe, fein (AFS63), ist wesentlich differenzierter und detaillierter möglich als bei der Anwendung der pauschalen Flächenbelastung aus dem im Gelbdruck vorliegenden Arbeitsblatt der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft und Abfall DWA-A 102 möglich. So können wasserwirtschaftliche Anlagen in größeren Bauprojekten wesentlich genauer mit der zu erwartenden Reifenabriebbelastung dimensioniert werden. Konkret erwartet SIEKER, dass es zu Beauftragungen seitens von Gemeinden kommen wird.

Es ist eine Bereitstellung der Daten als GeoDaten WFS bzw. WMS möglich, welche von Behörden veröffentlicht werden können.

Im Arbeitsbereich des DWD sind außerdem Anwendungen bei der Prüfung der Luftqualität von Luftkurorten vorstellbar.

Für die Wissenschaft

Aktuell hat eine Vielzahl an Untersuchungen und Veröffentlichungen zu Mikroplastik FuE-Lücken im Problemfeld Reifenabrieb ausgemacht, die dem Projekt *TyreWearMapping* eine besondere Dringlichkeit und Dynamik verleihen. Schon während des laufenden Projekts, z. B. durch Gespräche beim Nutzerworkshop inspiriert, wurden weitere Verbundforschungsprojekte vorbereitet, die sich mit verkehrsbedingten Umweltemissionen in Kommunen, Entwicklung von übergreifenden, dynamischen Datenportalen für Reifenabrieb und zur Anwendung der Methodik des TWM Modells auf Probleme in der Regenwasserbewirtschaftung in NRW beschäftigen.

Außerdem werden gegenwärtig internationale Forschungsprojekte im Rahmen des „European Green Deals“ von der TRWP Plattform und UMSICHT vorbereitet.

Mittelfristig werden zudem weitere wissenschaftlichen Projekte angestrebt, die sich mit einer vertieften Erfassung und Beprobung der Entstehung von Reifenabrieb befassen. Langfristig ergeben sich vertiefte Beziehungen mit unterschiedlichen Forschungseinrichtungen zur weiteren Zusammenarbeit und Erfassung bzw. Bewertung unterschiedlicher Schmutzfrachtquellen.

Mit dem deutschlandweiten Straßendatensatz mit Verkehrsstärken existiert eine auf einem konsistenten Model basierte Datenquelle, die in zahlreichen anderen Mobilitätsprojekten Anwendung finden kann. Durch den modularen Modellierungsansatz kann eine stetige Verbesserung der Datenqualität erzielt werden.

II.5 Fortschritte im Themengebiet bei anderen Stellen

Die wesentlichen Akteure im nationalem und internationalem Umfeld sind im Abschnitt I.4.1 (Stand des Wissens und der Technik) genannt.

Darüber hinaus sind dem Projektteam keine weiteren Aktivitäten bei anderen Stellen bekannt.

Ganz allgemein wird die Entwicklung einer standardisierten Messmethodik von verschiedenen Laboren und wissenschaftlichen Institutionen, wie dem Labor Wessling [BMBF-2017] und dem Umweltforschungszentrum in Leipzig vorangetrieben. Letztere befassen sich auch mit der Alterung von Reifenabrieb. Vor dem Hintergrund, dass die Europäische Kommission ein Labeling der Reifen im Hinblick auf Reifenabrieb plant, befasst sich die ETRTO (European Tyre and Rim Technical Organisation) mit der Entwicklung von Testmethoden für Reifenabrieb.

II.6 Veröffentlichungen

II.6.1 Erfolgte Veröffentlichungen

Literaturveröffentlichungen

- Gehrke: Mikroplastik und Kunststoffemissionen im Wasserkreislauf, DWA Jahrestagung 2019, Tagungsband
- Gehrke, R. Bertling: Kunststoffemissionen im Wasserkreislauf, Korrespondenz Abwasser, Heft 3-2020, S. 162ff
- Gehrke, B. Dresen, J. Blömer, N. Thonemann: Modelling of the distribution and fate of tyre and road wear particles by the combination of a novel GIS and probabilistic model approach, Proceedings, SETAC 2020
- Gehrke, B. Dresen, J. Blömer: Modelling Of The Distribution Of Tyre Wear Particles in Germany, Proceedings, 29th Aachen Colloquium Sustainable Mobility 2020

Poster, Vorträge

- I. Gehrke: Tyre Wear Mapping, CSR, Brussels, 17.01.19 (Vorstellung von *TyreWearMapping* bei der europäischen Arbeitsgruppe „TRWP-Platform“)
- I. Gehrke: Mikroplastik und Kunststoffemissionen im Wasserkreislauf, DWA-Dialog, 23. bis 24. September 2019, Berlin
- I. Gehrke: Diffuse Einträge von Mikroplastik in die aquatische Umwelt – Schwerpunkt Reifenabrieb, 28. Werkleitertagung Wasser, 21. bis 22. November 2019, Brehna
- I. Gehrke, C. Bornemann: Eintragspfade und Behandlung von Mikroplastik im Abwasser – Schwerpunkt Reifenabrieb, DWA Nachbarschaften, 5.-6. November 2019, Soest
- I. Gehrke: Tyre Wear Mapping, CSR, Brussels, 17.02.20 (Update von *TyreWearMapping* bei der europäischen Arbeitsgruppe „TRWP-Platform“)
- Gehrke, B. Dresen, J. Blömer, N. Thonemann: Modelling of the distribution and fate of tyre and road wear particles by the combination of a novel GIS and probabilistic model approach, SETAC 2020
- I. Gehrke, B. Dresen, J. Blömer: Modelling Of The Distribution Of Tyre Wear Particles in Germany, 29th Aachen Colloquium Sustainable Mobility 2020

II.6.2 Geplante Veröffentlichungen

Die Projektpartner planen im Februar 2021 eine begutachtete Veröffentlichung in der umwelttechnisch ausgerichteten Zeitschrift gwf.

Zudem will das Projektteam bis Juni 2021 eine kleine Veröffentlichungsserie bei der Zeitschrift „Total Environment“ platzieren:

- Part I: Methodik zu Erstellung der Verkehrsdatensätze
- Part II: Modelle
- Part III: Ausbreitung und Verbleib in der Umwelt

III. QUELLENVERZEICHNIS

[Baensch-Baltruschat et al.-2020]	Baensch-Baltruschat, Beate; Kocher, Birgit; Stock, Friederike; Reifferscheid, Georg [2020]: Tyre and road wear particles (TRWP) - A review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment. Science of the Total Environment 733
[Bascunana-1986]	[Bascunana, J.L-1986]: Tire Sci. & Technology 14(3) 176-197
[BBSR-2013]	https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2013/testreferenzjahre/try-handbuch.pdf
[Beaver; Palazoglu-2006]	[Beaver, Scott; Palazoglu, Ahmet-2006]: Cluster Analysis of Hourly Wind Measurements to Reveal Synoptic Regimes Affecting Air Quality. Journal of Applied Meteorology and Climatology (45)12: 17.
[Berlin-2020]	https://www.berlin.de/sen/uvk/verkehr/infrastruktur/wasserbau/ausbau-von-gewaessern/panke/, Zugriff am 11.12.2020
[Berrisford et al. -2009]	[Berrisford, P.; Dee, D; Fielding, K; Fuentes, M; Kallberg,P; Kobayashi, S; Uppala, S-2009]: The ERA-Interim Archive. In ERA Report Series; ECMWF: Shinfield Park: Reading, UK, pp. 16–17.
[Bertling et al.-2018]	[Bertling, Jürgen; Hamann, Leandra; Bertling, Ralf -2018]: Kunststoffe in der Umwelt. DOI: 10.24406/UMSICHT-N-497117.
[Blok-2005]	[Blok, J.-2005]: Science of the Total Environment 348 / 173–190
[BMBF-2017]	[BMBF-2017]: BMBF-Projekt: RAU - Reifenabrieb in der Umwelt
[Borg Olesen et al.-2019]	[Borg Olesen, Kristina; Stephansen, Diana; van Alst, Nikki; Vollertsen, Jes-2019]: Microplastics in a Stormwater Pond. In: Water, 11, 1466. doi:10.3390/w11071466
[CDC-2014]	[DWD Climate Data Center (CDC) - 2014]: 200m x 200m Rasterdaten der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeiten in 10 m bis 100 m Höhe (in 10m Stufen) und Weibullparameter für Deutschland, Version V0.1,
[Conrad et al.-2015]	[Conrad, O.; Bechtel, B.; Bock, M.; Dietrich, H.; Fischer, E.; Gerlitz, L.; Wehberg, J.; Wichmann, V.; Böhner, J. – 2015]: System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, Geosci. Model Dev., 8, 1991-2007, doi: 10.5194/gmd-8-1991-2015.
[Copernicus-2018]	[Copernicus-2018]: https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover
[Dee et al.-2011]	[Dee, D.; Uppala, S.M.; Simmons, A.J.; Berrisford, P.-2011]: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 137(656), 553-597
[DWD-2000]	[Deutscher Wetterdienst-2000]: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/multi_annual/wind_parameters/resol_200x200/Wind1981-2000_Info.pdf
[Essel et al.-2015]	[Essel et al.-2015]: Quellen für Mikroplastik mit Relevanz für den Meeresschutz in Deutschland. In: UBA-Gutachten. Texte 63/2015
[EWA-1990]	[Europäischer Windatlas-1990]: Riso, National Laboratory, Roskilde, Denmark

[European Commission-2018] [European Commission-2018]: A European Strategy for Plastics in a Circular Economy

[Evangeliou et al.-2020] [Evangeliou, N.; Grythe, H.; Klimont, Z. et al.-2020]: Atmospheric transport is a major pathway of microplastics to remote regions. In: Nat Commun 11, 3381. https://doi.org/10.1038/s41467-020-17201-9

[Fachbereich Umweltmeteorologie-2006] [Fachbereich Umweltmeteorologie-2006]: VDI-Richtlinie 3782 Blatt 5: Umweltmeteorologie – Atmosphärische Ausbreitungsmodell – Depositionsparameter

[Gustafsson et al.-2019] [Gustafsson, M. et al. 2019]: Road dust load dynamics and influencing factors for six winter seasons in Stockholm, Sweden. https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100014.

[Hero-2018] [Hero, Ajdin-2018]: Untersuchung und räumliche Modellierung verkehrsbedingter Luftverunreinigungen durch Reifenabrieb in urbanen Räumen (MA)

[Jain et al.-1996] [Jain, A.K.; Jianchang, M; Mohiuddin, K -1996]: Artificial neural networks: a tutorial. Computer (29)3: 31–44.

[Jilesen -2013] [Jilesen, Jonathan-2013]: Multi-disciplinary design applications of unsteady aerodynamics and water sprays on road vehicles. https://www.researchgate.net/publication/303875471

[Kabanovsa et al.-2019] [Kabanovsa, A; Garmorya, A; Passmorea, M; Gaylard, A-2019]: Investigation into the dynamics of wheel spray released from a rotating tyre of a simplified vehicle model. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 184, Pages 228-246.

[Klempau-2003] [Klempau, F.-2003]: Untersuchungen zum Aufbau eines Reibwertvorhersagesystems im fahrenden Fahrzeug, Dissertation an der Uni Darmstadt

[Kluge-2010] [Kluge, Björn-2010]: Schwermetallbelastung der Böden und Sickerwasserkonzentrationen entlang der AVUS Berlin (BAB 115)-Immobilisierungsversuche mit Kalk

[Kocher-2010] [Kocher,B.-2010]: BASt-Bericht V188 zu Reifenabrieb in Deutschland (2010)

[Kole et al.-2017] [Kole, Pieter Jan; Löhr, Ansje J.; Van Belleghem, Frank G. A. J.; Ragas, Ad M. J.-2017]: Wear and Tear of Tyres: A Stealthy Source of Microplastics in the Environment. In: International Journal of Environmental Research and Public Health, 14, 1265; doi:10.3390/ijerph14101265

[Kotlarski et al.2014] [Kotlarski, S.; Keuler, K.; Christensen, O.; Colette, A.; Déqué, M.; Gobiet, A.; Goergen, K.; Jacob, D.; Lüthi, D.; van Meijgaard, E.; Nikulin, G.; Schär, C.; Teichmann, C.; Vautard, R.; Warrach-Sagi, K.; Wulfmeyer, V.-2014]: Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. Geosci. Model Dev. Discuss., 7(1), 217-293.

[KRDL-2014] KRDL Sachstandspapier 2014: Ermittlung der Deposition mithilfe von Ausbreitungsrechnungen im Rahmen der Prüfung der FFH-Verträglichkeit

[Kreider-2010] [Kreider, M.; Panko, J.; McAtee, B.; Sweet, L; Finley, B.-2010]: „Physical and chemical characterization of tire-related particles: Comparison of particles generated using different methodologies." Science of The Total Environment, Vol. 408, 652-659.

[Masters-1995] [Masters, T.-1995]: Advanced algorithms for neural networks. Wiley, New York.

[McCulloch; Pitts-1943] [McCulloch, W.S.; Pitts, W.-1943]: A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. The Bulletin of Mathematical Biophysics (5)4: 115–133.

[Panko et al.-2018] [Panko, Julie; Kreider, Marisa; Unice, Kenneth-2018]: Review of Tire Wear Emissions. In: Non-Exhaust Emissions: Elsevier, 147–160

[Pohrt-2019a] [Pohrt, R.-2019]: Tire Wear Particle Hot Spots – Review of Influencing factors.In: Facta Universitatis 17(1) 17-27

[Rockel et al.-2008] [Rockel, B.; Will, A.; Hense, A.-2008]: The Regional Climate Model COSMO-CLM (CCLM). Meteorologische Zeitschrift (17)4: 347–348.

[Rumelhart; McClelland-1986] [Rumelhart, D.; McClelland, J.-1986]: Parallel distributed processing. MIT Press, Cambridge, Mass.

[Schlünzen et al.-2017] [Schlünzen H.; Petrik R.; Grawe D.-2017]: METRAS-PCL Version 5.0.0 Benutzerhandbuch. Meteorologisches Institut, CEN, Universität Hamburg.

[Schlünzen et al.-1996] [Schlünzen K.H; Bigalke, K.; Lüpkes, C.; Niemeier, U.; von Salzen K.-1996]: Concept and realisation of the mesoscale transport- and fluid-model ‚METRAS', Meteorologisches Institut, Universität Hamburg, METRAS Techn. Rep. 5, S.156.

[Sieber et al.-2019] [Sieber, R.; Kawecki, D.; Nowack B.-2019]: Dynamic probabilistic material flow analysis of rubber release from tires into the environment. In: Journal of Environmental Pollution, Volume 258, 113573. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113573.

[Siemens-2020] [Siemens-2020]: https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/industries/automotive-transportation/water-management.html

[Sommer et al.-2018a] [Sommer, F.; Dietze, V.; Baum, A.; Sauer, J.; Gilge, S.; Maschowski, C.; Gieré, R.-2018]: Tire Abrasion as a Major Source of Microplastics in the Environment. In: Aerosol Air Qual. Res. 18 (8), S. 2014–2028. DOI: 10.4209/aaqr.2018.03.0099

[Sommer et al.-2018b] [Sommer, F.; Dietze, V.; Baum, A.; Sauer, J.; Gilge, S.; Maschowski, C.; Gieré, R.-2018]: Tire Abrasion as a Major Source of Microplastics in the Environment. In: Aerosol Air Qual. Res. 18 (8), S. 2014–2028. DOI: 10.4209/aaqr.2018.03.0099

[Sommer et al.-2018c] [Sommer, F.; Dietze, V.; Baum, A.; Sauer, J.; Gilge, S.; Maschowski, C.; Gieré, R.-2018]: Tire Abrasion as a Major Source of Microplastics in the Environment. In: Aerosol Air Qual. Res. 18 (8), S. 2014–2028. DOI: 10.4209/aaqr.2018.03.0099

[Taylor-1987] [Taylor, P.A.-1987]: Comments and further analysis on effective roughness lengths for use in numerical three-dimensional models. Bound. Layer Met., 39, 403-418.

[Ten Broeke et al.-2008] [Ten Broeke, H.; Hulskotte, J.; Denier van der Gon, H.-2008]: Emission estimates for diffuse sources - Netherlands Emission Inventory. Road traffic tyre wear. Online available: http://www.emissieregistratie.nl/erpubliek/documenten/Water/Factsheets/English/Road%20traffic%20tyre%20wear.pdf

[The Telegraph-2010] [The Telegraph-2010]: https://www.telegraph.co.uk/news/earth/earth-picturegalleries/7606679/Iceland-volcano-the-latest-spectacular-pictures-of-the-volcanic-eruption.html?image=16

[UMSICHT-2018] [UMSICHT-2018]: Konsortialstudie: Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik

[Unice et al.-2019] [Unice, K.M. et al.-2019]: Characterizing export of land-based microplastics to the estuary - Part I: Appli-cation of integrated geospatial microplastic transport models to assess tire and road wear particles in the Seine watershed. In: Science of the Total Environment 646, 1639–1649. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.368

[US-EPA-2018] [US-EPA-2018]: Miscellaneous Sources. Technical Report. U.S. Environmental Protection Agency. AP-42, 5th Edn., Vol. 1, Chapter 13, Section 13.2.1.

[Veith-1992] [Veith, A.-1992]: Rubber Chem.Technol. 65 / 601-659

[Wagner et al.-2018] [Wagner, Stephan; Hüffer, Thorsten; Klöckner, Philipp; Wehrhahn, Maren; Hofmann, Thilo; Reemtsma, Thorsten-2018]: Tire wear particles in the aquatic environment - A review on generation, analysis, occurrence, fate and effects. In: Water research 139, 83–100. DOI: 10.1016/j.watres.2018.03.05

[Wupperverband-2010] www.wupperverband.de, Zugriff am 11.12.2020