Allianz Fahrweg Normalspur / Genfergasse 11, CH-3001 Bern / info@allianz-fahrweg.ch / allianz-fahrweg.ch

Unterschiede in den Erschütterungsemissionen von verschiedenen Rollmaterialtypen - Vergleich mit den VIBRA-1 Parametern

Laurence Conreaux



Dezember 2025

Impressum



Autorin

Laurence Conreaux

Herausgeber

Allianz Fahrweg Normalspur, Bern, https://allianz-fahrweg.ch

ISBN

978-3-907456-05-7

Lizenz

Solange nichts anderes angegeben ist, sind die Inhalte dieses Dokuments unter der Lizenz CC-BY 4.0 freigegeben. Für die Nutzung von Teilen, die nicht der Allianz Fahrweg Normalspur gehören, kann die Erlaubnis des jeweiligen Rechteinhabers notwendig sein.

Link

https://allianz-fahrweg.ch/9783907456057.pdf

Zitierung

Laurence Conreaux, «Unterschiede in den Erschütterungsemissionen von verschiedenen Rollmaterialtypen - Vergleich mit den VIBRA-1 Parametern», Allianz Fahrweg Normalspur, Bern, 2025, https://allianz-fahrweg.ch/9783907456057.pdf

Version

1.0.0

Interne Referenznummer

PRJ-100-032-203

ALLIANZ FAHRWEG

Zusammenfassung

Die Allianz Fahrweg hat von 2023 bis 2025 gezielt Emissionsmessungen von Schienenfahrzeugen an 13 Standorten im Netz durchgeführt, um Unterschiede in Rollmaterial, Oberbau und Unterbau zu quantifizieren. Rund 100.000 Zeitsignale von Zugsdurchfahrten in verschiedenen Abständen zum Gleis wurden erfasst. Diese umfangreiche Datengrundlage ermöglicht eine detaillierte Analyse und den Vergleich der Emissionen verschiedener Rollmaterialtypen untereinander und an unterschiedlichen Standorten.

Das empirische Modell VIBRA-1, das zur Prognose von Erschütterungs- und Körperschallimmissionen in Gebäuden in der Schweiz eingesetzt wird, unterscheidet vier Klassen für Rollmaterialemissionen – Leichtbauzüge, Reisezüge, Güterzüge sowie eine provisorische Kategorie für den Fahrzeugtypen FV-Dosto. Diese Einstufung basiert auf Messdaten von Flotten, die heute teilweise nicht mehr in Betrieb sind und durch neues Rollmaterial ersetzt wurde. Die vorliegende Auswertung zeigt, dass die 2016 definierten VIBRA-1-Emissionsparameter für die heute verkehrenden Flotten weitgehend anwendbar sind. Darüber hinaus bestätigt die Analyse den in VIBRA-1 angenommenen linearen Zusammenhang zwischen Schwinggeschwindigkeit und Fahrgeschwindigkeit und ergibt ähnliche Abminderungsfaktoren in Abhängigkeit vom Gleisabstand.

Gleichzeitig ergibt sich eine erhebliche Streuung sowohl innerhalb der Rollmaterialtypen als auch zwischen den Standorten. Es wird wiederholt die Korrelation zwischen unabgefederten Radsatzmassen und Fahrzeugemissionen aufgezeigt, während die Achslast nur schwach mit den Emissionen korreliert. Standortabhängig führen sehr weiche Untergründe und auch Isolierstösse zu erhöhten Emissionen. Ein klarer Zusammenhang mit lokalen Schweissnähten ist hingegen nicht erkennbar. Frequenzanalysen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt wurden, könnten zu einigen Fragestellungen zusätzliche Erklärungen liefern.

Dieser Bericht ist eine ausführlichere und aktualisierte Fassung für die Allianz Fahrweg Normalspur vom Beitrag, der am 26. Symposium Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen am 27. Juni 2025 in Dübendorf vorgestellt wurde.

Abkürzungsverzeichnis

BAFU	Bundesamt für Umwelt
BAV	Bundesamt für Verkehr
ECM	Entity in Charge of Maintenance
EKS	Erschütterungen und Körperschall
EMW	EinsenkungsMessWagen
LRS	Laufradsatz
MP	Messpunkt
RLC	Radlast-Checkpoint
RMS	Root Mean Square
SBB	Schweizerische Bundesbahnen
SBB-P	SBB-Personenverkehr
TRS	Triebradsatz
UIC	Union Internationale des Chemins de Fer
USP	Under Sleeper Pad (Schwellenbesohlung)
ZKE	Zugkontrolleinrichtung

ALLIANZ FAHRWEG

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung 3

Abkürzungsverzeichnis 4

1. Einleitung 7

2. Grundlagen 8
2.1. Fahrzeugemissionen . . . 8
2.2. Das Prognosemodell VIBRA-1 . . . 8

3. Methodik 11
3.1. Abgrenzung der Studie . . . 11
3.2. Messdaten . . . 11
3.3. Datenverarbeitung . . . 12
3.3.1. Berücksichtigung von Betriebsdaten . . . 12
3.3.2. Metriken für Erschütterungsemissionen . . . 12
3.3.3. Konsolidierung der Messdaten . . . 13
3.3.4. Datenauswertung . . . 13

4. Ergebnisse 15
4.1. Reproduzierbarkeit der Messungen eines Zugsindividuums . . . 15
4.2. Variabilität innerhalb eines Rollmaterialtyps . . . 16
4.3. Dokumentation des gesamten Datensatzes . . . 16
4.4. Abhängigkeit der RMS-Werte von der Fahrgeschwindigkeit . . . 18
4.5. Abhängigkeit der RMS-Werte mit dem Abstand Messpunkt zur Gleismitte . . . 23
4.6. Fahrzeugunterschiede über Standorte und Messpunkte . . . 26
4.6.1. Mit Abstandskorrektur, ohne Fahrgeschwindigkeitskorrektur . . . 26
4.6.2. Mit Abstands - und Fahrgeschwindigkeitskorrektur . . . 34
4.7. Standort- und Messpunktunterschiede . . . 38
4.8. Anwendbarkeit der aktuellen VIBRA-1 Emissionsparameter . . . 46
4.8.1. Gesamtbeurteilung . . . 46
4.8.2. Aufschlüsselung nach Rollmaterialtyp . . . 48
4.8.3. Berücksichtigung der Vertretung der Rollmaterialtypen . . . 50

5. Diskussion und Fazit 51

Literatur 52

A. Unterschiede zur Publikation für das Ziegler Symposium 60

B. Methodik 61
B.1. Überlegungen zu Fahrzeugsemissionsmetriken . . . 61
B.1.1. Veranschaulichung anhand von Messdaten . . . 61

B.1.2. Fazit und Ausblick zu den Metriken 64

C. Ergebnisse **65**
C.1. Abhängigkeit der RMS-Werte mit der Fahrgeschwindigkeit 65
C.2. Abhängigkeit der RMS-Werte mit dem Abstand Messpunkt zur Gleismitte 69
C.3. Fahrzeugunterschiede über Standorte und Messpunkte 71
C.3.1. Mit Abstandskorrektur, ohne Fahrgeschwindigkeitskorrektur 71
C.3.2. Mit Abstands - und Fahrgeschwindigkeitskorrektur 83
C.4. Standortunterschiede 88
C.4.1. Für vrms_vibra_80kmh_8m 88
C.4.2. Für vrms_80kmh_8m 98
C.4.3. Für vrms_ES_80kmh_8m 110
C.4.4. Für vrms_KS_80kmh_8m 113
C.4.5. Für vmaxRunnRMS_80kmh_8m 116
C.4.6. Für vmax_80kmh_8m 119
C.5. Anwendbarkeit der aktuellen VIBRA-1 Emissionsparameter 122

1. Einleitung

Die Software VIBRA-1 ist ein in der Schweiz etabliertes Prognosemodell, das zur Abschätzung von Erschütterungs- und Körperschallimmissionen des Schienenverkehrs und in frühen Phasen von Aus-, Um- oder Neubauprojekten der Eisenbahninfrastruktur eingesetzt wird. Es basiert auf einem semi-empirischen Ansatz, der physikalische Gesetzmässigkeiten nutzt, um die Übertragung von Schwingungen vom Rad-Schiene-Kontaktpunkt bis ins Gebäudeninnere zu modellieren. Die Emissionsparameter für die Fahrzeuge, die in VIBRA-1 hinterlegt sind, wurden vor fast einem Jahrzehnt validiert und angepasst und basieren auf Daten von Rollmaterial, das unterdessen teilweise ersetzt wurde. Mit der Einführung neuer Fahrzeuge stellt sich die Frage, ob diese Parameter weiterhin geeignet sind, um die aktuelle Situation korrekt abzubilden.

Die Allianz Fahrweg hat in den letzten zwei Jahren Emissionsmessungen von Schienenfahrzeugen an diversen Standorten in der Schweiz durchgeführt, um Unterschiede in Rollmaterial, Oberbau und Unterbau zu untersuchen. Damit ist eine solide Datengrundlage für einen Vergleich mit gewissen bestehenden VIBRA-Parametern entstanden. Ziel dieser Studie ist es, die Angemessenheit der VIBRA-1 Emissionsparameter im Kontext der heutigen Rollmaterialtypen zu überprüfen und die Ursachen für mögliche Abweichungen mit fahrzeug- und infrastrukturseitigen Merkmalen zu analysieren.

2. Grundlagen

2.1. Fahrzeugemissionen

Der Begriff „Fahrzeugemission“ bezieht sich auf die Schwingungen, die von der Quelle „Schienenfahrzeug“ erzeugt werden und in unmittelbarer Nähe zum Entstehungsort quantifiziert werden. Emission steht im Gegensatz zu Immission, wobei Letzteres die Einwirkung dieser Schwingungen an einem Empfängerort, wie beispielsweise in einem Gebäude, beschreibt. Dieser Beitrag konzentriert sich ausschliesslich auf die Erschütterungsemissionen von Schienenfahrzeugen, die im Freifeld in der Nähe von Bahnstrecken gemessen werden.

Die Erschütterungsemissionen von Schienenfahrzeugen entstehen durch komplexe Anregungsmechanismen im Rad-Schiene-Kontaktpunkt, beeinflusst von fahrzeug- und infrastrukturseitigen Faktoren. Bei den Fahrgeschwindigkeiten, die auf dem Schweizer Schienennetz üblich sind, sowie den typischerweise vorkommenden Bodeneigenschaften dominieren die dynamischen Anregungsmechanismen. Diese Mechanismen können durch geometrische Formabweichungen an den Rädern, wie Flachstellen, Ausbröckelungen oder polygonale Radabnutzungen, sowie an den Schienen durch Gleislagefehler, Schienenstösse oder Weichenherzstücke, hervorgerufen werden. Solche Abweichungen führen zu dynamischen Kontaktkräften, die das gesamte System in Schwingung versetzen und sich im Boden ausbreiten.

Dynamische Anregungsmechanismen entstehen ebenfalls aufgrund von Steifigkeitsänderungen der Fahrbahn, die eine örtlich unterschiedliche Einsenkung der Schiene bewirken. Konkret tritt dieser Mechanismus periodisch mit der Schwellenfachfrequenz aufgrund der punktuellen Lagerung der Schwellen auf, oder stochastisch bei einer Änderung der Bettungssteifigkeit, zum Beispiel an Übergängen im Ober- und/oder Unterbau oder infolge von unterschiedlichen Stopfzuständen im Schotter. Verstärkte dynamische Kräfte entstehen, wenn die Trägheit radseitig zunimmt, d.h. durch eine grössere unabgefederte Radsatzmasse oder durch eine höhere Fahrgeschwindigkeit, welche die Frequenz der Weganregung erhöht [8] [15] [17] [13].

Um die Erschütterungsemissionen zu beurteilen, werden Messungen üblicherweise während der Vorbeifahrt von Zügen in einem Abstand von 8 Metern zur Gleismitte durchgeführt. Aufgrund von Nahfeldeffekten sollten Messungen bei einem Abstand von weniger als 8 Metern vermieden werden [13] [21].

2.2. Das Prognosemodell VIBRA-1

Beim Aus-, Um- oder Neubau von Eisenbahninfrastrukturanlagen müssen in der Schweiz Richtwerte bezüglich Erschütterungen und abgestrahltes Körperschalls gemäss der nationalen Weisung BEKS [2] und der Checkliste Umwelt für Eisenbahnanlagen [1] Kapitel 5.14 eingehalten werden. Diese fordern in einem ersten Schritt eine Prognose zu den erwarteten Erschütterungs- und Körperschallwerten nach der Projektumsetzung mittels Berechnung mit dem Modell VIBRA-1.

VIBRA-1 berechnet eine Prognose der Erschütterungs- und Körperschallimmissionen mit einem einfachen empirischen Modell. So können Konfliktgebiete in der ersten Projektphase mit wenig Inputinformationen

bestimmt werden. Der Modellansatz basiert auf dem Fakt, dass Schwingungen, die im Rad-Schiene-Kontakt entstehen, durch den Boden und über das Gebäudefundament bis zu den Wänden und Decken gelangen und auf diesem Weg mehr oder weniger gut übertragen werden.

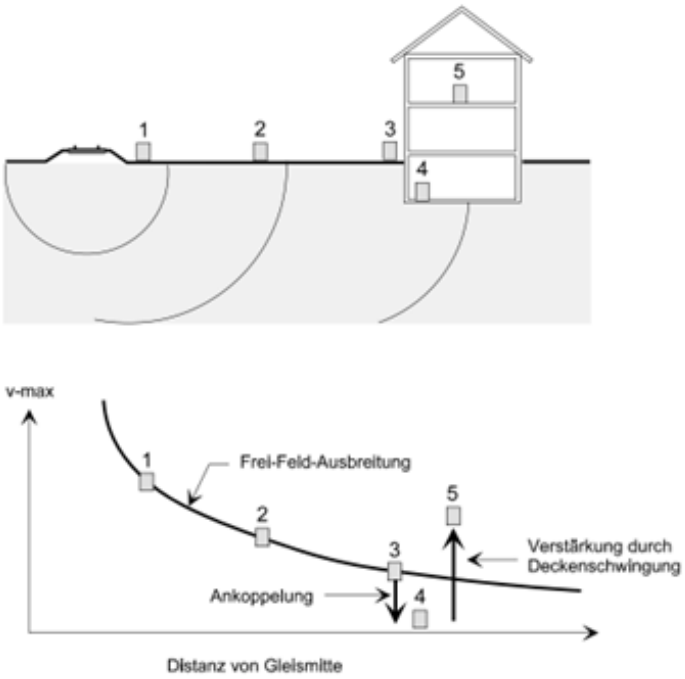


Abbildung 2.1.: Schematische Darstellung des Abminderungsverhaltens von Erschütterungen

Das in Abbildung 2.1 gezeigte Abminderungsverhalten wird in VIBRA-1 durch folgende Gleichung beschrieben:

$$v_j = v_{0,j} \cdot \frac{G}{G_0} \cdot F_t \cdot F_s \cdot F_b \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^m \cdot F_a \cdot F_d \tag{2.1}$$

Mit:

- v_j: RMS-Wert der Schwinggeschwindigkeit über eine Zugdurchfahrt in Mitte des Fussbodens für den Zugtyp j
- $v_{0,j}$: Referenzwert der Schwinggeschwindigkeit für den Zugtyp j d.h. Schwinggeschwindigkeit in einer Distanz r_0
- G: mittlere Fahrgeschwindigkeit der Züge
- G_0: Referenzfahrgeschwindigkeit (in der Regel 88 km/h) bei welcher $v_{0,j}$ angegeben ist
- r_0: Referenzdistanz (in der Regel 8 m), die für die Bestimmung von $v_{0,j}$ zur Anwendung kam.
- F_t: Faktor zur Berücksichtigung der Trasse (offene Strecke, Tunnel, Damm, Einschnitt etc.)
- F_s: Faktor zur Berücksichtigung von Schienenbesonderheiten (Weichen und Stösse)
- F_b: Faktor zur Berücksichtigung des Bodens im Gleisbereich
- m: Exponent für geometrische und Materialdämpfung im Boden
- F_a: Ankopplungsfaktor Gebäude – Baugrund
- F_d: Faktor für Eigenschwingung der Geschossdecken

Die verschiedenen Parameter und Faktoren wurden statistisch (als Mittelwerte) anhand einer grossen Anzahl Messungen bestimmt. Der Ansatz berücksichtigt keine Frequenzabhängigkeit bzw. Spektren. Implizit sind die Faktoren aufgrund der statistischen Auswertung jedoch auf den dominanten Frequenzbereich zugeschnitten [26]. Die Validierung des VIBRA-1 Modells aus dem Jahr 2016 ist im Bericht [4] dokumentiert und berücksichtigt Daten aus den Jahren 2001 bis 2014: daher sind die seitdem eingeführten Rollmaterialtypen nicht berücksichtigt.

3. Methodik

3.1. Abgrenzung der Studie

In diesem Beitrag werden nur Fahrzeugemissionen betrachtet, d.h. nur bis zum Frei-Feld-Messpunkt (2) der Abbildung 2.1. Die Datengrundlage für die Analyse beruht ausschliesslich auf Messungen an offenen Strecken (keine Messungen bei Tunneln oder Brücken), ausserhalb von Weichen.

Somit sind die folgenden Parameter aus Gleichung 2.1 von Interesse:

$$v_j = v_{0,j} \cdot \frac{G}{G_0} \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^m \cdot F_t \cdot F_s \cdot F_b \tag{3.1}$$

Der Einfluss der Trasse (Gleisquerschnitt, „Topologie“), des Bodens und der Schienenbesonderheiten wird in dieser Arbeit nicht als getrennter Parameter betrachtet, sondern in Kapitel 4.7 gemeinsam untersucht. Die lineare Abhängigkeit des Effektivwertes von der Fahrgeschwindigkeit G wird in Kapitel 4.4 untersucht.

Der Vergleich der Messwerte erfolgt mit den im Jahr 2016 in [4] bzw. [6] festgelegten Emissionsparametern für drei VIBRA-Rollmaterialklassen. 2023 wurde aufgrund von erhöhten Emissionen beim Rollmaterialtyp FV-Dosto, ein spezifischer Parameter bzw. eine separate Klasse definiert, jedoch provisorisch aufgrund der kleinen Datengrundlage, basierend auf den Untersuchungen in [5].

- Reisezüge: $v_{0,rms(8m,80km/h)} = 0.085$mm/s
- Leichtbauzüge: $v_{0,rms(8m,80km/h)} = 0.060$mm/s
- Güterzüge: $v_{0,rms(8m,80km/h)} = 0.12$mm/s
- FV-Dosto (vor Umbau der Drehgestelle): $v_{0,rms(8m,80km/h)} = 0.14$mm/s

Die Zuordnung einzelner Rollmaterialtypen zu den VIBRA-Klassen sind im internen Dokument [12] festgehalten.

3.2. Messdaten

Die SBB hat zwischen dem Herbst 2023 und Sommer 2025 gezielt Emissionsmessungen an 13 Standorten im Netz durchgeführt, um Unterschiede in Rollmaterial, Oberbau sowie Unterbau zu untersuchen. Dabei wurden über 100.000 Zeitsignale von Zugsdurchfahrten erfasst. Die Schwinggeschwindigkeiten wurden ausschliesslich in vertikaler Richtung erfasst. Die Sensoren wurden mehrheitlich in 8m-Abstand von der Gleisachse eines der Gleise in Anlehnung an [13] [21] platziert. Bei einzelnen Messpunkten wurde dieser Abstand deutlich grösser gewählt (16m, 24m) oder aufgrund örtlicher Gegebenheiten abweichend von den 8m.

Für die Messungen kamen Messgeräte vom Typ MR3003TR des Herstellers Syscom zum Einsatz zusammen mit uniaxialen Geophonen des Typs MS2003+. Der Messbereich der Sensoren liegt zwischen

1 und 315 Hz, die Abtastfrequenz betrug 4 kHz. Die Sensoren wurden auf ca. 40 cm tief im Boden eingeschlagene Stahl-Erdspiesse geschraubt (vgl. Abbildung 3.1).



Abbildung 3.1.: Verwendete Messequipment und Erdspiess

3.3. Datenverarbeitung

3.3.1. Berücksichtigung von Betriebsdaten

Die erhobenen Daten wurden durch den Abgleich mit Betriebsdaten den jeweiligen Fahrzeugnummern und Rollmaterialtypen zugeordnet. Je nach Standort stammen diese Daten von den Zugkontrolleinrichtungen, aus dem RCS-System („Railway Control System “, abgefragt über die SBB interne Anabel-Datenbank) und am Standort Sempach aus der Fahrbahnlabor-Datenbank [18]. Weitere Daten wie die Fahrgeschwindigkeit und die Zuglänge werden ebenfalls aus diesen Datenbanken abgerufen oder abgeleitet.

3.3.2. Metriken für Erschütterungsemissionen

Aus den Zeitsignalen wurden folgende Metriken abgeleitet:

- ***vrms_vibra*** [mm/s] („VIBRA-Methode“): „Root-Mean-Square“-Wert (RMS) der Schwinggeschwindigkeit (ohne Frequenzfilterung) einer Zugdurchfahrt (Mittelung über die effektive Vorbeifahrtszeit des Zuges plus ca. $\delta T = 5$ s insgesamt für die Vor- und Nachlaufzeit). Diese Definition entspricht derjenigen, die in VIBRA-1 verwendet wird, und wird in diesem Beitrag so umgesetzt, um die Vergleichbarkeit mit den VIBRA-Parametern zu gewährleisten. Sie weicht jedoch von der üblichen Definition von ***vrms*** ab. Im Handbuch der VIBRA-1-Software [9] wird der Einsatz von δT wie folgt begründet: „der Parameter δT trägt der Tatsache Rechnung, dass die Immissionen des Zuges bereits gespürt werden kann, bevor er sich vor dem Gebäude befindet und nach der durchfahrt noch etwas andauert“. Eine Gegenüberstellung von ***vrms_vibra*** zu ***vrms*** für gemessene Schwingschnellen ist im Anhang B.1 zu finden.
- ***vrms*** [mm/s] in ihrer üblichen Definition wie zum Beispiel in [21] vorgegeben und wie in der Fahrbahnlabordatenbank [18] umgesetzt: der RMS-Wert der Schwinggeschwindigkeit (ohne Frequenzfilterung) einer Zugdurchfahrt, gemittelt über die Vorbeifahrtszeit der effektiven Zuglänge.

- ***vrms_ES*** [mm/s] („ES“ für „Erschütterungen“): RMS-Wert der Bandpass-gefilterten Schwinggeschwindigkeit der Zugdurchfahrt zwischen den Grenzfrequenzen der Terzbänder 4 und 80 Hz, die für Erschütterungen relevant sind.
- ***vrms_KS*** [mm/s] („KS“ für „Körperschall “): RMS-Wert der Bandpass-gefilterten Schwinggeschwindigkeit der Zugdurchfahrt zwischen den Grenzfrequenzen der Terzbänder 40 und 125 Hz, die für den Körperschall relevant sind.
- ***vmax*** [mm/s]: Maximalwert des Zeitsignals während der Zugdurchfahrt
- ***vmax_runnRMS*** [mm/s]: Maximalwert des gleitenden RMS-Signals der Schwinggeschwindigkeit der Zugdurchfahrt
- ***vmax_runnRMS_25m*** [mm/s]: Maximalwert des gleitenden RMS-Signals der Schwinggeschwindigkeit der ersten 25m des Zuges (bei lokbespannten Zügen repräsentativ für die Lokomotive, ohne Wagen). Diese Metrik wurde spezifisch eingeführt, um Lokomotive unabhängig der gezogenen Wagen unterscheiden zu können.

In jeder Grafik dieses Dokuments wird auf den Achsen angegeben, welche Metrik dargestellt wird. In dieser Arbeit werden keine Frequenzanalysen durchgeführt sondern nur Einzahlwerte für die Erschütterungsemissionen berücksichtigt.

3.3.3. Konsolidierung der Messdaten

Anschliessend wurden die Messdaten der verschiedenen Messkampagnen, -standorte und Messpunkte in eine Matrix zusammengeführt. Für die Aggregation der Messdaten wurden IDs vergeben. In dieser Arbeit gelten folgende Ansätze und Benennungssystematiken:

- Eine *Kampagne* ist ein längerer Zeitraum, während dem Messungen an verschiedenen Standorten durchgeführt werden. Eine Kampagne wird mit „YYMM “ bezeichnet.
- Ein *Standort* ist ein Ort oder Streckenabschnitt, der typischerweise mehrere Hundert Meter bis einige Kilometer umfasst. An einem Standort wurde an mehreren Messpunkten gemessen. Er wird mit dem Betriebspunktkürzel bezeichnet.
- Ein *Messpunkt* ist die Position eines Sensors an einem Standort während einer Kampagne.
- Zu jedem *Messpunkt* wird eine oder mehrere *Messpunkt-IDs (**MPid**)* vergeben. Darüber hinaus schliesst das *MPid* bei mehrgleisigen Strecken auch die Information über das Gleis ein, das befahren wurde. Diese Differenzierung ist notwendig, um die unterschiedlichen Abstände des nahen und entfernten Gleises zu berücksichtigen. Für diesen Unterschied wird die MPid-Nummer mit „m“ (Messgleis), „g“ (Gegengleis), „g1“ (zweites Gegengleis, falls vorhanden) usw. ergänzt. Zu einem physischen Sensor an einem Messpunkt an einer doppelspurigen Strecke gehören somit zwei ***MPids***.
- Auf den Grafiken werden die betroffenen ***MPids*** aus Rückverfolgbarkeitsgründen angegeben, entweder in kurzer Form (z.B. „0123m“) oder in längerer Form inklusive Informationen zur Kampagne und zum Standort (z.B. „2505_SEM_0123m“). Der Fokus dieser Arbeit liegt jedoch nicht auf dem Vergleich der einzelnen Messpunkte, sondern auf den zugehörigen Standortmerkmalen (Abstand zum Gleis, Oberbau- und Untergrundeigenschaften usw.).

3.3.4. Datenauswertung

- Es wurden ausschliesslich Messpunkte mit einem Abstand von 5 bis 25 m zur Mitte des Messgleises berücksichtigt, unabhängig davon, ob die Fahrten auf dem nahen oder entfernten Gleis zum Sensor stattfanden.

- Es wurden nur Messpunkte berücksichtigt, bei welchen eine Mindestanzahl an Vorbeifahrten per Kategorie (z.B. Messpunkt, Rollmaterialtyp) erfasst wurden, diese Mindestanzahl variiert je nach Grafik und wird im betroffenen Kapitel angegeben.
- Metadaten zum Oberbau und Boden sowie Informationen zu bekannten Auffälligkeiten im Oberbau und Unterbau wurden den betroffenen Messpunkten zugeordnet. Konkret sind dies folgende Merkmale:
  - Auffälligkeiten wie das Vorhandensein eines Isoliertosses, einer Hohllage, von bekannten weichen Stellen, von Schweissungen oder sichtbare grosse Gleiseinsenkungen, die vor Ort bei Zugvorbeifahrten beobachtet wurden.
  - Gleiseinsenkungswerte, erfasst durch den Einsenkungsmesswagen, aus verschiedenen Berichten (je nach Verfügbarkeit).
  - Schwellentyp inklusive -besohlung, aus der DfA.
  - Zeitpunkt der letzten Oberbauerneuerung (aus der DfA, als Zeitpunkt des letzten Schwellen- oder Schotterwechsels).
  - Information zur Zusammensetzung des Untergrunds. Quelle ist die „Lithologische Karte der Schweiz – Gesteinsgruppen“ sowie die Informationen zur Dichte der Gesteine aus den gleichnamigen Kartenlayers von [14]
  - Eine Kategorisierung der Topologie in Querrichtung (d.h. wie liegt das Gleis relativ zum Sensor?): flach, in Dammlage, im Einschnitt, Sensor eingegraben, Sensor hinter einer Banketthalterung, basierend auf Beobachtungen vor Ort.
- Analog wurden Fahrzeugmerkmale, die in den Analysen herangezogen werden, den Rollmaterialtypen bzw. den einzelnen Vorbeifahrten zugeordnet. Konkret sind dies folgende Merkmale:
  - die Summe der unabgefederten Radsatzmasse, geteilt durch die Anzahl Räder (bei der Betrachtung von RMS-Metriken) respektive die unabgefederte Radsatzmasse pro Rad der angetriebenen Drehgestelle (bei der Betrachtung von Maximalwert-Metriken). Der Gedanke hinter dieser Unterscheidung liegt darin, dass angetriebene Achsen in der Regel mehr Erschütterungen erzeugen als Laufachsen.
  - die Fahrzeuggewichte / Radlasten, umgerechnet für den ganzen Zug
  - das Fahrzeugalter als Anzahl Jahre seit der Inbetriebnahme
  - ein- oder doppelstöckiges Fahrzeug

Diese Merkmale werden in den Ergebnisgrafiken des Kapitels 4 mit unterschiedlichen Farben dargestellt.

4. Ergebnisse

4.1. Reproduzierbarkeit der Messungen eines Zugsindividuums

Für die späteren Auswerteschritte ist es zunächst relevant zu zeigen, dass Messungen von Vorbeifahrten desselben Zugindividuums (d. h. des Zuges mit derselben Fahrzeugnummer) bei gleicher Fahrgeschwindigkeit und innerhalb eines kurzen Zeitraums (einige Tage) zu konsistenten Effektivwerten führen. Dies wird anhand eines Beispiels in Abbildung 4.1 verdeutlicht: sowohl die RMS-Werte (***vrms***) als auch die gleitenden RMS-Signale und Frequenzspektren sind bei Vorbeifahrten desselben Zugindividuums mit gleicher Fahrgeschwindigkeit sehr gut reproduzierbar ($\pm 10\%$ des RMS-Wertes).

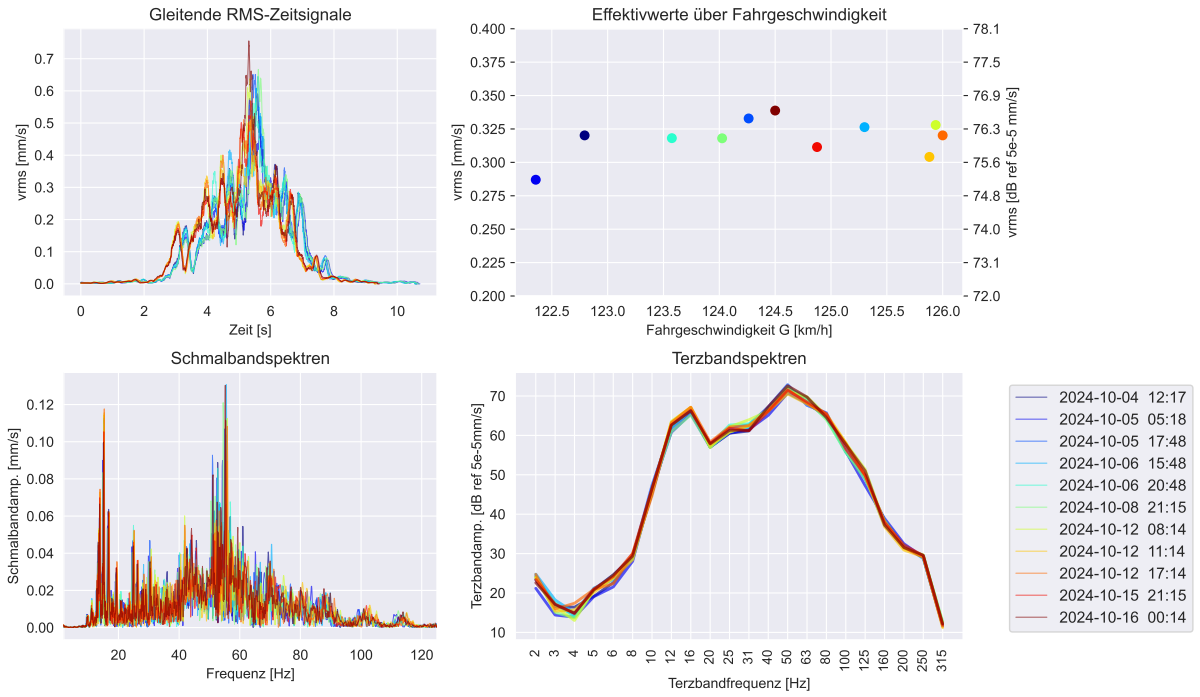


Abbildung 4.1.: Erschütterungsemissionen vom DTZ Nr. 514021 innerhalb von 12 Tagen in Tössmühle - v = 122 - 126 km/h

4.2. Variabilität innerhalb eines Rollmaterialtyps

Werden alle Kompositionen des gleichen Rollmaterialtyps bei gleichbleibender Fahrgeschwindigkeit betrachtet, wie im vorangegangenen Kapitel am Beispiel von einem DTZ-Zug in Tössmühle, zeigt Abbildung 4.2, dass die Variabilität der Messungen für alle einzelnen Individuen des gleichen Zugtyps gering ist (Grössenordnung $\pm 5 - 10\%$ des RMS-Wertes), während die Unterschiede zwischen den verschiedenen Individuen erheblich sein können. In Abbildung 4.2 ist bedingt durch ein einzelnes Fahrzeug ein Unterschied von bis zu Faktor 2,5 (Grössenordnung $\pm 45\%$) in den gemessenen Emissionen festzustellen. Der Rest der Fahrzeuge liegt in einem schmaleren Band der Streuung ($\pm 30\%$)

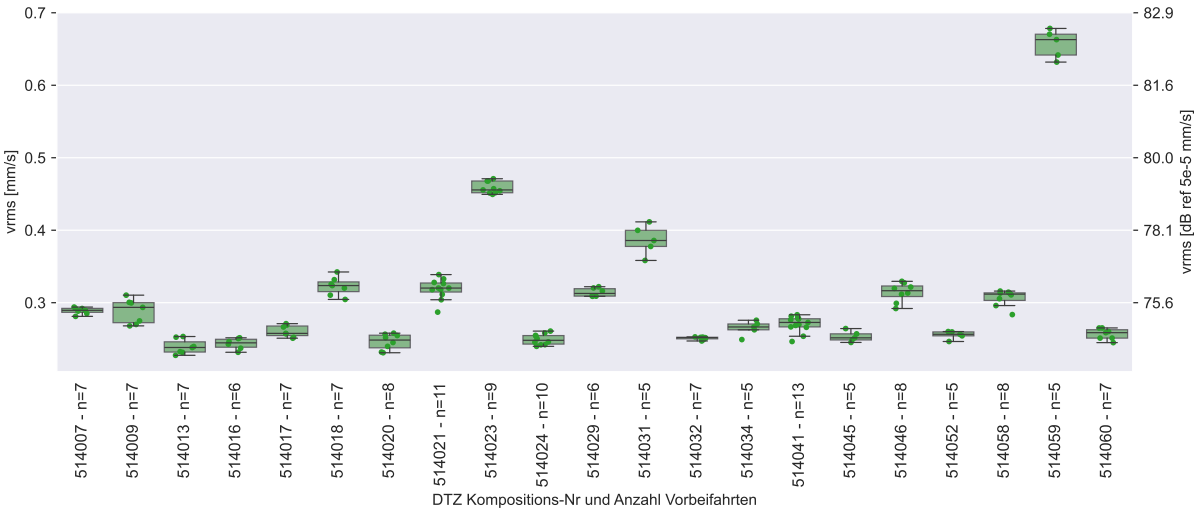


Abbildung 4.2.: Vergleich nach Kompositionsnummer der Erschütterungsemissionen von DTZ-Zügen innerhalb 16 Tage in Tössmühle - v = 122 - 126 km/h

4.3. Dokumentation des gesamten Datensatzes

Der erste Subplot der Abbildung 4.3 zeigt die Anzahl der erfassten Vorbeifahrten an einem Standort zum gleichen Zeitpunkt (d.h. in derselben Messphase). Sofern die verschiedenen Messpunkte (bzw. Messkanäle) die Vorbeifahrten auf dem gleichen Messgleis erfasst haben, wurde nur ein Balken dargestellt (dies ist durch die Kodierung der x-Achse veranschaulicht). Die logarithmische Skala der y-Achse ist dabei zu beachten.

Der zweite Subplot zeigt die Anteile jedes Rollmaterialtyps an diesem Messpunkt.

Die beiden unteren Subplots stellen die Verteilung der Fahrgeschwindigkeit an dem jeweiligen Messpunkt dar, getrennt für Personenzüge (grüne Boxplots) und Güterzüge (graue Boxplots).



Abbildung 4.3.: Beschreibung des Datensatzes

4.4. Abhängigkeit der RMS-Werte von der Fahrgeschwindigkeit

In Abbildungen 4.4 bis 4.6 wird die Abhängigkeit der Emissionsparameter ***vrms_vibra***, ***vrms*** respektive ***vmax_runnRMS*** von der Fahrgeschwindigkeit G dargestellt.

Im Anhang C sind diese Abbildungen für die drei weiteren Emissionsparameter ***vrms_ES***, ***vrms_KS*** und ***vmax*** dokumentiert.

Jeder Subplot zeigt einen Rollmaterialtyp und zwei um maximal 50 m versetzte Messpunkte am gleichen Standort und repräsentiert somit eine Kombination aus einem Standort und einem Rollmaterialtyp. Die hellen, dreieckförmigen Marker stehen für Fahrten eines gleichbleibenden Zugindividuums, während die dunklen, kreisförmigen Marker die Fahrten aller Zugindividuen des entsprechenden Zugtyps darstellen. Der aus den Messdaten ermittelte Referenzwert für ***vrms_vibra*** am betrachteten Messpunkt bei der Referenzgeschwindigkeit G0 = 80 km/h ist durch einen kreuzförmigen Marker gekennzeichnet. Die Koeffizienten der linearen Regression sind in den Legenden zusammen mit dem R^2-Wert angegeben. Die Anzahl n der betrachteten Punkte im Datensatz sowie die ***MPids*** der beiden Messpunkte sind in den Subplot-Überschriften angegeben.

Die Fahrzeugsindividuen und die Messpunkte wurden nicht aufgrund ihrer Bedeutung (wie z.B. Messpunkt mit Auffälligkeit an der Fahrbahn) sondern aufgrund einer ausreichenden Anzahl Datenpunkte und ihrer Verteilung über dem Fahrgeschwindigkeitsbereich für sinnvolle lineare Regressionen ausgewählt. Für Triebzüge wurden nur Einzelkompositionen betrachtet (keine Mehrfachtraktion).

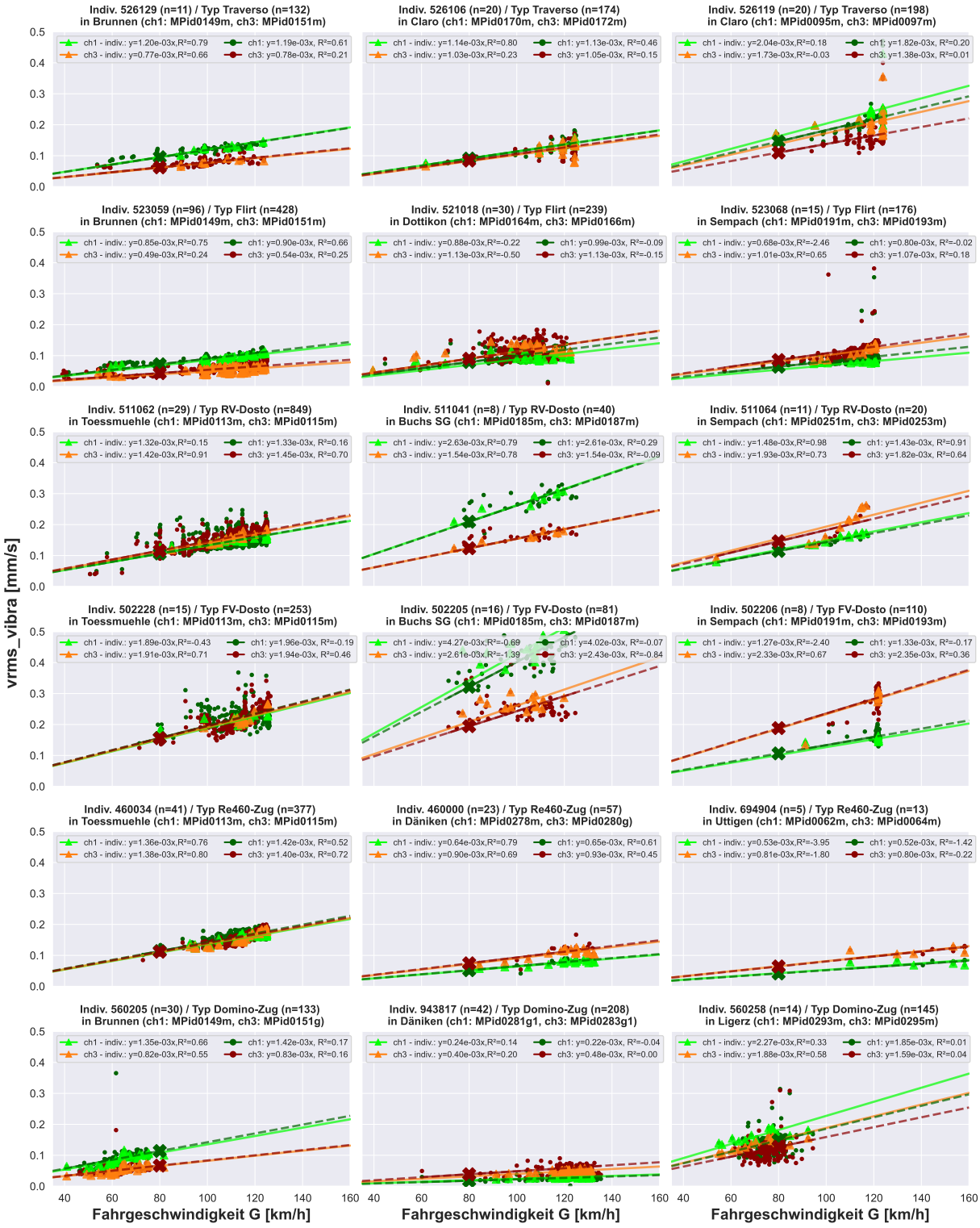


Abbildung 4.4.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms_vibra***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte

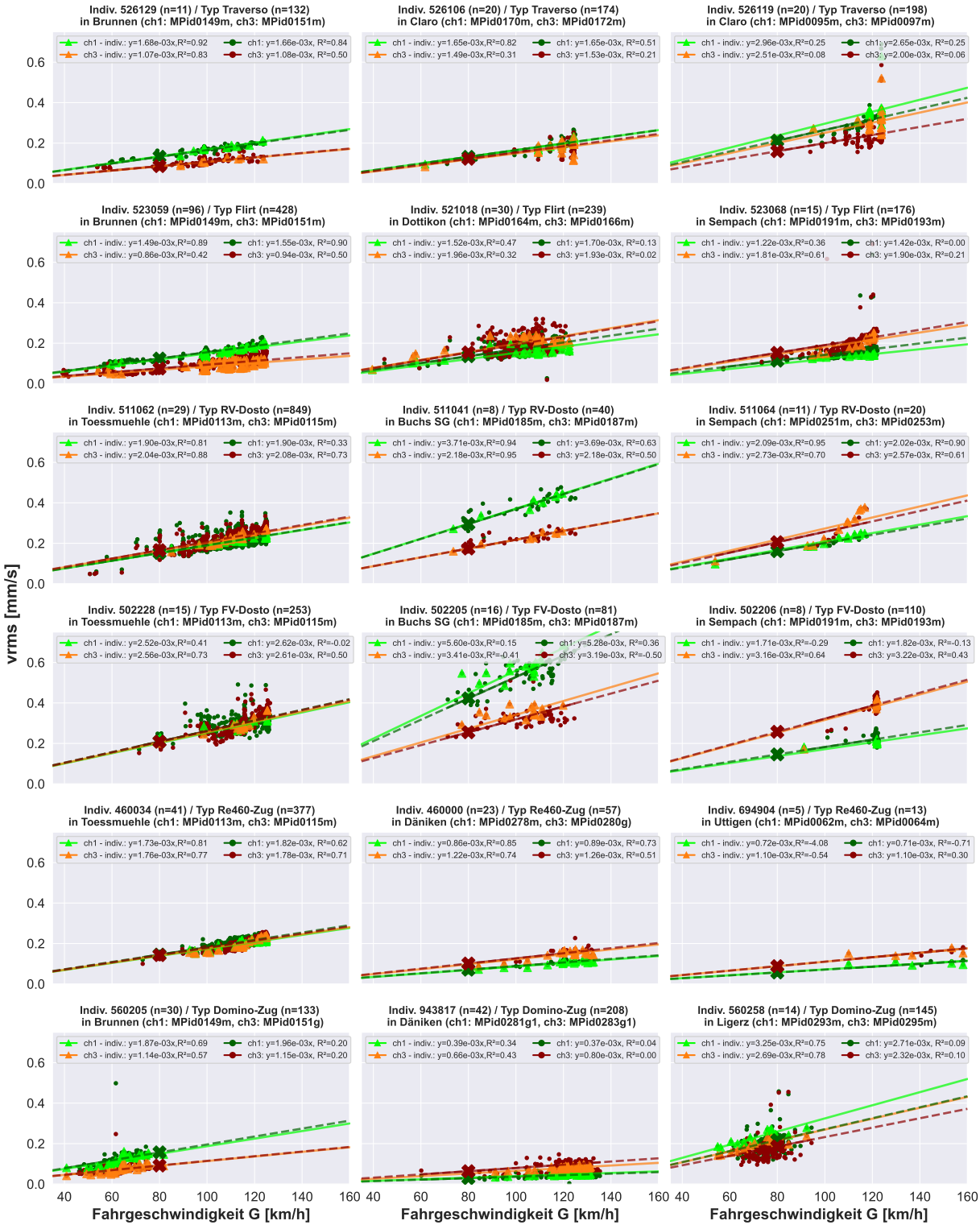


Abbildung 4.5.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte

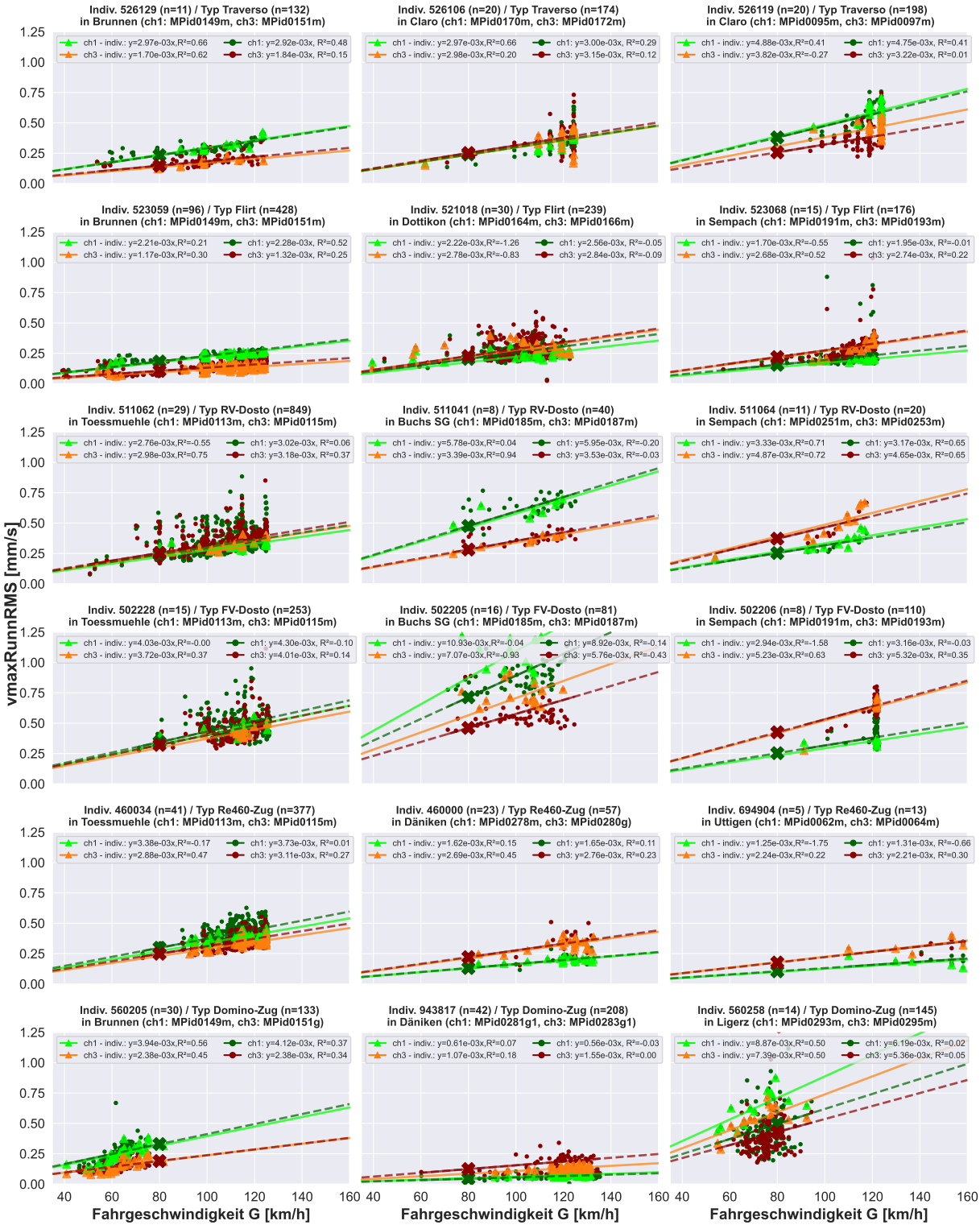


Abbildung 4.6.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vmax_runnRMS***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte

Diese Abbildungen:

- Bestätigen, dass die Fahrgeschwindigkeit ein relevanter Parameter für die Beurteilung von Erschütterungen ist.
- Bestätigen, dass die Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen Schwinggeschwindigkeit (vor allem für die Parameter ***vrms*** und ***vrms_vibra***) und Fahrgeschwindigkeit in VIBRA-1 gemäss Gleichung 3.1 angemessen ist. Die Steigung der Regressionskurve variiert jedoch deutlich je nach Rollmaterialtyp und Messpunkt.
- Zeigen, dass sich die Steigung teilweise deutlich ändert zwischen zwei Messpunkten an einem Standort, obschon diese innerhalb von 50 m längs der Strecke liegen.
- Zeigen, dass die ausgewählten Individuen in fast allen Fällen repräsentativ für den entsprechenden Zugtyp an diesem Standort sind (da die hellen und dunklen Regressionslinien oft überlappen).

Als Konsequenz wird für die weiteren Analysen die Fahrgeschwindigkeit bei Rollmaterial- oder Standortvergleichen entweder auf einen bestimmten Bereich mit einer Breite von 10 km/h begrenzt oder mithilfe von Gleichung 3.1 korrigiert.

Kommentar zum linearen Zusammenhang zwischen Erschütterungsemissionen und Fahrgeschwindigkeit

Der hier beobachtete lineare Zusammenhang ist weniger deutlich, wenn Erschütterungsemissionen innerhalb eines Rollmaterialtyps mehr streuen (z.B. bei den Domino-Zügen in Ligerz oder FV-Dostos in Tössmühle). Im Bericht [7] Kapitel 4.1.4 war der lineare Zusammenhang beim Fahrbahnlabor auch weniger deutlich, möglicherweise aufgrund der langen Beobachtungsspanne von mehreren Monaten, während welcher andere Parameter wie die Bodenfeuchte variiert haben. Im Fall der durch Ziegler Consultants durchgeführten Messungen in Pully-Nord war dieser lineare Zusammenhang für die FV-Dostos mit einem Messpunkt am Gebäudefundament nicht wirklich zu beobachten (Bericht [3], Abb. 4.1g). Es wird vermutet, dass an diesem Standort ein Resonanzeffekt vorhanden war. Im Allgemeinen ist für eine detaillierte Erklärung des Einflusses der Fahrgeschwindigkeit eine Betrachtung im Frequenzbereich erforderlich.

Vergleich der verschiedenen Erschütterungsmetriken

- Der Parameter vrms weist einen tendenziell besseren linearen Zusammenhang mit der Fahrgeschwindigkeit auf als der Parameter ***vrms_vibra***, was sich in einem leicht höheren R^2-Wert zeigt.
- Die Parameter ***vmax_runnRMS*** und ***vmax*** (Abbildungen im Anhang) korrelieren deutlich weniger linear mit der Fahrgeschwindigkeit im Vergleich zu den RMS-Werten. Die Werte zeigen jedoch ebenfalls eine Zunahme mit der Geschwindigkeit.
- Der Parameter ***vrms_ES*** (bandpassgefiltert 4-80 Hz) korreliert in ähnlichem Masse linear mit der Fahrgeschwindigkeit wie ***vrms*** mit einer vergleichbaren Steigung. Der Parameter ***vrms_KS*** (bandpassgefiltert 40-125 Hz) zeigt tendenziell eine kleinere Steigung und eine etwas schwächere Korrelation, wobei sich der R^2-Wert verbessern kann, wenn Ausreisser durch die Frequenzfilterung abgeschwächt werden.

4.5. Abhängigkeit der RMS-Werte mit dem Abstand Messpunkt zur Gleismitte

Für die Schätzung der Abminderung mit dem Gleisabstand r zur Gleismitte wird ein ähnlicher Ansatz verwendet wie in [4]. In VIBRA-1 wird diese Abminderung gemäss Gleichung 2.1 wie folgt modelliert:

$$v_{80km/h,r} = v_{80km/h,r0} \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^m \tag{4.1}$$

Werden $v_{80km/h,r}$ (kurz v) und r logarithmisch dargestellt und eine lineare Regression durchgeführt, können m und $v_{80km/h,r0}$ geschätzt werden. Dafür gilt folgende Herleitung:

$$\begin{aligned} y &= a \cdot x + b \\ \log(v) &= \log(r^a) + \log(b) \\ v &= b \cdot r^a \end{aligned} \tag{4.2}$$

$$\Rightarrow m = -a \tag{4.3}$$

$$\Rightarrow v_{80\,\text{km/h},r0} = \frac{a}{r_0^m} \tag{4.4}$$

$$\tag{4.5}$$

Diese Auswertung basiert auf Messungen, die überwiegend in einem Abstand von ca. 8 m von der Gleisachse durchgeführt wurden. Dies führt zu einer Konzentration der Datenpunkte bei $r = 8$m, da nur einzelne Messungen wurden mit grösseren und kleineren Abständen durchgeführt.

- Die Fahrzeugemissionswerte werden für eine Geschwindigkeit von 80 km/h unter Berücksichtigung einer linearen Korrektur (vgl. Kapitel 4.4) ermittelt.
- Für jeden Messpunkt werden arithmetische Mittelwerte dieser Werte über alle Durchfahrten gebildet, sowohl für spezifische Rollmaterialtypen und wie auch für alle Vorbeifahrten.
- Ein Datenpunkt wird in der Grafik bzw. für die lineare Regression berücksichtigt, sofern der Mittelwert auf Basis von mindestens fünf Durchfahrten ermittelt wurde.
- Auf der x-Achse der Grafik wird der Abstand r des Messpunkts zur Gleismitte angegeben. Beide Achsen sind logarithmisch skaliert.
- Die linearen Regressionen bzw. die Ermittlung des Exponenten für geometrische und Materialdämpfung im Boden m (und von $v_{80km/h,r}$) erfolgen gemäss der obenstehenden Herleitung. Die Koeffizienten der Regressionen sind in der Legende der jeweiligen Abbildung dargestellt.

In Abbildungen 4.7 bis 4.9 wird die Abminderung der Fahrzeugemissionen mit dem Gleisabstand für ***vrms_vibra***, ***vrms*** respektive ***vmax_runnRMS*** dargestellt. Im Anhang C sind diese Abbildungen für die drei weiteren Metriken ***vrms_ES***, ***vrms_KS*** und ***vmax*** dokumentiert.

Für die Metrik ***vrms_vibra*** ergibt sich $m = 1.2$ und $v_0 = 0.09mm/s$ bei $r_0 = 8m$ für alle Rollmaterialtypen (schwarze Linie), was den Werten aus [4] sehr gut entspricht (m betrug 1.1). Die Werte für v_0 stimmen ebenfalls in Grössenordnung mit den aktuellen VIBRA-Parametern überein. Zudem lassen sich bei den rollmaterialspezifischen v_0 Tendenzen erkennen, wie beispielsweise höhere Werte für Güterzüge im Vergleich zu Personenzügen sowie für Rollmaterialtypen mit höheren Erschütterungsemissionen. Diese Tendenzen decken sich grösstenteils mit den Beobachtungen im nächsten Kapitel 4.6.

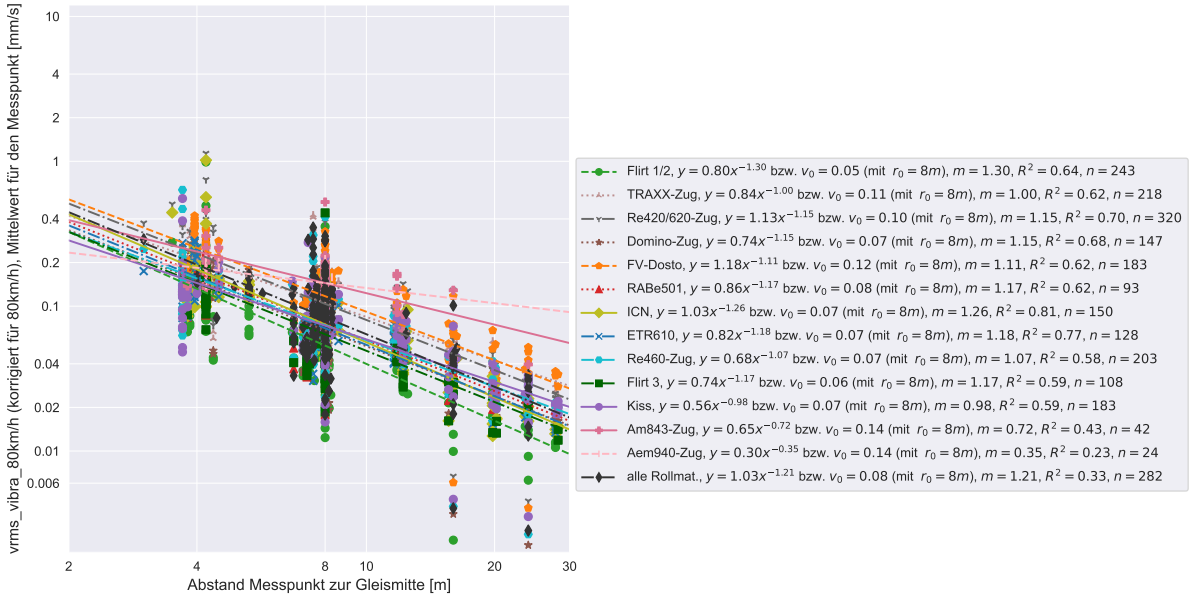


Abbildung 4.7.: Abminderung der Fahrzeugemissionenen (Metrik: ***vrms_vibra***, fahrgeschwindigkeitskorrigiert auf 80 km/h und Mittelwert je Messpunkt) nach Rollmaterialtypen.

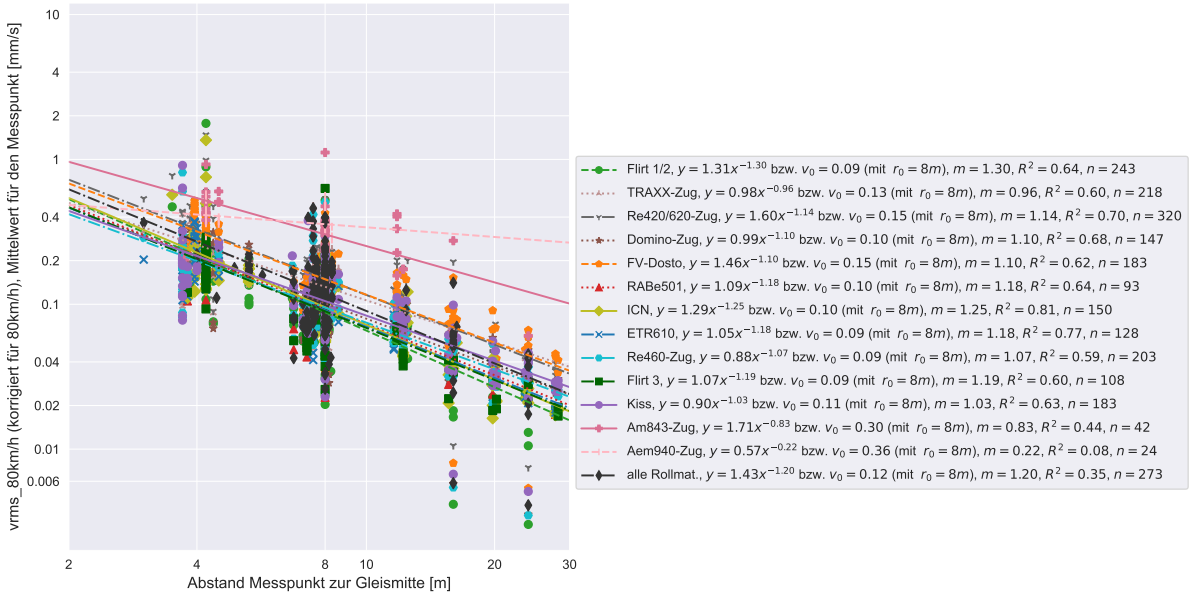


Abbildung 4.8.: Abminderung der Fahrzeugemissionenen (Metrik: ***vrms***, fahrgeschwindigkeitskorrigiert auf 80 km/h und Mittelwert je Messpunkt) nach Rollmaterialtypen.

Für die Metrik ***vrms*** (Abb. 4.8) wird ebenfalls $m = 1.2$ geschätzt, die Werte der v_0 sind logischerweise höher (siehe Untersuchung im Anhang B.1). Für ***vmax*** oder ***vmax_runnRMS*** (Abb. 4.9) wird für den Exponent m ein Wert von ca. 1.45 ermittelt.

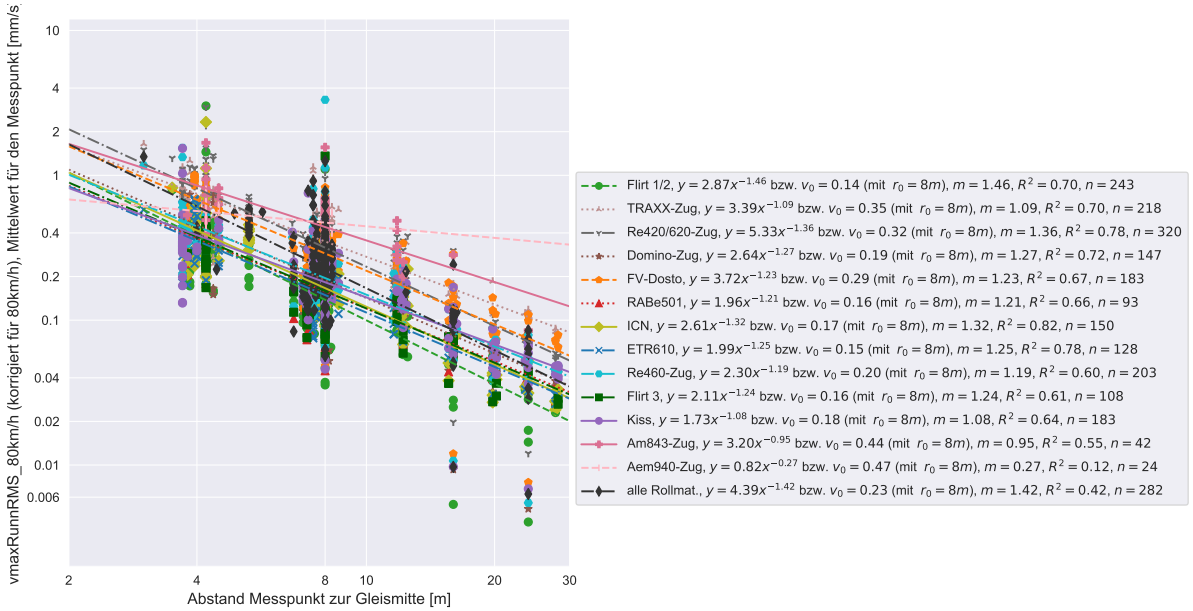


Abbildung 4.9.: Abminderung der Fahrzeugemissionenen (Metrik: ***vmax_runnRMS***, fahrgeschwindigkeitskorrigiert auf 80 km/h und Mittelwert je Messpunkt) nach Rollmaterialtypen.

Für die weiteren Auswertungen dieser Arbeit werden die Fahrzeugemissionen, die nicht bei $r = 8m$ gemessen wurden, entsprechend korrigiert: für RMS-Werte mit dem bestehenden Wert $m = 1.1$, für MAX-Werte mit $m = 1.45$ MPids, für welche eine Abstandskorrektur von mehr als 1.5 m vorgenommen wurde, werden auf der x-Achse aller Grafiken mit einem „*“-Zeichen markiert, damit eventuelle Abweichungen aufgrund dieser Korrektur schnell erkennbar sind.

4.6. Fahrzeugunterschiede über Standorte und Messpunkte

Alle Ergebnisgrafiken dieses Kapitels sowie des dazugehörigen Anhangs sind gleich aufgebaut: einer der Emissionswerte nach Kap. 3.3 (z.B. ***vrms***, ***vrms_vibra***, ***vmax***) wird berücksichtigt und die durchschnittlichen Fahrzeugemissionen werden über verschiedene Standorte hinweg dargestellt.

Der erste Subplot quantifiziert die Streuung der Emission durch die Differenz zwischen ihrem 95%- und 50%-Perzentil und dient als Indikator für das Potenzial der Radinstandhaltung. Der zweite Subplot zeigt die reinen Fahrzeugemissionen (arithmetisches Mittel der Metrik). Der dritte Subplot gibt die Anzahl der Vorbeifahrten nach Rollmaterialtyp und Standort im berücksichtigten Datensatz wieder. Die vier unteren Subplots enthalten die gleichen Datenpunkte wie der zweite, wobei die Punktfarbe entsprechend folgender „Metadaten“ angepasst wird (sofern Metadaten für diesen Rollmaterialtyp vorliegt):

- Unabgefederte Radsatzmasse: Summe der unabgefederten Massen des Zuges, dividiert durch die Gesamtzahl der Räder, in kg. Wenn ***vmax*** oder ***vmax_runnRMS_25m*** dargestellt werden, wird stattdessen die unabgefederte Masse der angetriebenen Räder berücksichtigt.
- Fahrzeugmasse: Summe der Radlasten Q0 (nach der Definition für die Trassenpreisberechnung: Dienstgewicht mit 2/3 der Betriebsstoffe + 1/3 Besetzungsgrad der Sitzplätze [24]), dividiert durch die Gesamtzahl der Räder, in Tonnen. Wenn vmax oder vmax_runnRMS_25m dargestellt werden, wird stattdessen die mittlere Achslast des Endfahrzeuges dargestellt.
- Alter des Fahrzeugs: Anzahl Jahre seit der Erstinbetriebnahme dieses Rollmaterialtyp (Punktfarbe nach Alter).
- Anzahl Stockwerke im Zug: ein- oder zweistöckig.

Im Berichtskörper sind die Ergebnisse für ***vrms_vibra***, ***vrms*** und ***vmax_runnRMS*** dargestellt. Die Darstellungen für die weiteren Metriken sind im Anhang zu finden. Es wurde die Korrektur des Abstands der Messposition zum Gleis mit $m = 1.1$ für RMS-Werte und $m = 1.45$ für MAX-Werte (vgl. Kapitel 4.5) berücksichtigt. Messpunkte, die eine Korrektur grösser als +/- 1.5 m benötigt haben, sind mit * auf der x-Achse gekennzeichnet. Auf den Abbildungen mit der Metrik ***vrms_vibra*** sind zusätzlich die vier Emissionsparameter, die in der VIBRA-1-Software definiert wurden, mit horizontalen Linien dargestellt (vgl. Kap. 2.2). Da diese nur für 80 km/h gelten, wurden sie für andere Fahrgeschwindigkeiten gemäss Gl. 3.1 umgerechnet. Für die weiteren Emissionsmetriken ist diese Gegenüberstellung nicht sinnvoll.

4.6.1. Mit Abstandskorrektur, ohne Fahrgeschwindigkeitskorrektur

In diesem Kapitel wurden Fahrzeugemissionen ohne Geschwindigkeitskorrektur aber für Geschwindigkeitsbereiche von 10 km/h eingegrenzt. Im Berichtskörper sind die Ergebnisse für die Geschwindigkeitsbereiche 75 - 85 km/h und 115 - 125 km/h dargestellt. Der Bereich 95 - 105 km/h ist im Anhang C.3.1 zu finden. Für alle Geschwindigkeitsbereiche wurden Datenpunkte berücksichtigt, sobald 10 Vorbeifahrten mit diesem Rollmaterialtypen erfasst wurden, ausser für 75 - 85 km/h, wofür 5 Vorbeifahrten als Mindestschwelle definiert wurde.

Fahrgeschwindigkeitsbereich zwischen 75 - 85 km/h

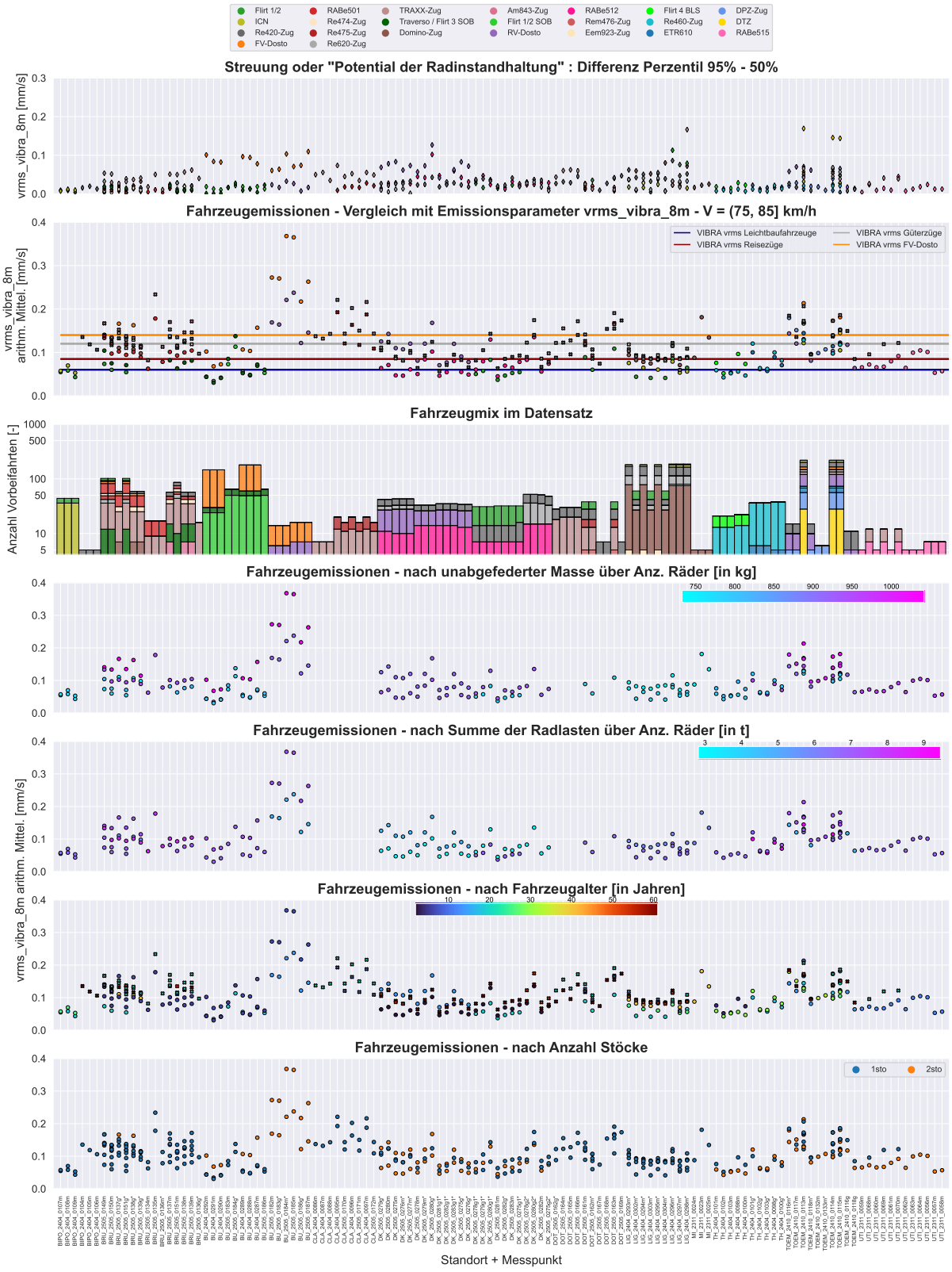


Abbildung 4.10.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms_vibra_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte

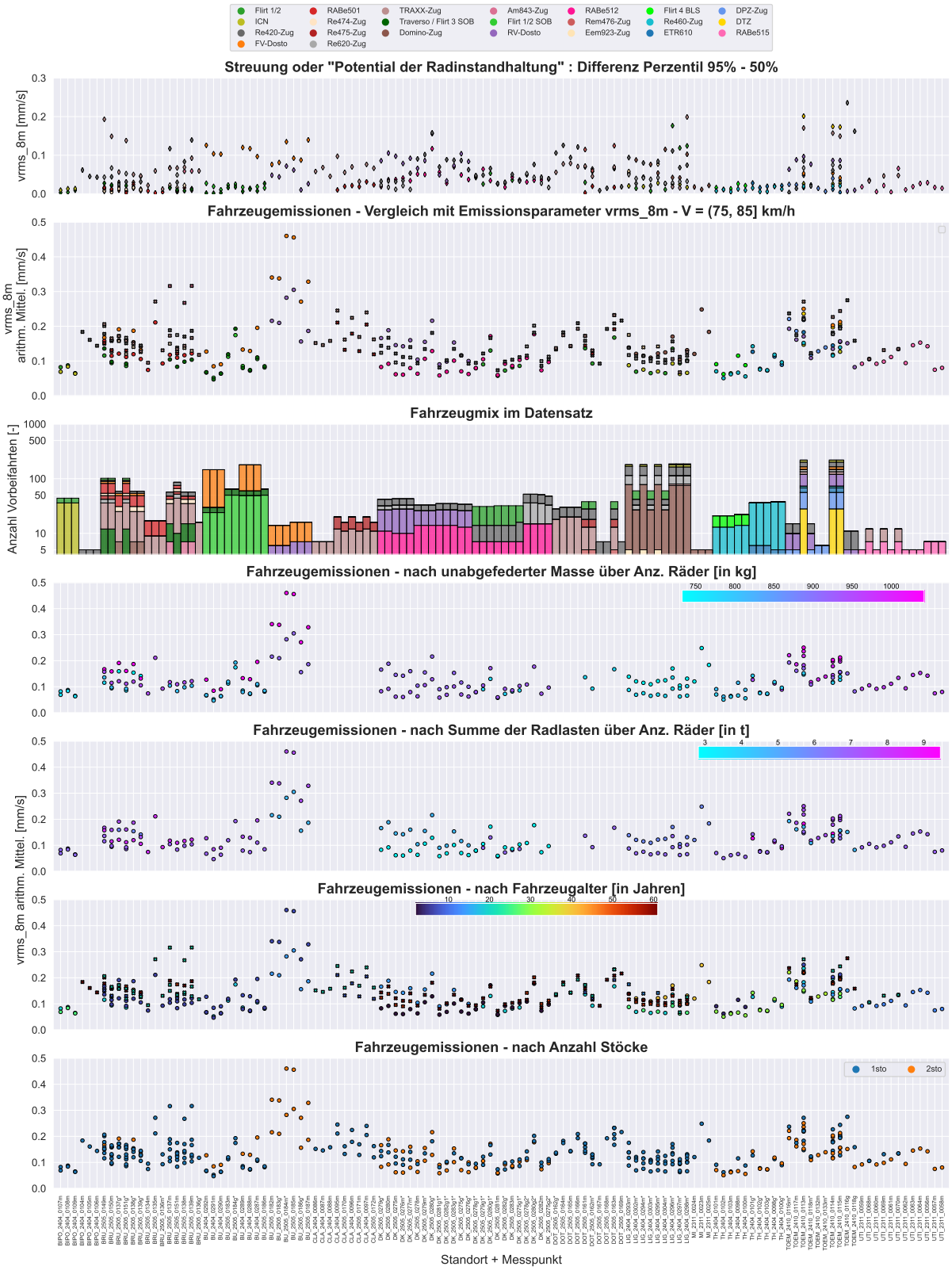


Abbildung 4.11.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte

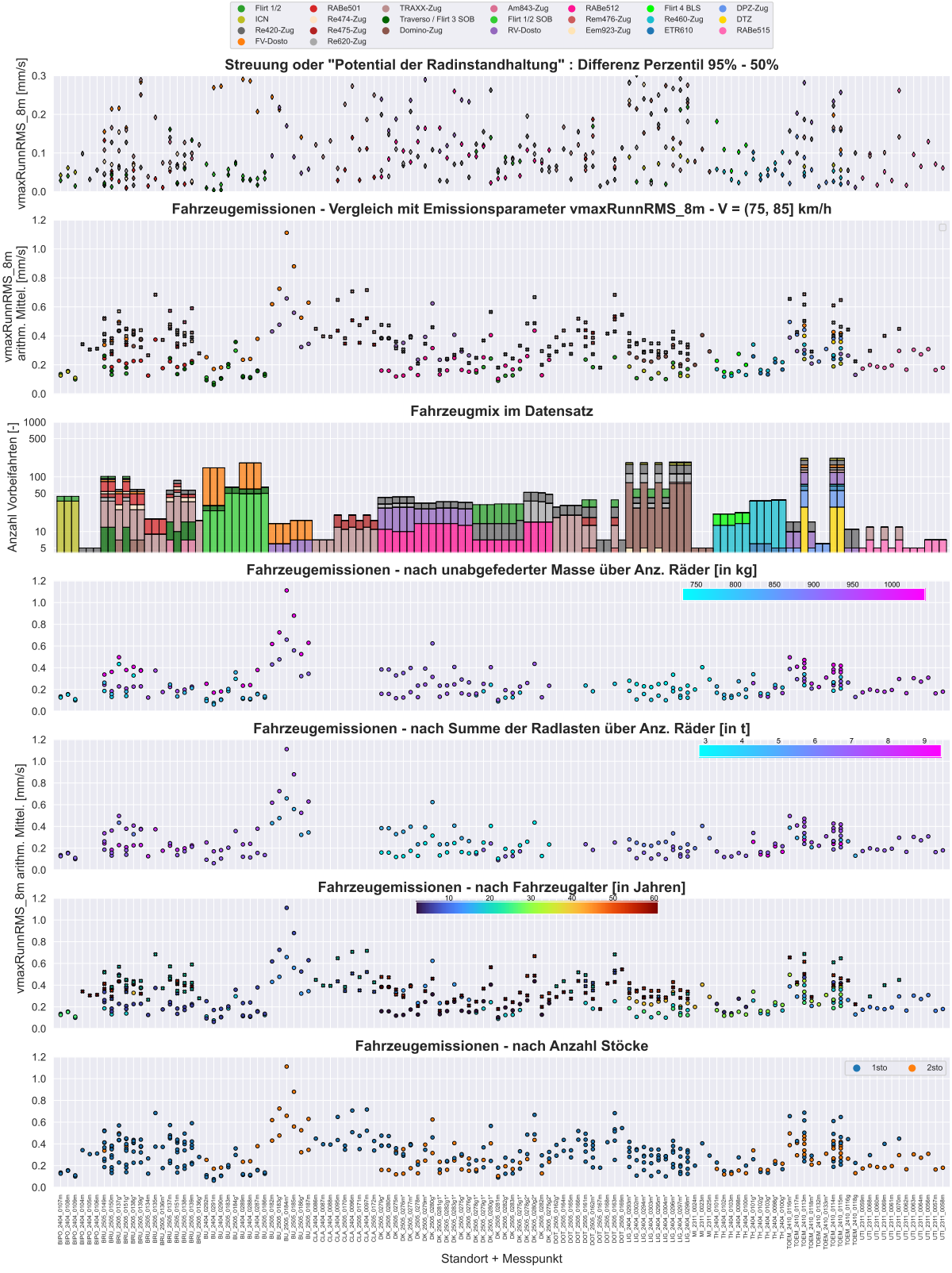


Abbildung 4.12.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vmaxRunnRMS_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte

ALLIANZ FAHRWEG

Fahrgeschwindigkeitsbereich zwischen 115 - 125 km/h

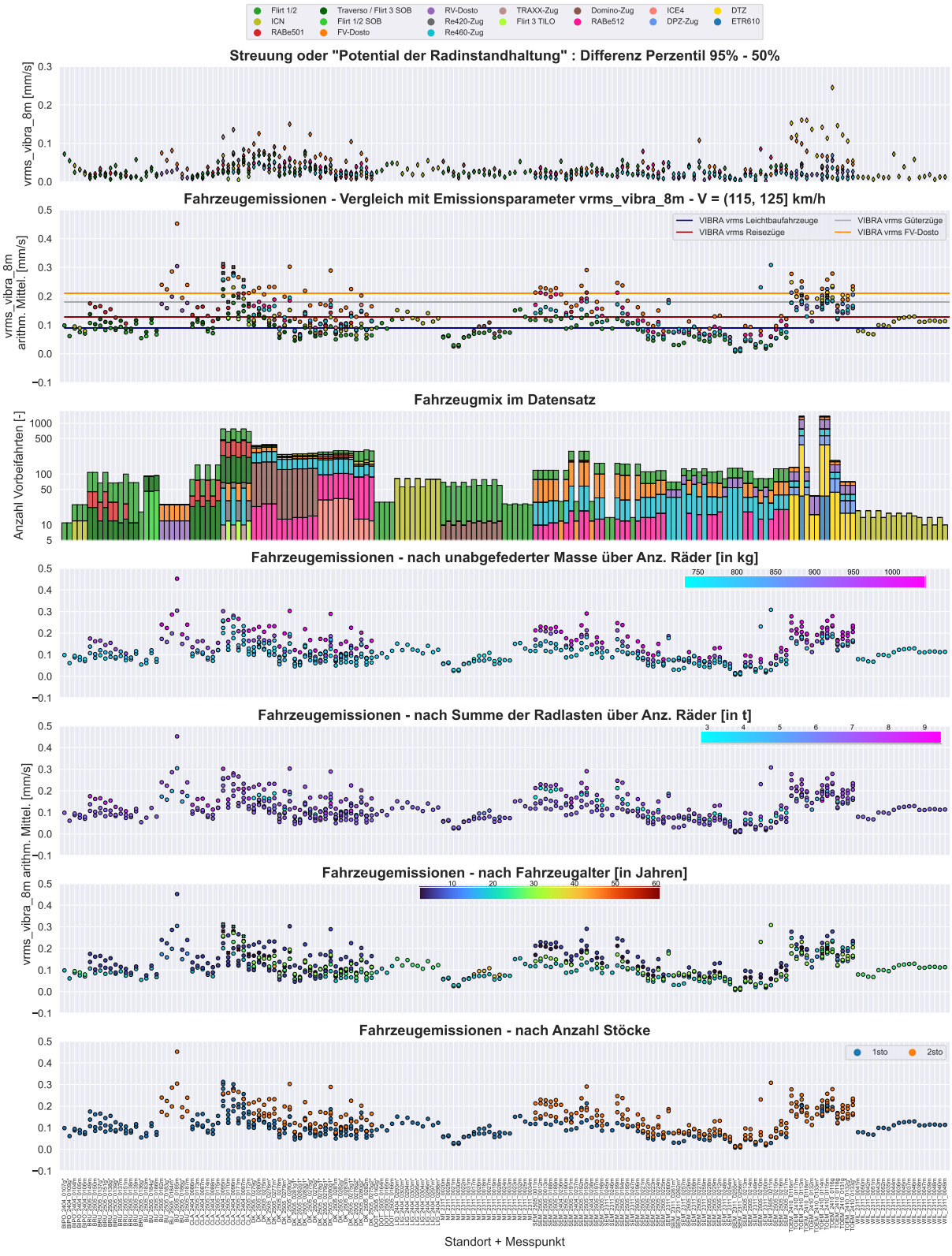


Abbildung 4.13.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms_vibra_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte

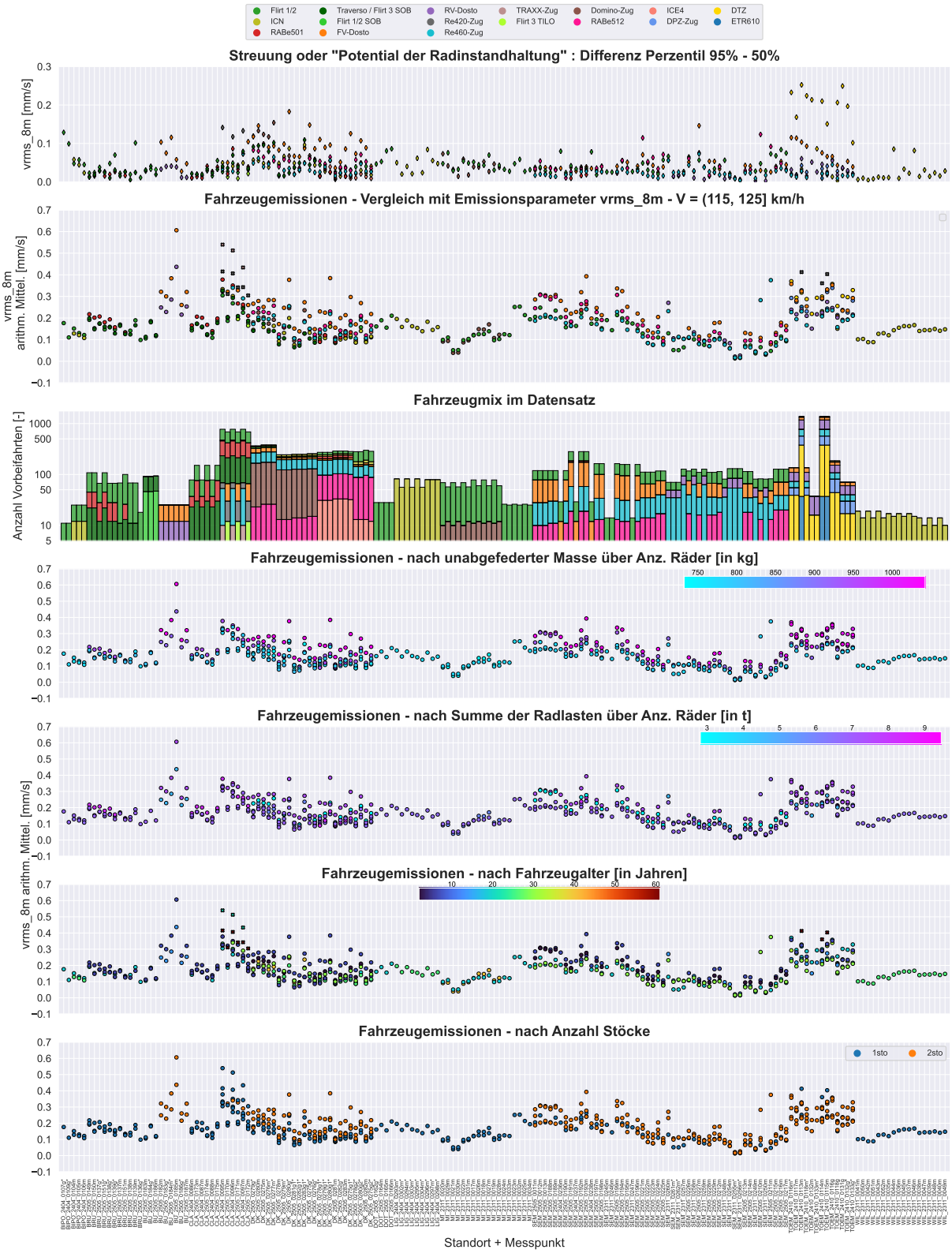


Abbildung 4.14.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte

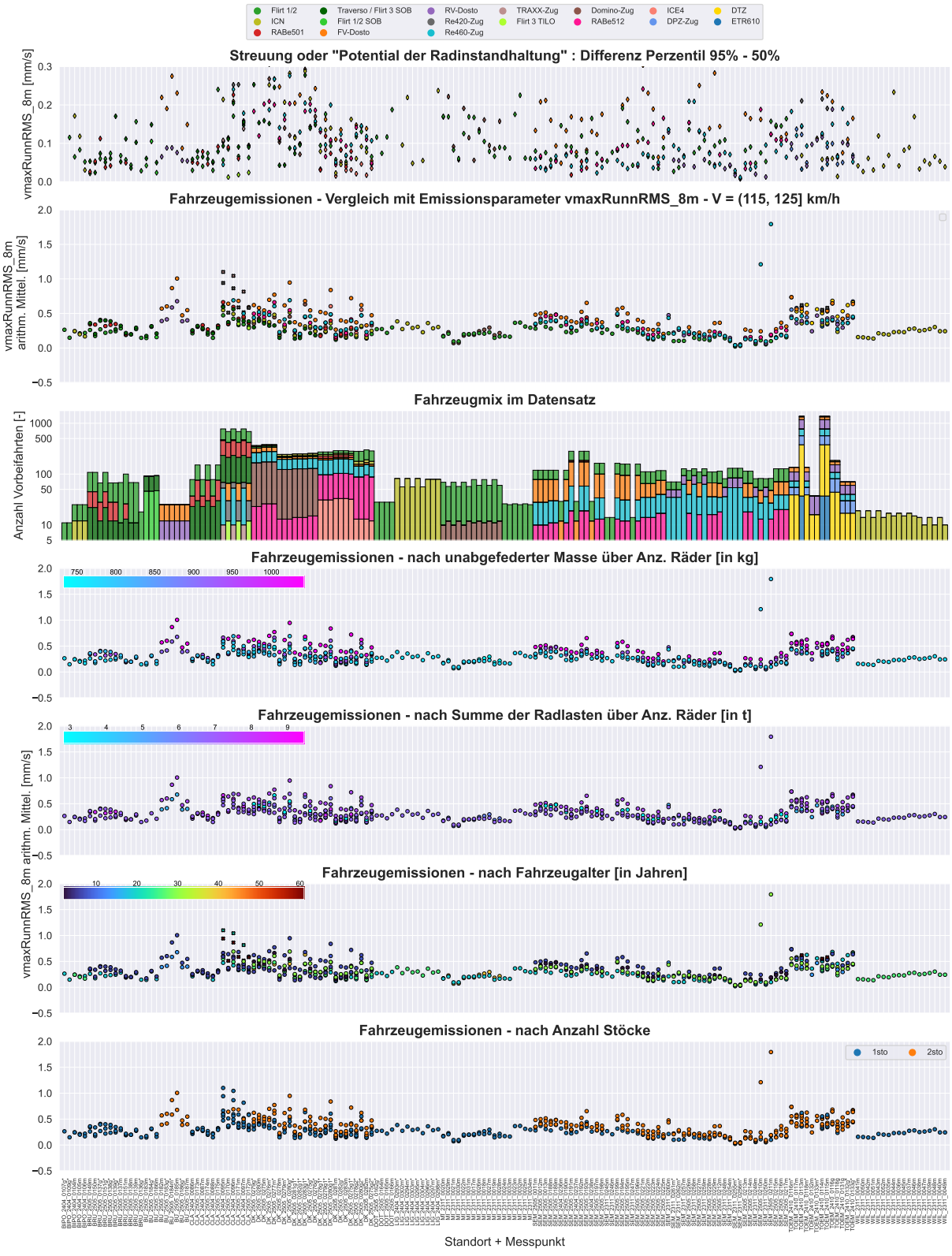


Abbildung 4.15.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vmaxRunnRMS_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte

Die Abbildungen 4.10 bis 4.15 verdeutlichen, dass es je nach Rollmaterialtyp relevante Unterschiede in den Fahrzeugemissionen gibt. Zudem sind ebenfalls sehr grosse Unterschiede je nach Messpunkt und Standort festzustellen, wobei zu diesem Zeitpunkt der Analyse noch keine Aussage über das Vorhandensein von Auffälligkeiten an den Messpunkten getroffen wird. In Abbildungen 4.10 und 4.13 stimmen einige Kombinationen von Rollmaterialtypen und Standorten gut mit den bestehenden VIBRA-Parametern überein. Bei anderen werden die VIBRA-Parameter deutlich überschritten, selbst der Parameter, der für Güterzüge gilt. Auch wenn diese Art von Grafiken nicht optimal sind, um Korrelationen mit Fahrzeugeigenschaften aufzuzeigen, zeigt sich ein Zusammenhang zwischen der unabgefederten Radsatzmasse und den Emissionen (magenta Punkte führen zu höhere Emissionen wie hellblaue). Mit den Achslasten ist die Korrelation weniger überzeugend. Darüber hinaus lässt sich eine Tendenz erkennen, dass neuere Fahrzeugtypen zu höheren Emissionen führen respektive, dass ältere Typen nicht schlechter sind. Die Anzahl der Stockwerke im Zug hat hingegen keinen relevanten Einfluss auf die Emissionen. Schlechtere Radzustände (d.h. höhere Werte auf dem ersten Subplot) wirken sich bei den verschiedenen MPids unterschiedlich aus und tiefe Emissionen für einen Rollmaterialtypen können auch zu einer grösseren Streuung respektive höheren Werten auf dem ersten Subplot führen.

4.6.2. Mit Abstands - und Fahrgeschwindigkeitskorrektur

Abbildungen 4.16 bis 4.18 betrachten die Fahrzeugemissionen, die mittels Gleichung 3.1 und einer Referenzgeschwindigkeit von 80 km/h korrigiert wurden (im Datensatz wurden Fahrten mit Geschwindigkeiten ab 50 km/h berücksichtigt) und eine Mindestanzahl von 15 Vorbeifahrten. Die Geschwindigkeitskorrektur führt zu mehr Datenpunkten auf den Grafiken bzw. eine breitere Fahrzeugvariation an den einzelnen Messpunkten als im letzten Kapitel 4.6.1. Die Interpretation der Ergebnisse bleibt weitgehend gleich.

Bei der Korrelation zwischen Erschütterungsmetriken und Indikatoren zu der unabgefederten Radsatzmasse stellt man fest, dass die gemittelte unabgefederte Radsatzmasse über die Anzahl Räder gut mit den Erschütterungs-RMS-Metriken korreliert. Diese Korrelation ist weniger deutlich zwischen der unabgefederten Masse der angetriebenen Achsen und der Maximalwert-Metriken (***vmax***, ***vrunnRMS_25m***, ***vrunnRMS***).

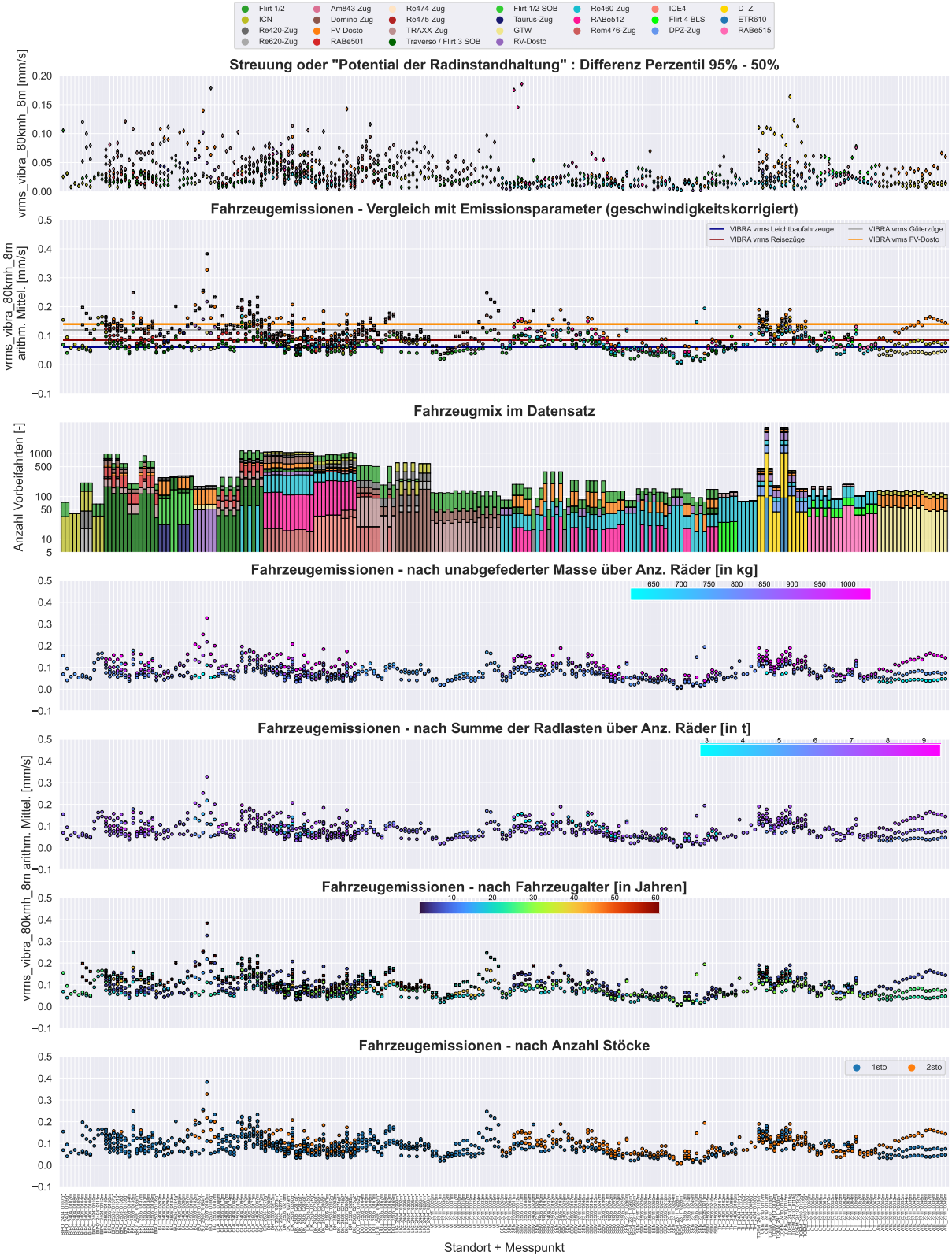


Abbildung 4.16.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte

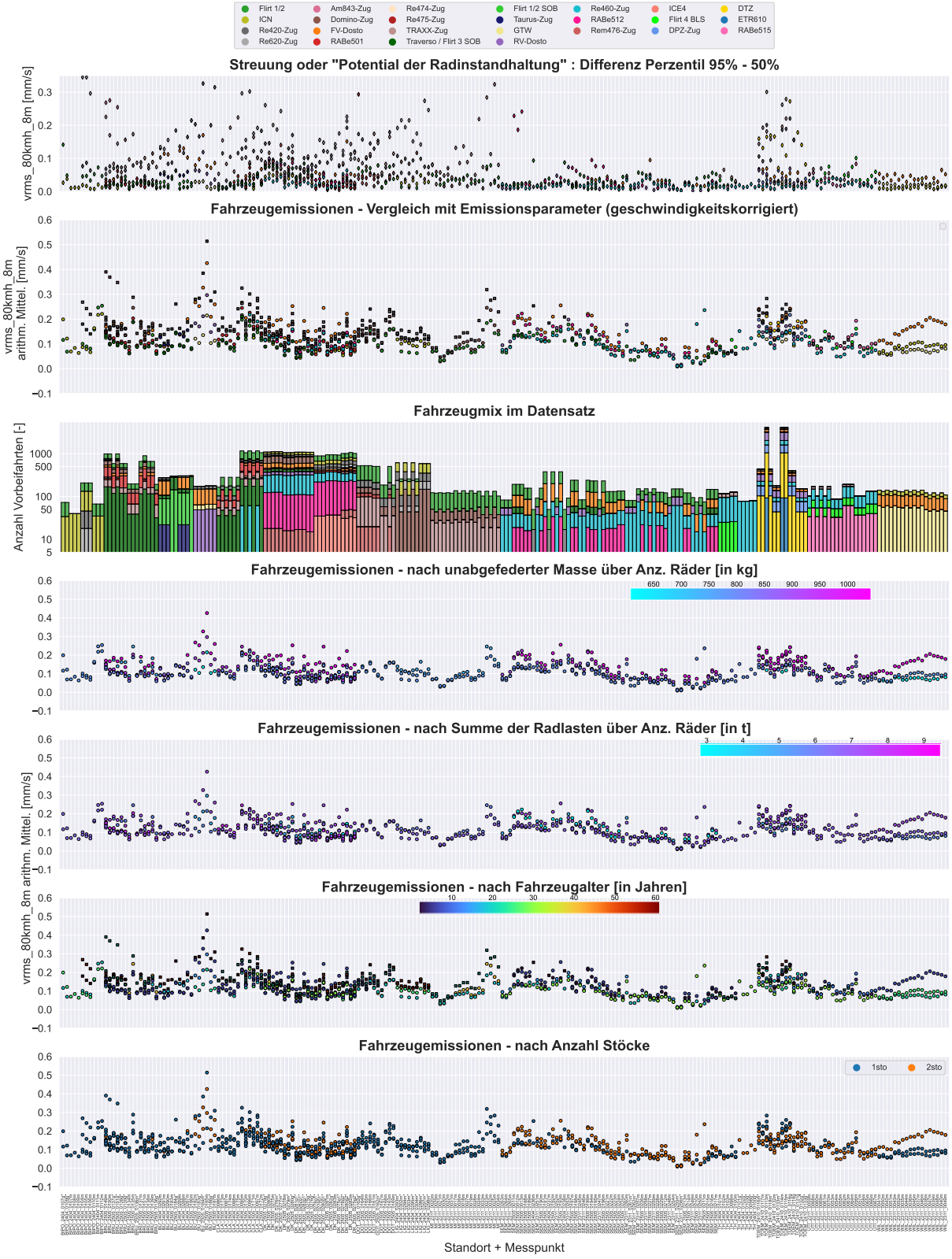


Abbildung 4.17.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms_80kmh_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte

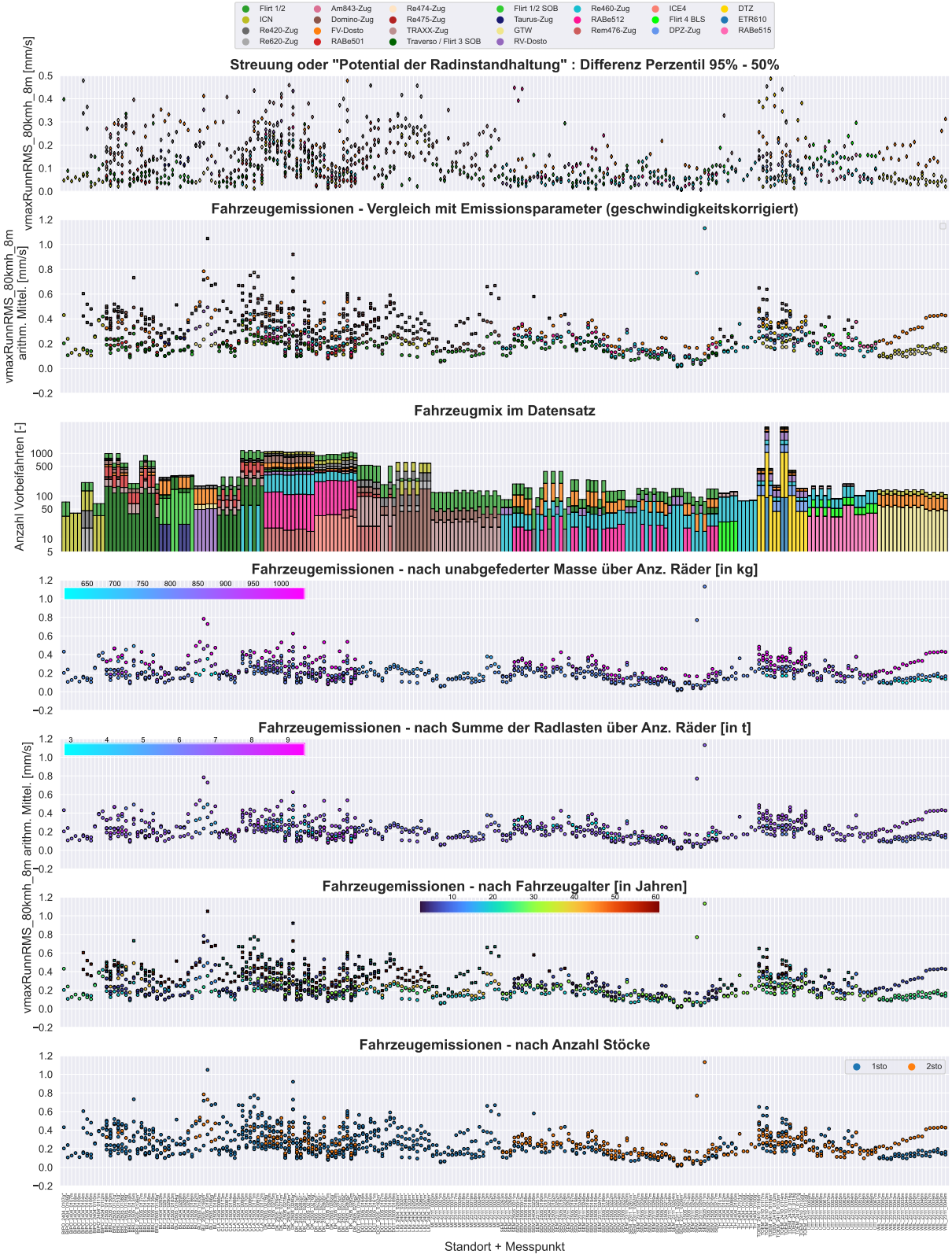


Abbildung 4.18.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vmaxRunnRMS_80kmh_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte

4.7. Standort- und Messpunktunterschiede

In diesem Kapitel wird eine ähnliche Auswertesystematik wie in den Kapiteln 4.6.1 und 4.6.2 angewendet, wobei der Schwerpunkt auf den Unterschieden zwischen den Standorten sowie deren spezifischen Merkmalen und Auffälligkeiten gelegt wird.

Im ersten Subplot gibt die Punktfarbe die Art der Störstelle an. Der zweite Subplot dokumentiert die Anzahl der Vorbeifahrten für jeden Messpunkt im betrachteten Datensatz. Der dritte Subplot umfasst die gleichen Datenpunkte wie der erste, wobei die Punktfarbe die Werte der Gleiseinsenkung in Millimeter darstellt, sofern diese Information für den jeweiligen Standort verfügbar ist. Im vierten wurde ein Merkmal zur Topologie in Gleisquerrichtung der Datenpunkte zugeordnet, im fünften Subplot das Jahr der letzten Oberbauerneuerung, im sechsten den Schwellentypen und im letzten Subplot Informationen zur Zusammensetzung des Untergrunds (Gesteintyp und seine mittlere Rohdichte).

Es wurden nur Messdaten berücksichtigt, die in Entfernungen zwischen 5 und 25 m vom Gleis erfasst wurden. Die Emissionswerte sind sowohl aufgrund vom Abstand und von der Fahrgeschwindigkeit korrigiert. Jeder Punkt ist der Mittelwert für einen Rollmaterialtyp und einen ***MPid*** (d.h. eine Kombination eines Messpunkts + Messgleises). Solche Punkte werden nur dargestellt, wenn der Mittelwert auf mindestens 10 Zugvorbeifahrten basiert. MPids, für welche eine Abstandskorrektur von mehr als 1.5 m vorgenommen wurde, werden auf der x-Achse mit einem „*“-Zeichen markiert.

Abbildungen 4.19, 4.20, 4.21 und 4.22 zeigen die Ergebnisse für Flirts, FV-Dostos, alle Personenzüge respektive alle Güterzüge mit der Metrik ***vrms_vibra***.

Abbildung 4.23 und 4.24 zeigen die Ergebnisse für Traversos und Güterzüge mit der Metrik ***vrms***.

Diese Abbildungen sowie weitere Kombinationen sind im Anhang C.4 im Querformat für eine bessere Lesbarkeit dargestellt.

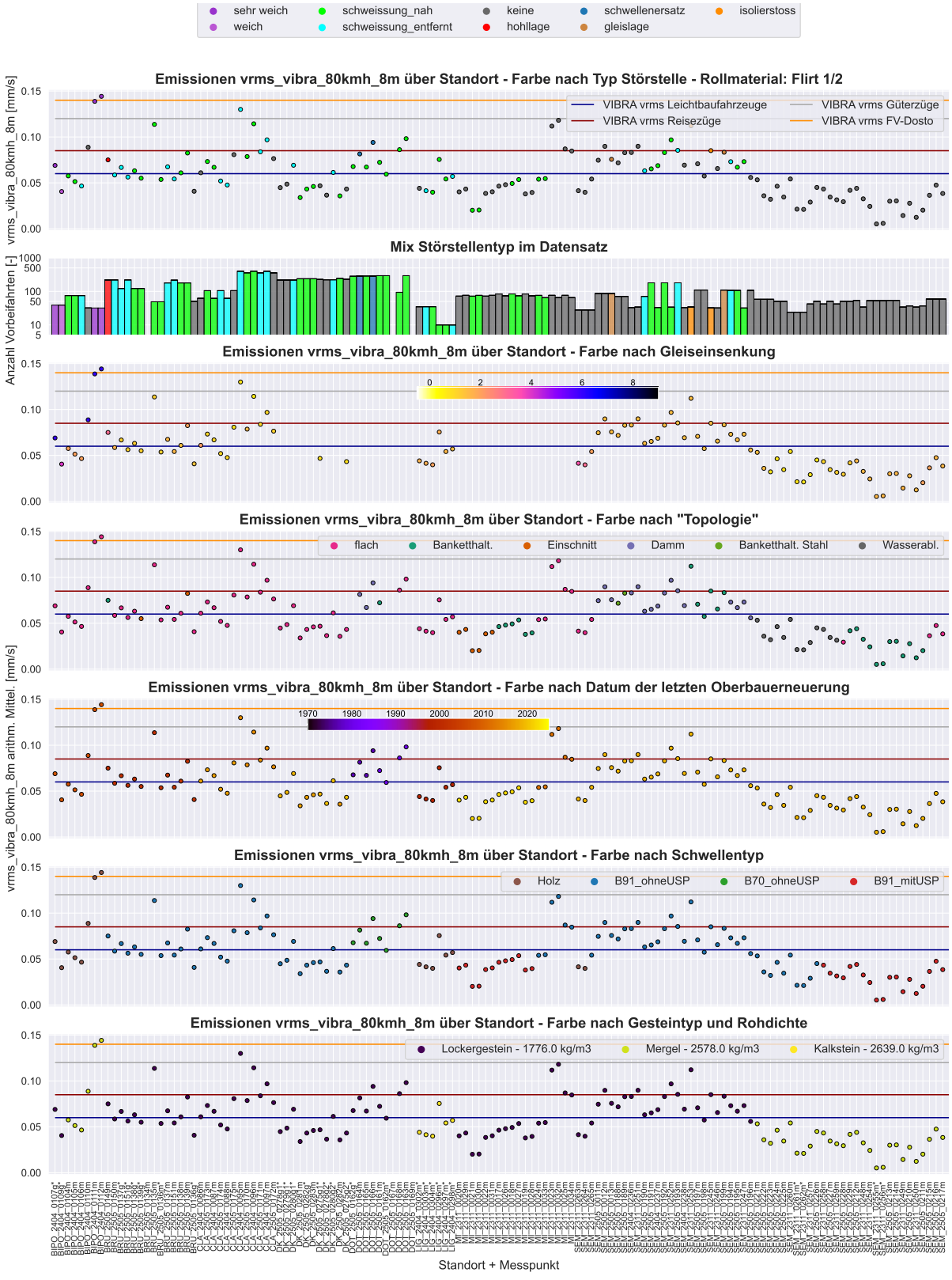


Abbildung 4.19.: Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Flirt 1 / 2 - Farbe nach Standortmerkmale

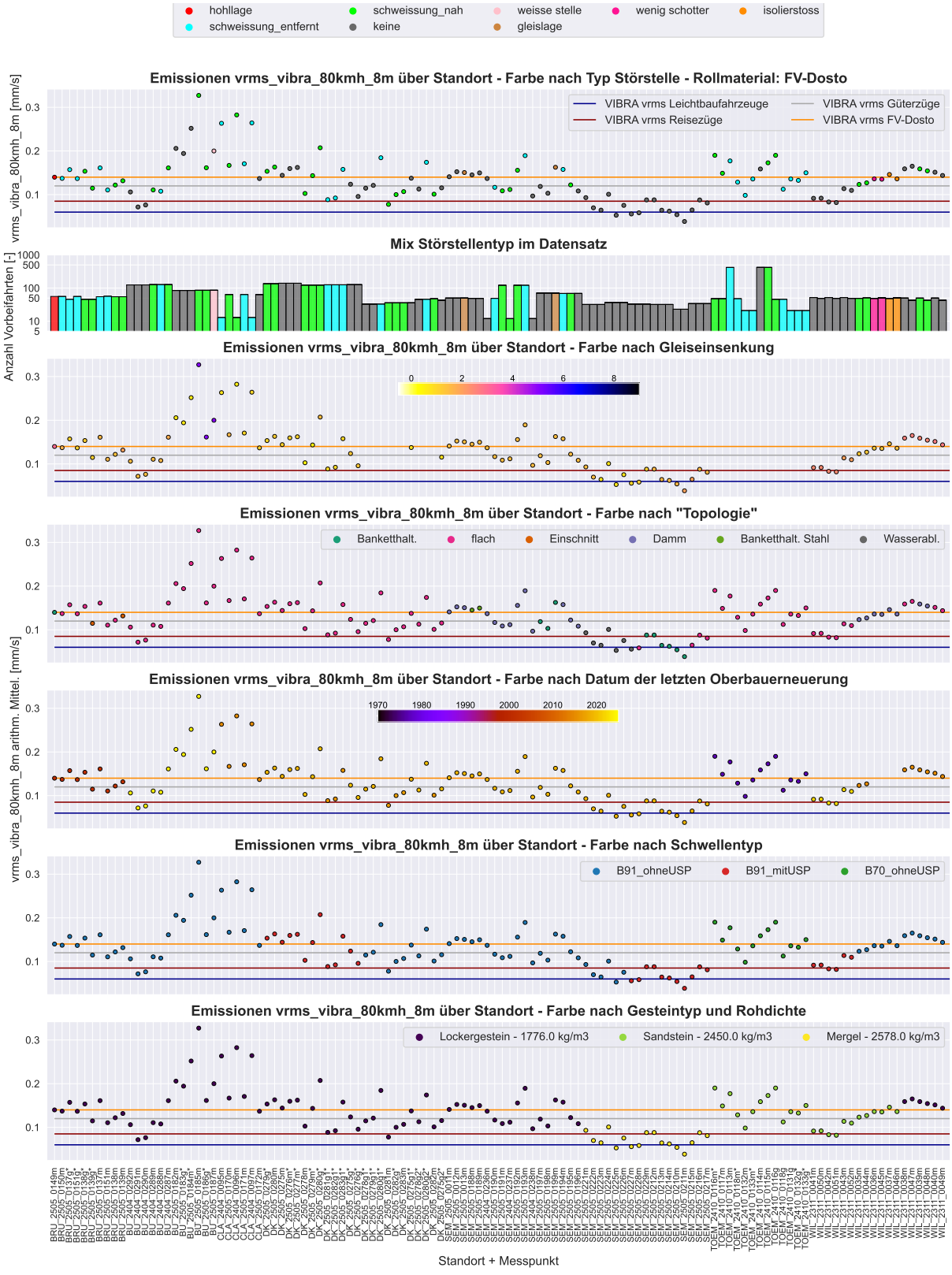


Abbildung 4.20.: Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial FV-Dosto - Farbe nach Standortmerkmale

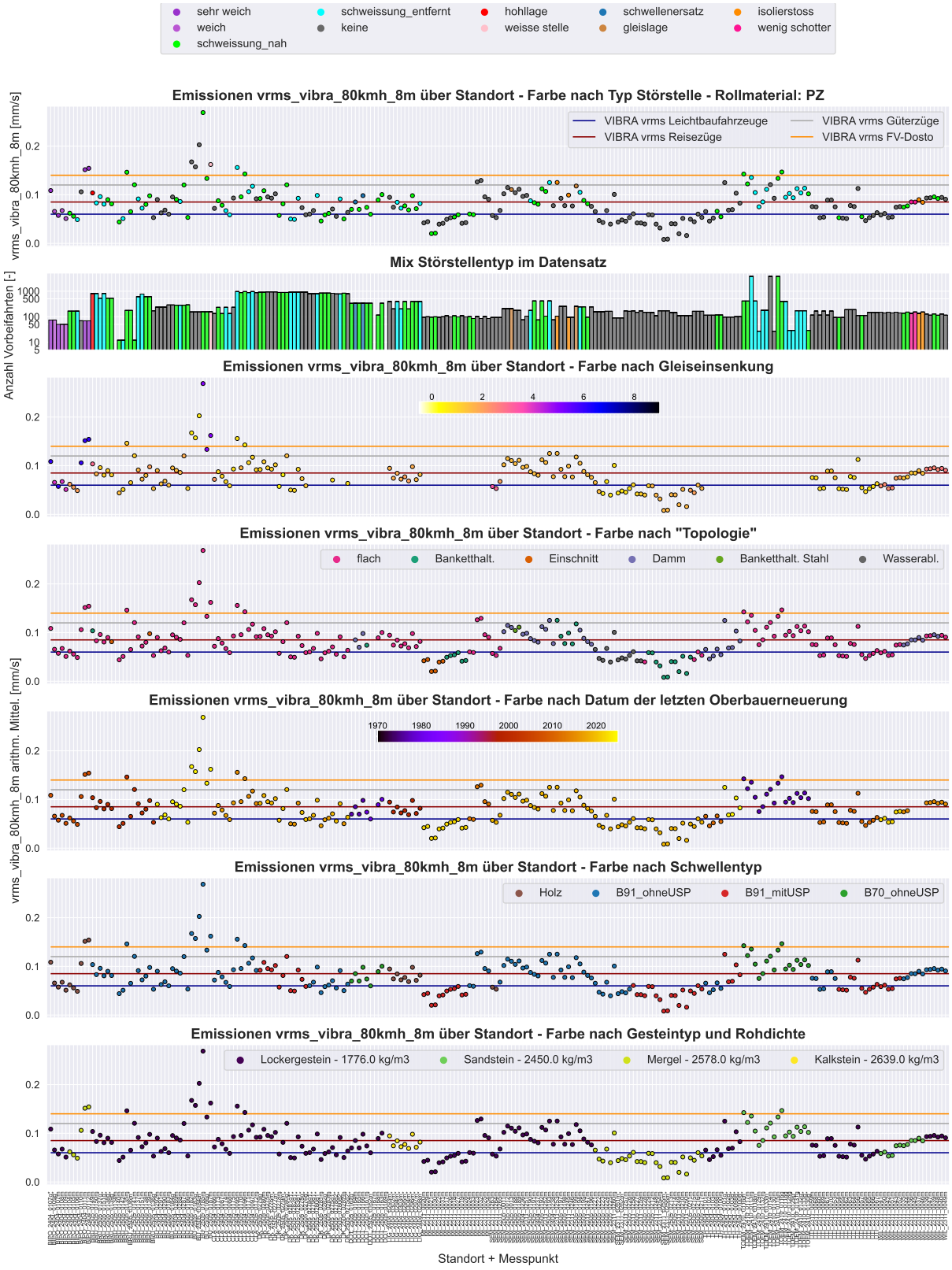


Abbildung 4.21.: Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Personenzüge - Farbe nach Standortmerkmale

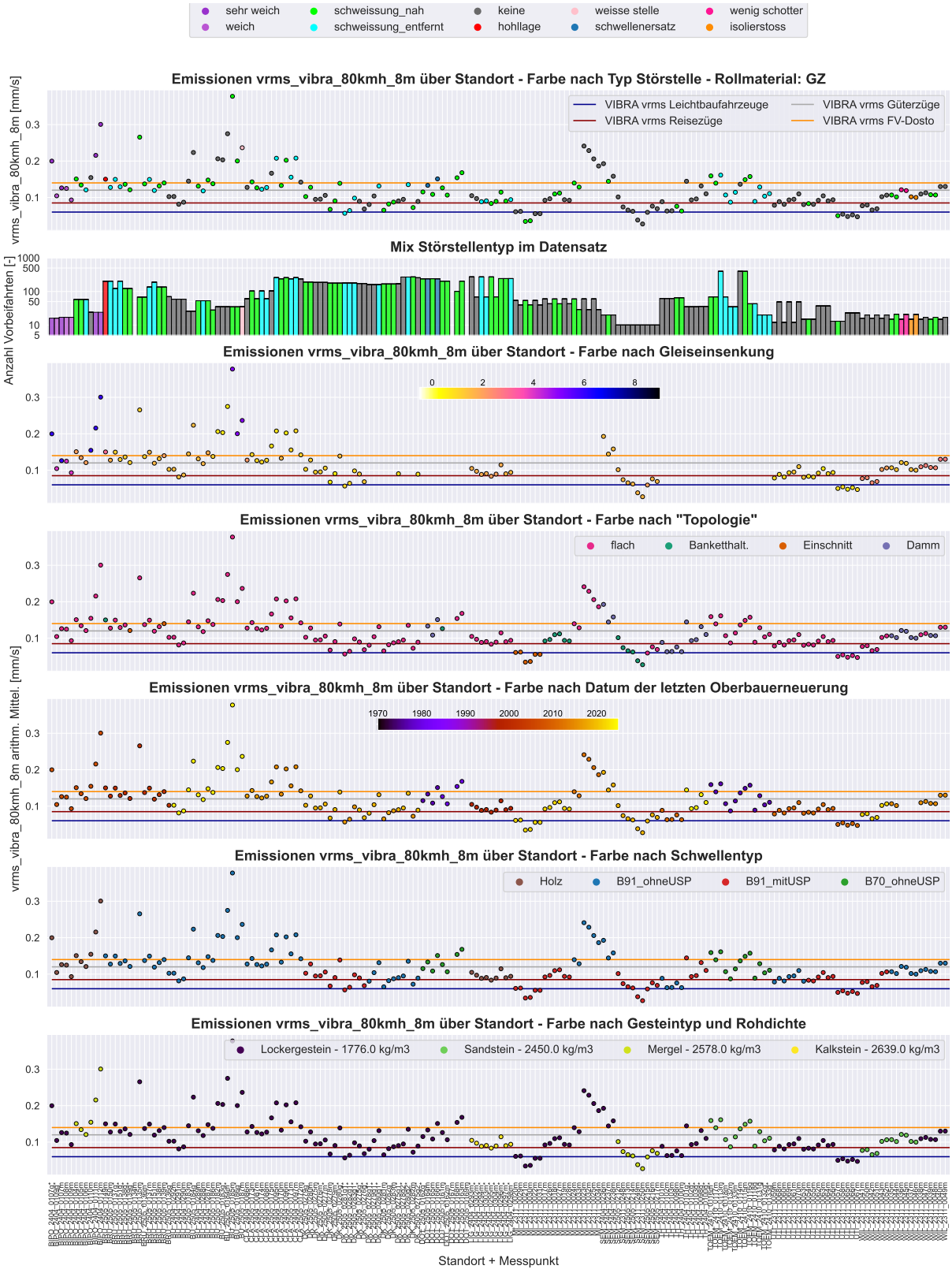


Abbildung 4.22.: Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Güterzüge - Farbe nach Standortmerkmale

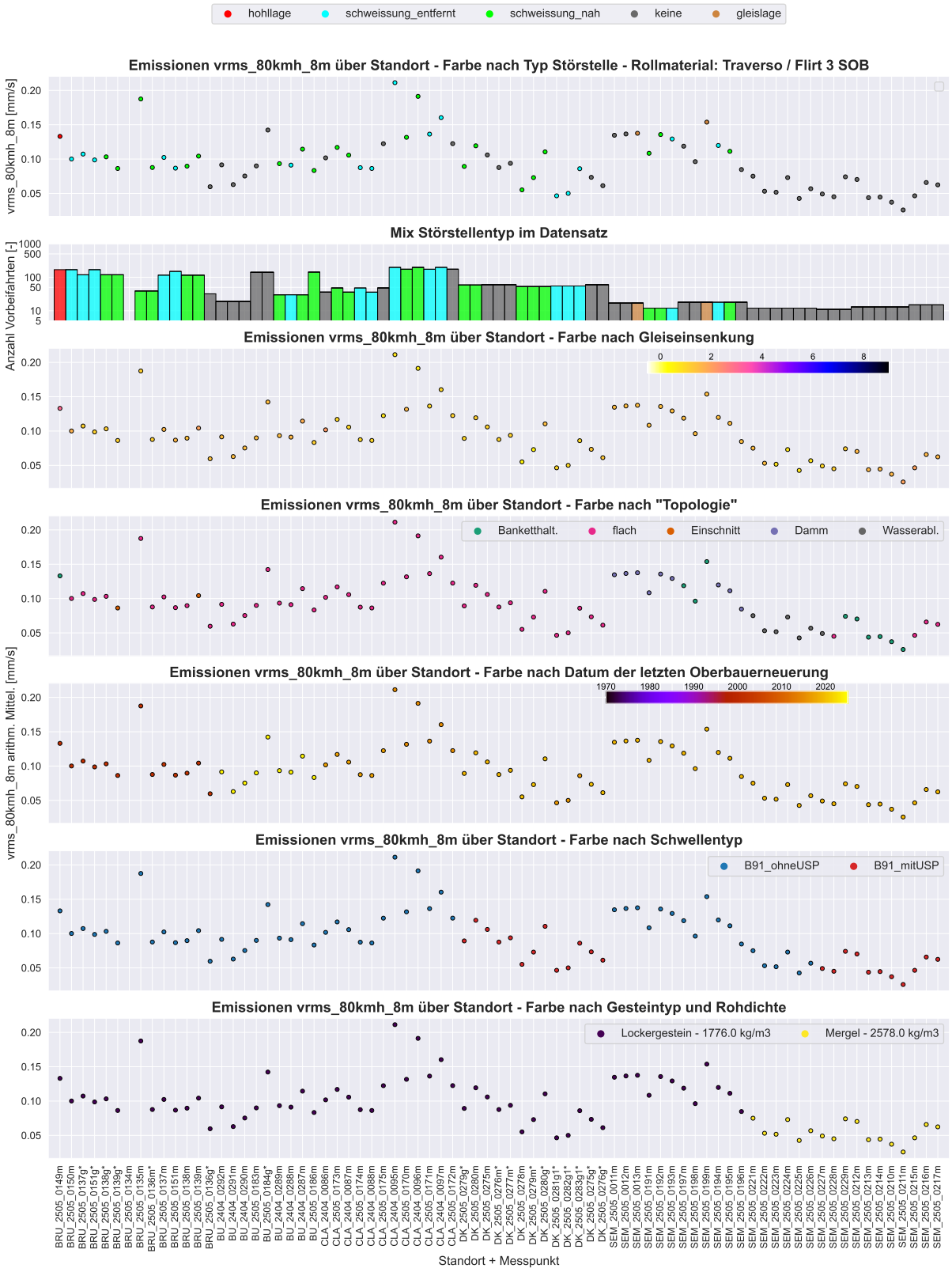


Abbildung 4.23.: Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Traverso - Flirt 3 SOB - Farbe nach Standortmerkmale

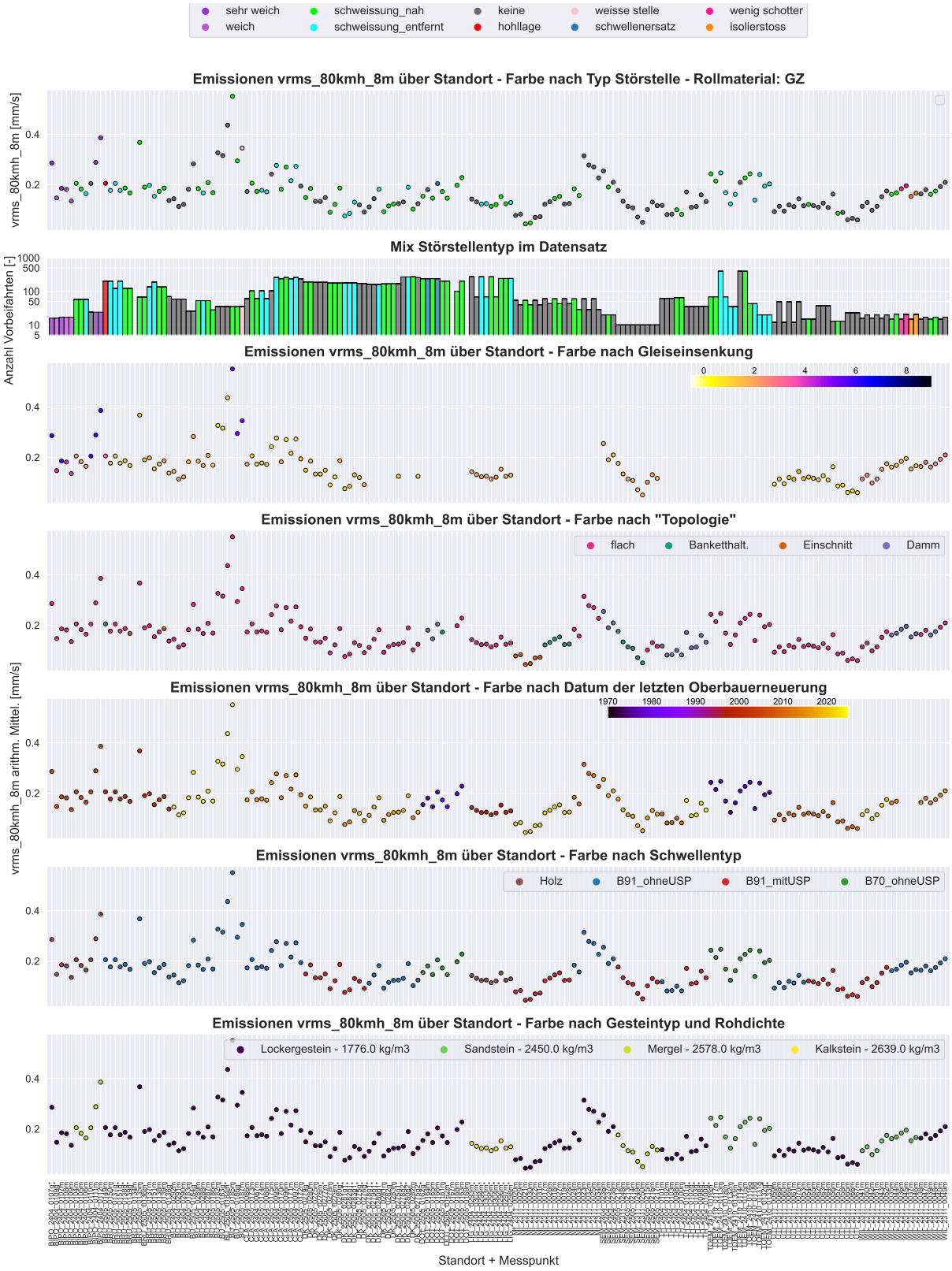


Abbildung 4.24.: Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Güterzüge - Farbe nach Standortmerkmale

Aus diesen Abbildungen geht hervor, dass einige der dokumentierten Störstellen die hohen Fahrzeugemissionen erklären können. Dies gilt insbesondere für sehr weiche Stellen, Isolierstösse, der Messpunkt bei der weissen Schotterstellen sowie Messpunkte mit auffälliger Gleislage. Bei Messpunkten in der Nähe von Schweissungen ist die Korrelation hingegen weniger eindeutig. Dies stimmt auch mit Eindrücken vor Ort überein, dass einige Schweissungen spürbar während andere nicht bemerkbar sind. Viele unauffällige Messpunkte führen zu niedrigen Fahrzeugemissionen, jedoch resultiert nicht jeder unauffällige Standort in niedrigen Werten. Ebenso führt nicht jede dokumentierte Auffälligkeit zu hohen Emissionen. Um tiefergehende Schlüsse zu ziehen, müssten Frequenzanalysen durchgeführt werden.

Zwischen den Standorten sind ebenfalls erhebliche Unterschiede zu verzeichnen: Die Messungen in Buchs SG, Pieterlen, Tössmühle und Sempach im Abschnitt zwischen km 80.2 und 80.4 führen zu den höchsten Werten. In Sempach im Abschnitt zwischen km 80.6 und 80.9 sowie in Muri wurden die tiefsten Werte erfasst.

Der Einfluss der Topologie, des Schwellentyps und der Bodeneigenschaften ist standortübergreifend schwierig zu interpretieren, da die Standorte sich generell um mehr als eine Eigenschaft gleichzeitig unterscheiden. Variationen zwischen unterschiedlichen Messpunkten am gleichen Standorten sind besser identifizierbar: so ist erkennbar, dass an MPids mit steifer Schwellenbesohlung fast immer tiefere Emissionen ermittelt worden sind als MPids ohne Besohlung am gleichen Standort und Gleis (vgl. Wil, Muri, Uttigen und Sempach). Wechsel der Bodeneigenschaften korrelieren ebenfalls oft gut mit Änderungen in den Emissionen (Pieterlen, Wil, Sempach).

In Sempach weisen die wenigen Messpunkte, die mit 16 m - und 24 m - Abstand gemessen wurden (MPids 0261m, 0262m und vor allem 0255m, 0256m), auffällig tiefe Werte aus. Dies sollte detaillierter untersucht werden.

Es ist wichtig zu beachten, dass die hier berücksichtigten Messkampagnen nicht explizit auf die Validierung des VIBRA-1 Modells ausgerichtet waren und bestimmte Auffälligkeiten an den Messpunkten gezielt erfasst wurden, um ihren Einfluss zu untersuchen. Ebenso sind Messpunkte mit lokalen Auffälligkeiten, die mit Gleisinstandhaltung behoben werden können oder Oberbauten kurz vor ihrer Sanierung nur zum Teil repräsentativ, denn die VIBRA-1 Emissions-Parameter sollen einem mittleren Zustand über den Lebenszyklus des Oberbaus entsprechen. Eine gründliche Validierung des Modells würde eine Berücksichtigung dieser Aspekte erfordern.

4.8. Anwendbarkeit der aktuellen VIBRA-1 Emissionsparameter

4.8.1. Gesamtbeurteilung

In diesem Kapitel geht es um eine zusammenfassende Betrachtung der Anwendbarkeit der aktuell definierten VIBRA-1 Emissionsparameter.

Die Ergbnisgrafik 4.25 ist wie folgt aufgebaut:

- Die vier VIBRA-Klassen (Emissionsparameter) werden durch vier unterschiedliche Boxen dargestellt. Die aktuell geltenden Parameterwerte sind mit gestrichelten Linien dargestellt.
- Die Zuordnung der erfassten Züge zu den VIBRA-Klassen erfolgt gemäss [12]
- Die einzelnen Datenpunkte, aus denen die Boxen gebildet werden, sind Medianwerte pro Standort und Rollmaterialtyp. Das heisst zum Beispiel, dass für drei Typen von Reisezügen am Standort Claro jeweils drei Punkte eingezeichnet sind.
- Diese Definition von Datenpunkten hat den Vorteil,
  - dass Rollmaterialtypen, welche an einem Standort nur wenig verkehren gleich gewichtet werden wie ein Rollmaterialtyp der sehr häufig verkehrt, also unabhängig der Anzahl dort erfasster Zugsdurchfahrten. Dies ist nötig, da der Verkehrsmix an den 13 Standorten nicht genügend repräsentativ für die ganze Schweiz ist,
  - sowie unabhängig von der Gesamtanzahl effektiv erfasster Zugsdurchfahrten zu sein (so werden Standorte, wo sehr lange Messreihen erfasst wurden oder dicht befahrene Standorte nicht überrepräsentiert).
- Diese Definition berücksichtigt jedoch nicht, wie häufig bestimmte Rollmaterialtypen im Schweizer Netz insgesamt vertreten sind.
- Messpunkte die näher als 5 m und weiter als 25 m zur Gleisachse liegen, wurden ausgeschlossen. Es wurde auf den Aussschluss von MPids mit starken Auffälligkeiten (e.g. weisse Stelle in Buchs SG, weiche Linse in Pieterlen, Oberbau kurz vor der Erneuerung in Tössmühle) verzichtet, da es sich um eine kleine Menge MPids im Datensatz handelt und eine Mittelung pro Standort vorgenommen wird.

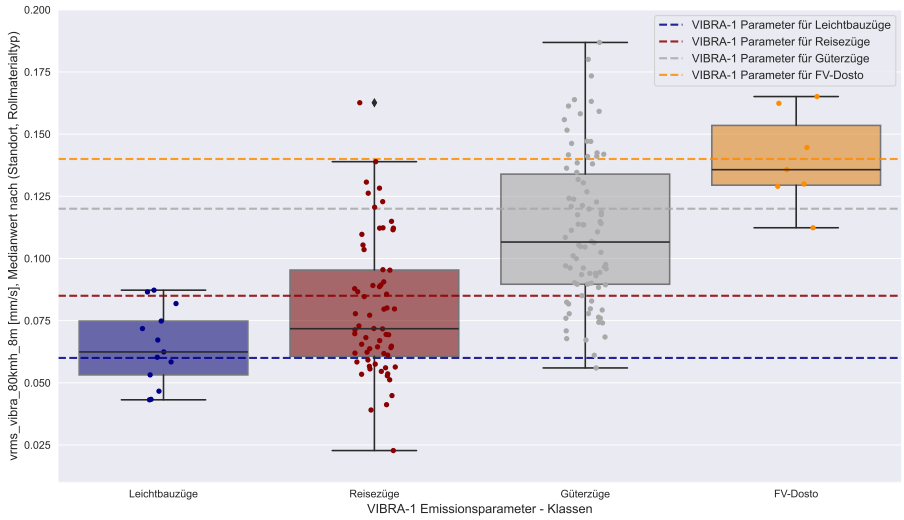


Abbildung 4.25.: Vergleich mit den VIBRA-Emissionsparametern nach VIBRA-1-Klasse - vrms_vibra (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert - Medianwerte nach Standort und Rollmaterialtyp)

Abb. 4.25 zeigt auf Basis von Messreihen an 13 Standorten, dass die derzeit geltenden Emissionsparameter für VIBRA-1 weiterhin repräsentativ für die aktuell eingesetzten Rollmaterialtypen sind. Bei Leichtbauzügen wurden im Median leicht höhere Werte als der aktuell definierte Parameter gemessen, während die drei übrigen VIBRA-Klassen bis zu 15% bessere Werte aufweisen. Der in der Studie [5] definierte Parameter für den FV-Dosto wir an 7 weiteren Standorten bestätigt. Diese Ergebnisse zeigen, dass eine Anpassung der VIBRA-1 Parameter aufgrund des in den letzten Jahren eingeführten Rollmaterials nicht notwendig ist.

4.8.2. Aufschlüsselung nach Rollmaterialtyp

Um dem Schwerpunkt „Rollmaterialunterschiede“ dieses Berichts Rechnung zu tragen, wird die obige Auswertung im Folgenden aufgeschlüsselt und die Ergebnisse für einzelne Rollmaterialtypen dargestellt. Die in Abb. 4.25 gezeigten Boxplots und Datenpunkte werden auf die vier oberen Subplots verteilt, mit je einen Subplot pro VIBRA-Klasse. Die dazugehörigen Rollmaterialtypen sind dort jeweils durch eigene Boxen repräsentiert. Die Repräsentativität der einzelnen Rollmaterialtypen im Datensatz (Anzahl berücksichtigter MPids und Standorte, Anzahl erfasster Durchfahrten) wird in den beiden unteren Subplots dokumentiert.

Aus dieser Abbildung 4.26 ist folgendes ersichtlich:

- Leichtbauzüge:
  - die Flirts 3 TILO weisen höhere Emissionen auf. Diese Beobachtung stützt sich jedoch ausschliesslich auf Messungen am Standort Claro, an dem generell erhöhte Emissionen festgestellt wurden (vgl. Abb. 4.19).
  - Auch die Flirts der 3. Generation der BLS zeigen leicht erhöhte Emissionen gegenüber FLIRT-Typen der 1. und 2. Generation.
  - Die Traversos / Flirt 3 der SOB, ebenfalls der 3. Generation zugehörig, werden bereits in der VIBRA-Klasse „Reisezüge “ geführt.
  - Es wird empfohlen, die „Flirt-Familie“ in Zukunft zu beobachten, insbesondere im Hinblick auf die aktuelle Einführung der 4. Generation.
- Reisezüge:
  - Der Rollmaterialtyp GTW weist vergleichsweise geringe Emissionen auf. Die Auswertung basiert auf Messungen an fünf Standorten und liegt sogar unter dem VIBRA-Parameter „Leichtbauzug “. Daher wird empfohlen, GTWs künftig der VIBRA-Klasse „Leichtbauzug“ zuzuordnen. Die Auswirkung dieser Klassenänderung für den Typen GTW auf Abb. 4.25 und 4.27 ist im Anhang C.5 Abb. C.48 und C.49 dargestellt. Dies führt bei der Klasse „Leichtbauzüge“ zu einem tieferen Medianwert und zu einer noch besseren Übereinstimmung mit dem aktuell definierten Emissionsparameter und bei der Klasse „Reisezüge“ zu einem höheren Medianwert und ebenfalls zu einer besseren Übereinstimmung mit den jetzigen Werten.
  - Der RV-Dosto (RABe 511) zeigt in der Grafik erhöhte Emissionswerte. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Messungen an zwei von vier Standorten (Buchs und Tössmühle) erfolgten, an denen im Datensatz insgesamt die höchsten Emissionsniveaus aufgezeichnet wurden (vgl. Abb. 4.21).
  - Andere Rollmaterialtypen fallen auf diesem Subplot negativ und positiv auf (DPZ-, Taurus-, ICE4-Züge) jedoch ist die jeweilige Datengrundlage zu dünn, um belastbare Aussagen zu treffen.
- Güterzüge:
  - Bei den Güterzügen (durch ihren Lokomotivtypen unterschieden) sind grössere Variationen zu beobachten. An dieser Stelle soll angemerkt werden, dass die Länge des erfassten Zuges eine Rolle spielen kann (vgl. Anhang B.1.1) und dass für die vorliegende Auswertung Lokzüge (d.h. Züge, die ausschliesslich bestehend aus einer Lokomotive und somit sehr kurz sind) eingeschlossen wurden.

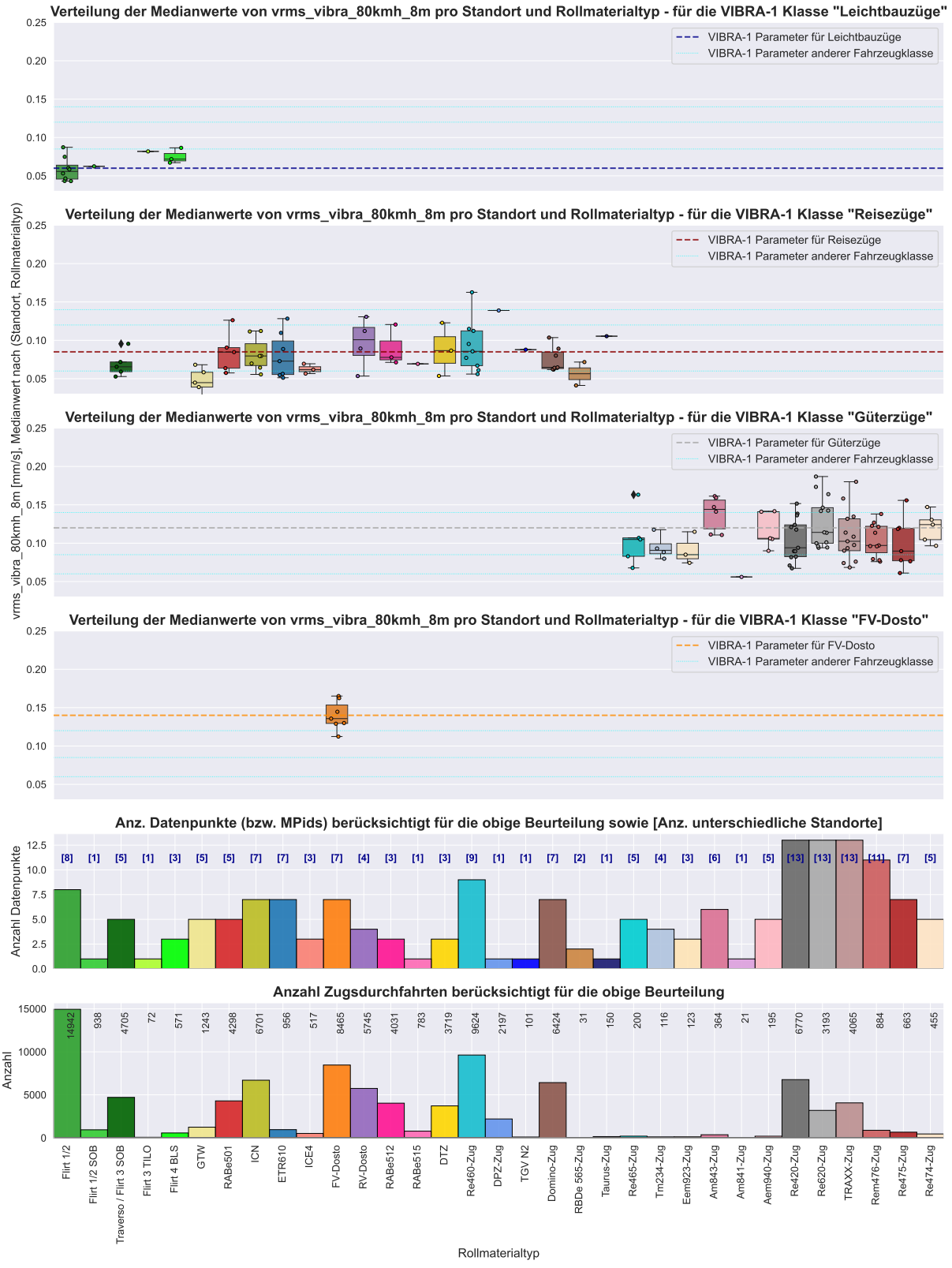


Abbildung 4.26.: Vergleich mit den VIBRA-Emissionsparametern nach Rollmaterialtyp - vrms_vibra (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert - Medianwerte nach Standort und Rollmaterialtyp)

4.8.3. Berücksichtigung der Vertretung der Rollmaterialtypen

Die im Schweizer Netz eingesetzten Rollmaterialtypen sind unterschiedlich stark vertreten: einerseits variiert der Bestand Züge pro Typ stark und anderseits weist ein Rollmaterialtyp je nach Verkehrstyp (S-Bahn, Intercity, Interregio) unterschiedliche Laufleistung auf. Deshalb wurde die Auswertung in Abb. 4.25 wiederholt mit einer Gewichtung der Gesamtlaufleistung des Rollmaterialtyps für das Jahr 2024. Die Information zu den Laufleistungen stammt aus verschiedenen Quellen ([10], [11], [23]) und wurde z.T. anhand von [22] und [10] geschätzt. Ausländische Fahrzeuge sowie Güterzüge mit Lokomotiven, die nicht der ECM SBB-Cargo unterstellt sind, wurden ausgeschlossen.

Abb. 4.27 vergleicht

- den Ansatz aus Kap. 4.8.1 im linken Subplot
- mit dem nach Gesamtlaufleistung gewichteten Datensatz im rechten Subplot. Rollmaterialtypen, wofür keine Information zur Gesamtlaufleistung vorliegt, wurden vernachlässigt.

Diese Grafik zeigt, dass die Gewichtung nach Gesamtlaufleistung die Medianwerte pro VIBRA-Klasse minimal beeinflusst. Auch in diesem Fall bleiben die aktuell definierten VIBRA-1 Parameterwerte anwendbar.

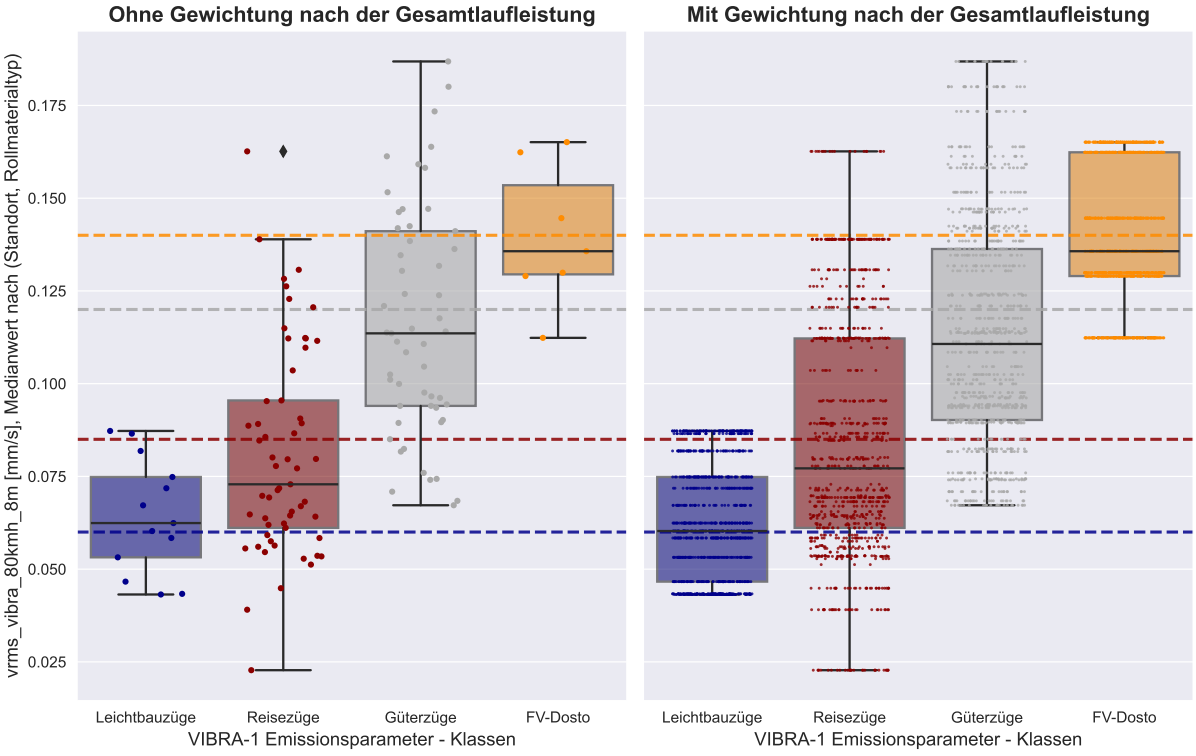


Abbildung 4.27.: Vergleich mit den VIBRA-Emissionsparametern nach VIBRA-1-Klasse - vrms_vibra (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert - Medianwerte nach Standort und Rollmaterialtyp), ohne und mit Gewichtung nach Gesamtlaufleistung des Rollmaterialtyps für das Jahr 2024

5. Diskussion und Fazit

Die umfassenden Messungen und Analysen an 13 Standorten des Schienennetzes haben wertvolle Einblicke in die Erschütterungsemissionen verschiedener Rollmaterialtypen geliefert. Die Analyse von über 100.000 Zeitsignalen hat gezeigt, dass die Emissionen nicht nur von den Eigenschaften des Rollmaterials, sondern auch von standortspezifischen Faktoren beeinflusst werden. Während einige Kombinationen von Rollmaterialtypen und Messpunkten gut mit den bestehenden VIBRA-1 Emissionsparametern übereinstimmen, sind bei anderen deutliche Abweichungen zu beobachten. Es sind sowohl Rollmaterialtypen betroffen, die zwischen 2005 und 2014 (Datengrundlage der letzten VIBRA-1 Validierung) schon im Verkehr waren, als auch Fahrzeuge, die später in Betrieb genommen wurden. Die grosse Streuung zwischen den Standorten deutet darauf hin, dass die Emissionsparameter basierend auf möglichst vielen unterschiedlichen Standorten abgesichert werden sollten.

Die Studie bestätigt zudem die Angemessenheit eines linearen Zusammenhangs zwischen Schwinggeschwindigkeit und Fahrgeschwindigkeit im VIBRA-1-Modell und weist ähnliche Abminderungsfaktoren mit dem Abstand zum Gleis wie der bestehende Parametersatz auf. Die Abstandskorrektur scheint dennoch nicht bei jeder Messposition zu überzeugenden Ergebnissen zu führen.

Darüber hinaus wird die Korrelation zwischen der unabgefederten Radsatzmasse und den Fahrzeugemissionen erneut aufgezeigt, während bestätigt wird, dass Achslasten nur wenig mit den Erschütterungsemissionen korrelieren. Die Untersuchung der Standort- und Messpunktunterschiede zeigt erhebliche Variationen in den Fahrzeugemissionen zwischen den untersuchten Standorten. Bestimmte Störstellen, wie sehr weiche Stellen und Isolierstösse tragen zu hohen Emissionen bei, während die Korrelation zwischen Erschütterungen und dem Vorhandensein von Schweissungen in der Nähe des Messpunkts nur schwach ausgeprägt ist. Frequenzanalysen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt wurden, könnten detailliertere Erklärungen zu diesen Beobachtungen und den involvierten Mechanismen liefern.

Weiterhin wurde anhand der Medianwerte der Emissionen für jeden Standort und dessen Rollmaterialtypen gezeigt, dass die vier Emissionsparameter, wie sie aktuell in VIBRA-1 definiert sind, weiterhin für das heute verkehrende Rollmaterial gültig sind. Des Weiteren wird empfohlen, die Fahrzeuge des Typs GTW zukünftig als „Leichtbauzug “ zu betrachten. Für die Begründung der weiteren auffälligen Emissionswerte müsste die Datengrundlage für die betroffenen Rollmaterialtypen (vor allem die Anzahl Standorte, wo sie gemessen werden) verbessert werden. Diese Studie hatte nicht den Anspruch, eine vollständige Validierung des VIBRA-1-Modells zu realisieren: dafür wären ergänzende Untersuchungen zur Transmission und Immission auf der Decke erforderlich.

Diese Arbeit war ebenfalls die Gelegenheit, sich mit den Emissions- und Immissionsmetriken auseinanderzusetzen. Die in VIBRA-1 angewendete Definition vom RMS-Wert mit einer Vor- und Nachlaufzeit aufgrund der vor- und nachgelagerten Wahrnehmbarkeit erscheint einerseits begründet, ist jedoch weder Stand der Technik noch zweckmässig für reine Untersuchen zu Emissionen und Rollmaterialeinflüssen. Da Erschütterungen in der Praxis bei Infrastrukturprojekten am Immissionsort zu bewerten sind, in der Schweiz basierend auf Maximalwerte von gleitenden RMS-Zugvorbeifahrtsignalen, ist es sinnvoll bei zukünftigen Analysen nicht nur Effektivwerten zu betrachten, sondern auch Maximalwerte von gleitenden RMS-Signalen.

ALLIANZ FAHRWEG

Literatur

[1] BAFU BAV. *Checkliste Umwelt für Eisenbahnanlagen*. 2022 (siehe S. 8).

[2] BAFU BAV. *Weisung für die Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienenverkehrsanlagen (BEKS)*. 1999 (siehe S. 8).

[3] Marcel Birchmeier. *FV Dosto - Detailauswertung der Langzeitmessung in Pully-Nord, Bericht 3127-01 - Zwischenbericht*. Feb. 2023 (siehe S. 22).

[4] Marcel Birchmeier. *Transferfaktoren und Transferspektren für die VIBRA-Modelle (Auswertung der Daten 2001 bis 2014) - Bericht 2434-2*. 2015 (siehe S. 10, 11, 23, 64).

[5] Marcel Birchmeier. *Überprüfung Parameter VIBRA-1 für FV-Dosto, Bericht 3278-01*. Mai 2021 (siehe S. 11, 47).

[6] Yves Brechbühl. *Memo - Parameterwerte Parametersatz SBB 2017_2023_inklWAKO_bibl.accdb (aktualisiert mit provisorischen Werten für WAKO, 18.04.2023)*. Apr. 2023 (siehe S. 11).

[7] Laurence Conreaux. *Erschütterungen - Quantifizierung der Beiträge der Fahrzeuge und der Infrastruktur - Erste Untersuchungen, Allianz Fahrweg Normalspur, Bern*. 2024. URL: https://allianz-fahrweg.ch/wp-content/uploads/2024/04/PRJ-100-032-201-EKS-Gleis_Summary.pdf (besucht am 29. 07. 2025) (siehe S. 22).

[8] Laurence Conreaux, Roger Müller und Urs Schönholzer. *Stand der Technik zu Erschütterungen und Körperschall auf dem Schweizer Normalspur-Eisenbahnnetz*. 2023. ISBN: 978-3-907456-00-2 (siehe S. 8).

[9] Ziegler Consultants. *Handbuch zum Programm VIBRA-1, Version 4.3*. Jan. 2010 (siehe S. 12).

[10] MP-FV-ROE-LCM2. *Informationen zu den konsolidierte Laufleistungen und Fahrzeugmengen ausgewählter SBB-P Fahrzeuge (intern)*. Okt. 2025 (siehe S. 50).

[11] G-AM-SEN-LOK. *Email (intern) - Angaben zur Laufleistung der SBB-Cargo Lokomotiven*. Okt. 2025 (siehe S. 50).

[12] SBB I-AEP-ENG-UMW-RME. *SBB internes Exceltool - Zuordnung der eff. Züge zu einheitliche Zugskategorien (Email M. Müller 29.10.2025)*. Okt. 2025 (siehe S. 11, 46).

[13] *ISO 14837-1:2005 Mechanical vibration - Ground-borne noise and vibration arising from rail systems - Part 1: general guidance*. 2005 (siehe S. 8, 11).

[14] *Kartenviewer map.geo.admin.ch*. URL: https://map.geo.admin.ch/ (besucht am 12. 08. 2025) (siehe S. 14).

[15] Karl Knothe. *Gleisdynamik*. Jan. 2001 (siehe S. 8).

[16] R. Müller u. a. *RIVAS D2.9 - Validation of wheel maintenance measures on the rolling stock for reduced excitation of ground vibration*. Dez. 2013 (siehe S. 64).

[17] Jens Nielsen u. a. *RIVAS D5.2 - Train Induced Ground Vibration – characterization of vehicle parameters from test data and simulations*. Aug. 2012 (siehe S. 8).

[18] *Railway Field Laboratory*. URL: https://www.fahrbahnlabor.ch (besucht am 20. 06. 2025) (siehe S. 12, 61).

[19] *RENVIBII - Phase 3 - Measurement Protocol Vibration and Ground Borne Noise (Task B)*. Mai 2003 (siehe S. 64).

[20] *Schwingungsmessung an Schienenverkehrswegen – Teil 2: Auswerteverfahren*. Nov. 2021 (siehe S. 64).

[21] Dorothée Stiebel. *RIVAS D1.2 - Protocol for free field measurements of mitigation effects in the Project RIVAS for WP 2, 3, 4, 5*. Okt. 2011 (siehe S. 8, 11, 12, 61, 64).

[22] Schweizerische Südostbahn. *Geschäftsbericht 2024*. 2025. URL: https://www.sob.ch/die-sob/ueber-uns/geschaeftsberichte (besucht am 03. 12. 2025) (siehe S. 50).

[23] PP-UHR-SAN-OT-TERI. *Email (intern) - Angaben zur Laufleistung der GTW Thurbo*. Okt. 2025 (siehe S. 50).

[24] Bundesamt für Verkehr. *Basispreis Verschleiss im Trassenpreis - Anleitung für die Fahrzeugpreisbestimmung*. März 2022 (siehe S. 26).

[25] M. Villot und S. Bailhache. *RIVAS D1.9 - Evaluating the mitigation measures developed in WP2-5 in terms of decrease of exposure and annoyance*. Nov. 2013 (siehe S. 64).

[26] Armin Ziegler. *VIBRA-1-2-3: Erschütterungs- und Körperschallprognose bei Eisenbahnlinien*. URL: https://zcag.ch/wp-content/uploads/2022/02/2002-02-ziegler.pdf (besucht am 20. 06. 2025) (siehe S. 10).

ALLIANZ FAHRWEG

Abbildungsverzeichnis

2.1. Schematische Darstellung des Abminderungsverhaltens von Erschütterungen 9

3.1. Verwendete Messequipment und Erdspiess 12

4.1. Erschütterungsemissionen vom DTZ Nr. 514021 innerhalb von 12 Tagen in Tössmühle - v = 122 - 126 km/h 15
4.2. Vergleich nach Kompositionsnummer der Erschütterungsemissionen von DTZ-Zügen innerhalb 16 Tage in Tössmühle - v = 122 - 126 km/h 16
4.3. Beschreibung des Datensatzes 17
4.4. Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms_vibra***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte 19
4.5. Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte 20
4.6. Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vmax_runnRMS***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte 21
4.7. Abminderung der Fahrzeugemissionenen (Metrik: ***vrms_vibra***, fahrgeschwindigkeitskorrigiert auf 80 km/h und Mittelwert je Messpunkt) nach Rollmaterialtypen. 24
4.8. Abminderung der Fahrzeugemissionenen (Metrik: ***vrms***, fahrgeschwindigkeitskorrigiert auf 80 km/h und Mittelwert je Messpunkt) nach Rollmaterialtypen. 24
4.9. Abminderung der Fahrzeugemissionenen (Metrik: ***vmax_runnRMS***, fahrgeschwindigkeitskorrigiert auf 80 km/h und Mittelwert je Messpunkt) nach Rollmaterialtypen. 25
4.10. Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms_vibra_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte 27
4.11. Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte 28
4.12. Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vmaxRunnRMS_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte 29
4.13. Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms_vibra_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte 31
4.14. Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte 32
4.15. Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vmaxRunnRMS_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte 33
4.16. Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte 35
4.17. Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms_80kmh_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte 36
4.18. Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vmaxRunnRMS_80kmh_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte 37
4.19. Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Flirt 1 / 2 - Farbe nach Standortmerkmale 39

4.20. Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial FV-Dosto - Farbe nach Standortmerkmale . . . 40
4.21. Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Personenzüge - Farbe nach Standortmerkmale . . . 41
4.22. Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Güterzüge - Farbe nach Standortmerkmale . . . 42
4.23. Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Traverso - Flirt 3 SOB - Farbe nach Standortmerkmale . . . 43
4.24. Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Güterzüge - Farbe nach Standortmerkmale . . . 44
4.25. Vergleich mit den VIBRA-Emissionsparametern nach VIBRA-1-Klasse - vrms_vibra (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert - Medianwerte nach Standort und Rollmaterialtyp) . . . 47
4.26. Vergleich mit den VIBRA-Emissionsparametern nach Rollmaterialtyp - vrms_vibra (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert - Medianwerte nach Standort und Rollmaterialtyp) . . . 49
4.27. Vergleich mit den VIBRA-Emissionsparametern nach VIBRA-1-Klasse - vrms_vibra (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert - Medianwerte nach Standort und Rollmaterialtyp), ohne und mit Gewichtung nach Gesamtlaufleistung des Rollmaterialtyps für das Jahr 2024 . . . 50

B.1. Vergleich der Fahrzeugemissionen ***vrms*** und ***vrms_vibra*** - alle Standorte, alle Rollmaterialtypen mit Zuglänge kleiner 600m . . . 62
B.2. Vergleich der Fahrzeugemissionen ***vrms*** und ***vrms_vibra*** - alle Standorte, Flirts und RV-Dosto 63

C.1. Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms_ES***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte . . . 66
C.2. Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms_KS***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte . . . 67
C.3. Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vmax***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte . . . 68
C.4. Abminderung der Fahrzeugemissionenen (Metrik: ***vrms_ES***, fahrgeschwindigkeitskorrigiert auf 80 km/h und Mittelwert je Messpunkt) nach Rollmaterialtypen. . . . 69
C.5. Abminderung der Fahrzeugemissionenen (Metrik: ***vrms_KS***, fahrgeschwindigkeitskorrigiert auf 80 km/h und Mittelwert je Messpunkt) nach Rollmaterialtypen. . . . 69
C.6. Abminderung der Fahrzeugemissionenen (Metrik: ***vmax***, fahrgeschwindigkeitskorrigiert auf 80 km/h und Mittelwert je Messpunkt) nach Rollmaterialtypen. . . . 70
C.7. Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrunnRMS_25m_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte . . . 72
C.8. Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vmax_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte . . . 73
C.9. Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms_vibra_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte . . . 75
C.10. Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte . . . 76
C.11. Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vmaxRunnRMS_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte . . . 77

C.12.Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrunnRMS_25m_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte . . . 78
C.13.Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vmax_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte . . . 79
C.14.Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrunnRMS_25m_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte . . . 81
C.15.Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vmax_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte . . . 82
C.16.Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms_ES_80kmh_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte . . . 84
C.17.Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms_KS_80kmh_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte . . . 85
C.18.Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vmax_80kmh_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte . . . 86
C.19.Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrunnRMS_25m_80kmh_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte . . . 87
C.20.Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial FV-Dosto - Farbe nach Standortmerkmale . . . 89
C.21.Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Flirt 1-2 - Farbe nach Standortmerkmale . . . 90
C.22.Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial RV-Dosto - Farbe nach Standortmerkmale . . . 91
C.23.Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Traverso - Flirt 3 SOB - Farbe nach Standortmerkmale . . . 92
C.24.Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial ICN - Farbe nach Standortmerkmale . . . 93
C.25.Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Re420-Zug - Farbe nach Standortmerkmale . . . 94
C.26.Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Re460-Zug - Farbe nach Standortmerkmale . . . 95
C.27.Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial ETR610 - Farbe nach Standortmerkmale . . . 96
C.28.Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m***(geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial RABe501 - Farbe nach Standortmerkmale . . . 97
C.29.Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial FV-Dosto - Farbe nach Standortmerkmale . . . 99
C.30.Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Flirt 1-2 - Farbe nach Standortmerkmale . . . 100

C.31. Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial RV-Dosto - Farbe nach Standortmerkmale . . . 101
C.32. Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Traverso - Flirt 3 SOB - Farbe nach Standortmerkmale . . . 102
C.33. Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial ICN - Farbe nach Standortmerkmale 103
C.34. Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Re420-Zug - Farbe nach Standortmerkmale . . . 104
C.35. Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Re460-Zug - Farbe nach Standortmerkmale . . . 105
C.36. Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial ETR610 - Farbe nach Standortmerkmale . . . 106
C.37. Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial RABe501 - Farbe nach Standortmerkmale . . . 107
C.38. Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Güterzüge - Farbe nach Standortmerkmale . . . 108
C.39. Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Personenzüge - Farbe nach Standortmerkmale . . . 109
C.40. Fahrzeugemissionen für Parameter: vrms_ES_80kmh_8m (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Güterzüge - Farbe nach Standortmerkmale . . . 111
C.41. Fahrzeugemissionen für Parameter: vrms_ES_80kmh_8m (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Personenzüge - Farbe nach Standortmerkmale . . . 112
C.42. Fahrzeugemissionen für Parameter: vrms_KS_80kmh_8m (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Güterzüge - Farbe nach Standortmerkmale . . . 114
C.43. Fahrzeugemissionen für Parameter: vrms_KS_80kmh_8m (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Personenzüge - Farbe nach Standortmerkmale . . . 115
C.44. Fahrzeugemissionen für Parameter: vmaxRunnRMS_80kmh_8m (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Güterzüge - Farbe nach Standortmerkmale . . . 117
C.45. Fahrzeugemissionen für Parameter: vmaxRunnRMS_80kmh_8m (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Personenzüge - Farbe nach Standortmerkmale . . . 118
C.46. Fahrzeugemissionen für Parameter: vmax_80kmh_8m (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Güterzüge - Farbe nach Standortmerkmale . . . 120
C.47. Fahrzeugemissionen für Parameter: vmax_80kmh_8m (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Personenzüge - Farbe nach Standortmerkmale . . . 121

C.48. Vergleich mit den VIBRA-Emissionsparametern nach VIBRA-1-Klasse - vrms_vibra (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert - Medianwerte nach Standort und Rollmaterialtyp) - GTW als Leichtbauzug 122
C.49. Vergleich mit den VIBRA-Emissionsparametern nach VIBRA-1-Klasse - vrms_vibra (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert - Medianwerte nach Standort und Rollmaterialtyp), ohne und mit Gewichtung nach Gesamtlaufleistung des Rollmaterialtyps für das Jahr 2024 - GTW als Leichtbauzug 123

Anhang

Anhang A.

Unterschiede zur Publikation für das Ziegler Symposium

Eine erste Version der vorliegenden Untersuchung wurde beim 26. Symposium Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen am 27. Juni 2025 organisiert durch die Firma Ziegler Consultants in einer gekürzten Form vorgestellt. Im vorliegenden Dokument sind vertiefte Analysen, Ergänzungen, Verbesserungen und einzelne Korrekturen vorgenommen worden:

- Untersuchung der Korrektur des Gleisabstands, wie in VIBRA-1 realisiert (siehe Kap. 4.5)
- Berücksichtigung dieser Abstandskorrektur in den Analysen (anstatt Berücksichtigung von Messpunkten mit Gleisabstände um 8 m).
- Berücksichtigung von Messpunkten auf dem Gegengleis (mehrheitlich abweichend von den 8 m-Gleisabstand). bzw. Berücksichtigung von allen MPids mit Gleisabstand zwischen 5 und 25m.
- Berücksichtigung des viergleisigen Messstandorts Däniken.
  $\Rightarrow$ Die vier vorherigen Aufzählpunkte führen dazu, dass der Datensatz für die vorliegende Version des Berichts von ca. 50000 auf 100000 Datenpunkte erhöht wurde.
- Berücksichtigung und Darstellung vom provisorischen FV-Dosto Emissionsparameter in VIBRA-1.
- Ergänzung der Rollmaterialmerkmale mit den Radlasten im Kapitel zu den Rollmaterialunterschieden (Kap. 4.6)
- Verbesserung und Ergänzungen der Fahrbahn- und Bodenmerkmale bei der Analyse zu Standortunterschieden in Kap. 4.7. Insbesondere: Topologie/Querschnitt, Schwellentyp, Gesteinstyp und Rohdichte des Bodens, Datum der letzten Oberbauerneuerung.
- Die Nummerierungssystematik der Messpunkte (***MPids***) wurde vollständig geändert (und kann nicht mehr verglichen werden).
- Vollständigere Dokumentation von Varianten der Ergebnisabbildungen (zusätzliche Rollmaterialtypen und Erschütterungsmetriken) im Anhang.
- Dokumentation von spezifischen Beobachtungen an Messpunkten und Standorten im Kapitel **??** im Anhang, die den Rahmen der Analyse zu den VIBRA-1 Emissionsparametern überschreiten.
- Hinterfragung der Definition der Metrik ***vrms_vibra***, Vergleich mit der konventionellen Definition von ***vrms*** sowie Überlegungen für zukünftigen Arbeiten (siehe Anhang B).
- Konkretere Analyse und Aussage zur Anwendbarkeit der aktuellen VIBRA-1 Parameter im Kapitel 4.8.

Anhang B.

Methodik

B.1. Überlegungen zu Fahrzeugsemissionsmetriken

Wie in Kapitel 3.3 erwähnt, wird in VIBRA-1 für die Fahrzeugemissionen der Parameter ***vrms_vibra*** verwendet. Dabei handelt sich um den „Root-Mean-Square"-Wert (RMS) der Schwinggeschwindigkeit (ohne Frequenzfilterung) einer Zugdurchfahrt wobei die Mittelung über die effektive Vorbeifahrtszeit des Zuges plus ca. 5s insgesamt für die Vor- und Nachlaufzeit erfolgt.

Üblicherweise wird ***vrms*** als RMS-Wert der Schwinggeschwindigkeit (ohne Frequenzfilterung) einer Zugdurchfahrt betrachtet, gemittelt über die Vorbeifahrtszeit der effektiven Zuglänge (oder geometrischen Vorbeifahrt, über die Länge über Puffer) wie es beispielsweise in [21] oder in der Fahrbahnlabordatenbank [18] zur Anwendung kommt.

Für einen Vergleich der Fahrzeugemissionen ist die Auswahl der Metrik von Bedeutung. Dies wird im nächsten Kapitel B.1.1 nochmals graphisch erläutert.

B.1.1. Veranschaulichung anhand von Messdaten

Im ersten Subplot der Abbildung B.1 ist ***vrms_vibra*** auf der vertikalen Achse und ***vrms*** auf der horizontalen Achse gegenübergestellt. Jeder Datenpunkt stellt eine Zugsvorbeifahrt dar. Die Datenpunkte sind entsprechend der Zuglänge der gemessenen Zugskomposition eingefärbt. Der zweite Subplot zeigt das Verhältnis ***vrms_vibra*** zu ***vrms*** in Abhängigkeit von der Zuglänge. Diese Grafiken verdeutlichen, dass ***vrms_vibra*** stets kleiner als ***vrms*** ist und weisen darauf hin, dass der Unterschied bis zu einem Faktor 2 bei kurzen Zügen oder Lokzügen betragen kann. Dies impliziert, dass die Fahrzeugemissionen nach ***vrms_vibra*** für eine Doppelkomposition eines Rollmaterialtyps immer grösser sind als für eine Einfachkomposition desselben Rollmaterialtyps, und zwar allein aufgrund des Berechnungsverfahrens. Dies wird in Abbildung B.2 anhand der Durchfahrten von Einfach-, Doppel- und Dreifachkompositionen von Flirts und RV-Dosto veranschaulicht. Eine einzelne RV-Dosto-Einheit hat mit 150 m etwa die gleiche Länge wie eine Doppelkomposition Flirt. Die orange markierte horizontale Linie stellt den Emissionsparameter für Leichtbauzüge (0.060 mm/s) dar. Für die Einfachkompositionen Flirt (hellgrüne Punkte) entspricht $vrms_{vibra} = 0.060$mm/s im Durchschnitt $vrms = 0.10$mm/s. Umgekehrt entspricht $vrms = 0.10$mm/s ca. $vrms_{vibra} = 0.72$mm/s für die doppelte Zuglänge (eine Doppelkomposition Flirt oder eine Einfachkomposition RV-Dosto), was einen Unterschied von ca. 20% bedeutet.

Daraus ergibt sich, dass längere Züge im Vergleich zu kürzeren Zügen bei der Anwendung von ***vrms_vibra*** „benachteiligt" werden. Da der Unterschied in den Definitionen der beiden Metriken auf einer Zeitbasis (und nicht auf einer Distanz) beruht, spielt die Fahrgeschwindigkeit der Vorbeifahrt ebenfalls eine Rolle: analog dazu werden bei der Anwendung von ***vrms_vibra*** langsam fahrende Züge im Vergleich „benachteiligt".

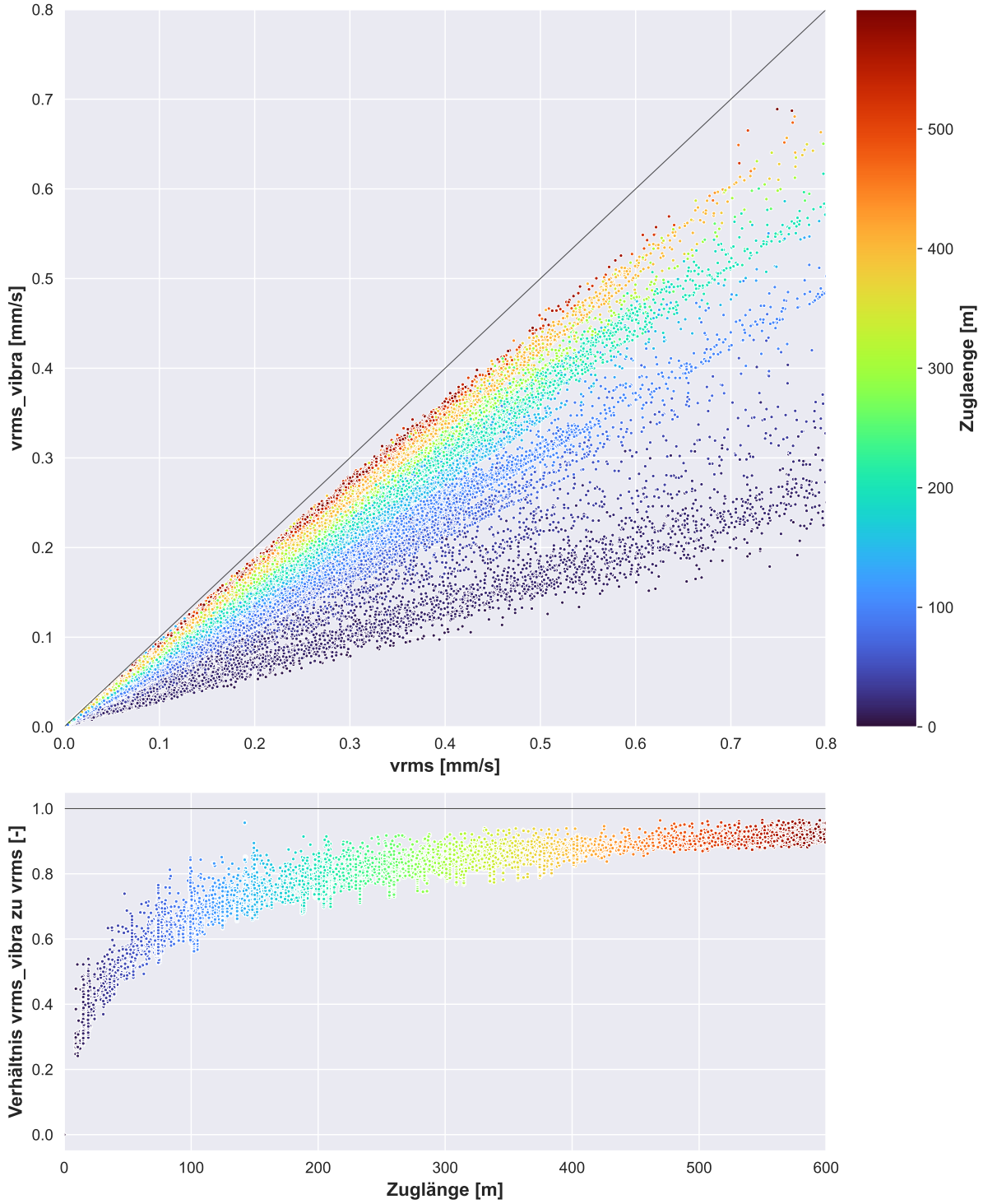


Abbildung B.1.: Vergleich der Fahrzeugemissionen ***vrms*** und ***vrms_vibra*** - alle Standorte, alle Rollmaterialtypen mit Zuglänge kleiner 600m

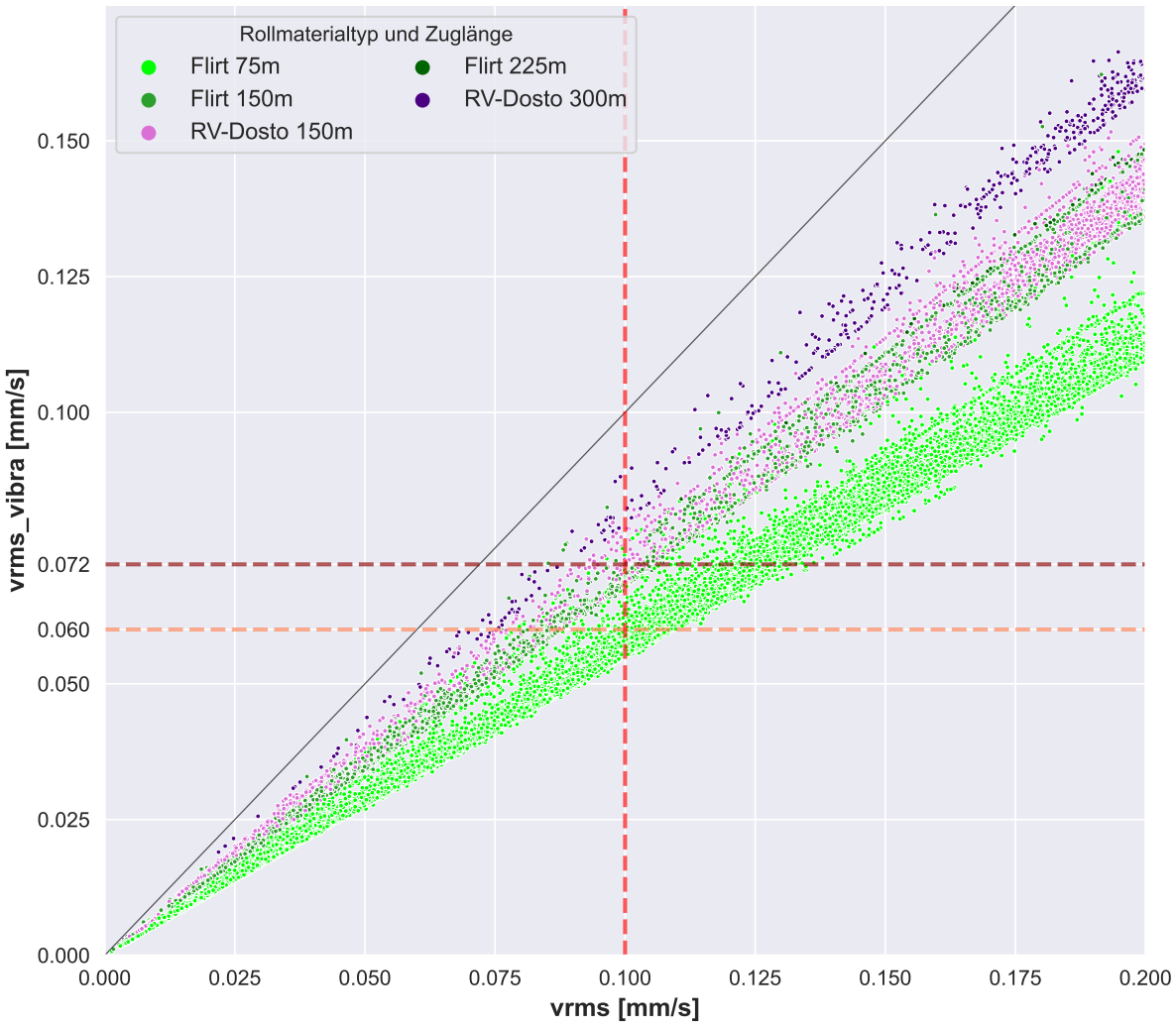


Abbildung B.2.: Vergleich der Fahrzeugemissionen ***vrms*** und ***vrms_vibra*** - alle Standorte, Flirts und RV-Dosto

B.1.2. Fazit und Ausblick zu den Metriken

- Der Ansatz in VIBRA-1 verwendet als Basisgrösse den RMS-Wert der Schwingschnelle ***vrms_vibra*** mit $\delta T = 5s$. Diese Vor- und Nachlaufzeit wird damit begründet, dass die Immissionen des Zuges bereits gespürt werden können, bevor er sich vor dem Gebäude befindet und nach der Durchfahrt noch etwas andauert.
- Hingegen erfolgt die Beurteilung von gemessenen Erschütterungsimmissionen nach DIN 4150-2 mit Maximalwerten des gleitenden Effektivwertes (e.g. KB_{Fmax} und KB_{FTr}). Eine Vor- und Nachlaufzeit im Zeitsignal mit kleinen Amplituden spielt dabei keine Rolle.
- Für die Prognose der charakteristischen Immissionswerte mit VIBRA-1 werden am Ende des Berechnungsablaufs von ***vrms_vibra*** durch Multiplikation mit entsprechenden Umrechnungsfaktoren bestimmt. Gemäss [4] Tab. 3.8b variiert der Umrechnungsfaktor ***vrms_vibra*** zu KB_{FT} bei ca. 800 Messreihen wenig mit dem Immissionsort (Freifeld, Fundament, Geschossdecken), was für die Sinnhaftigkeit ***vrms_vibra*** mit $\delta T = 5s$ spricht.
- Für die 1:1 Vergleichbarkeit von gemessenen Erschütterungen mit den bestehenden VIBRA-1 Emissionsparametern, was in der vorliegenden Arbeit thematisiert wird, muss zwingend ***vrms_vibra*** angewendet werden.
- „Stand der Technik“ für Fahrzeugemissionen ist ***vrms*** mit Berücksichtigung der geometrischen Vorbeifahrzeit (vgl. RENVIBII [19], RIVAS [21], [16] und [25], DIN45672-2 [20]). Ausserdem scheint eine Metrik für den Vergleich der Erschütterungen von Rollmaterialtypen oder Fahrzeugeigenschaften, die unterschiedliche Ergebnisse für das gleiche Rollmaterial in Einfach- oder Doppeltraktion liefert, wie es mit ***vrms_vibra*** der Fall ist, ungeeignet.
  $\Rightarrow$ An dieser Stelle stellt sich die Frage, ob die Maxima der gleitenden Effektivwerte für den Vergleich von Fahrzeugemissionen bei zukünftigen Untersuchungen im Rahmen vom Projekt „EKS Gleis“ auch betrachtet werden sollte. Schlussendlich ist es wichtig, dass Minderungsmassnahmen, deren Wirkung auf der Emissionsseite quantifiziert wird, ebenfalls auf der Immissionsseite mit dem anwendbaren Bewertungsverfahren nachgewiesen werden können. Die Darstellung der Minderungseffekte im RIVAS Deliverable [25] wurde dabei für interessant gefunden mit der Angabe beider Metriken und könnte für die Konsolidierung von Ergebnissen in weiteren Studien angewendet werden.
  $\Rightarrow$ Betrachtungen im Frequenzbereich für Emissionsvergleiche bleiben ebenfalls notwendig. Diese werden standardweise anhand von RMS-Werten durchgeführt. Dennoch können Terzbandspektren auch anhand von Maximalwerten des gleitenden Effektivwertes gerechnet werden (mithilfe des „Maxima-Terzpegels“ bzw. der „Max-Hold Methode“ vgl. [20] Kap. 8.2.2).

Anhang C.

Ergebnisse

C.1. Abhängigkeit der RMS-Werte mit der Fahrgeschwindigkeit

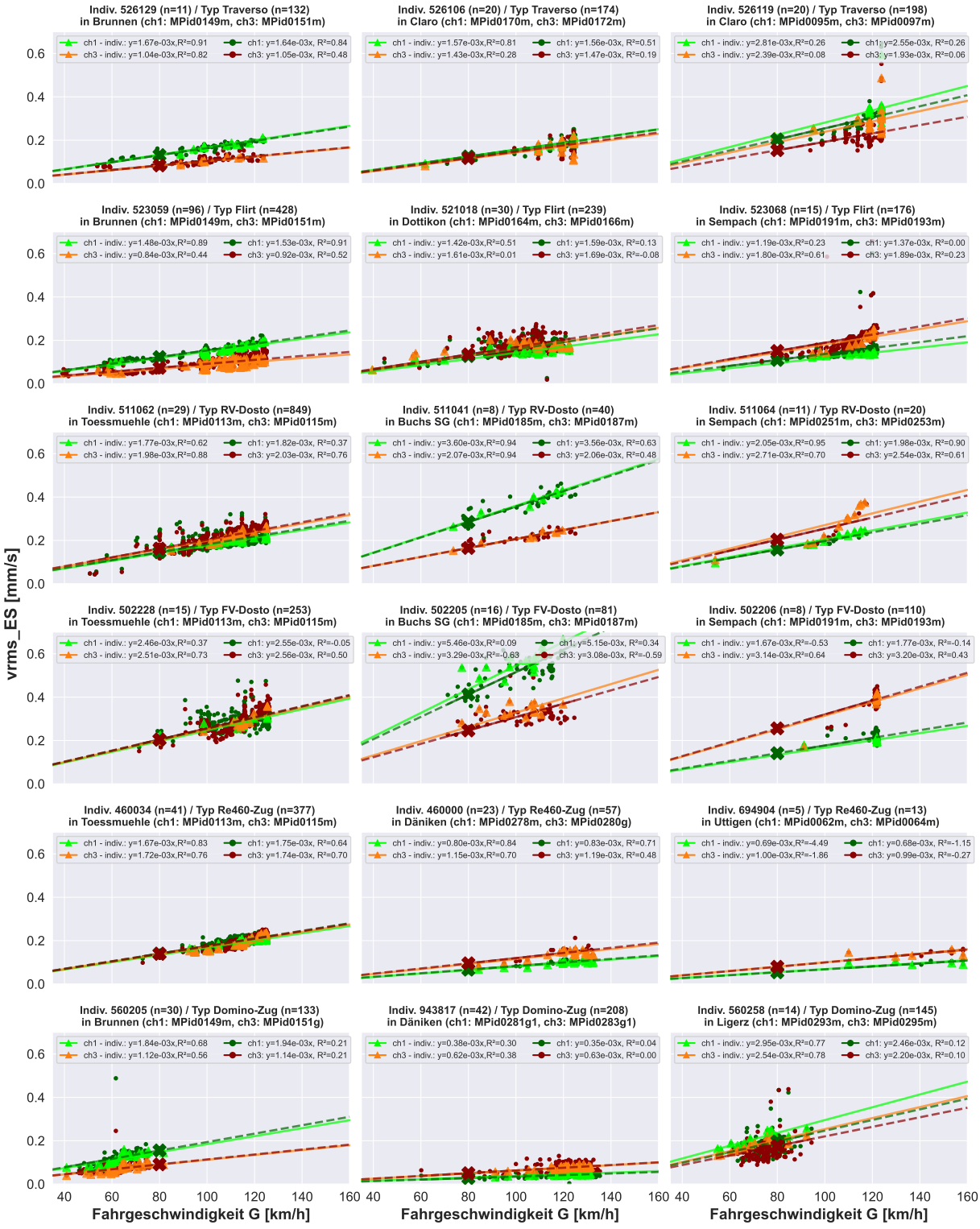


Abbildung C.1.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms_ES***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte

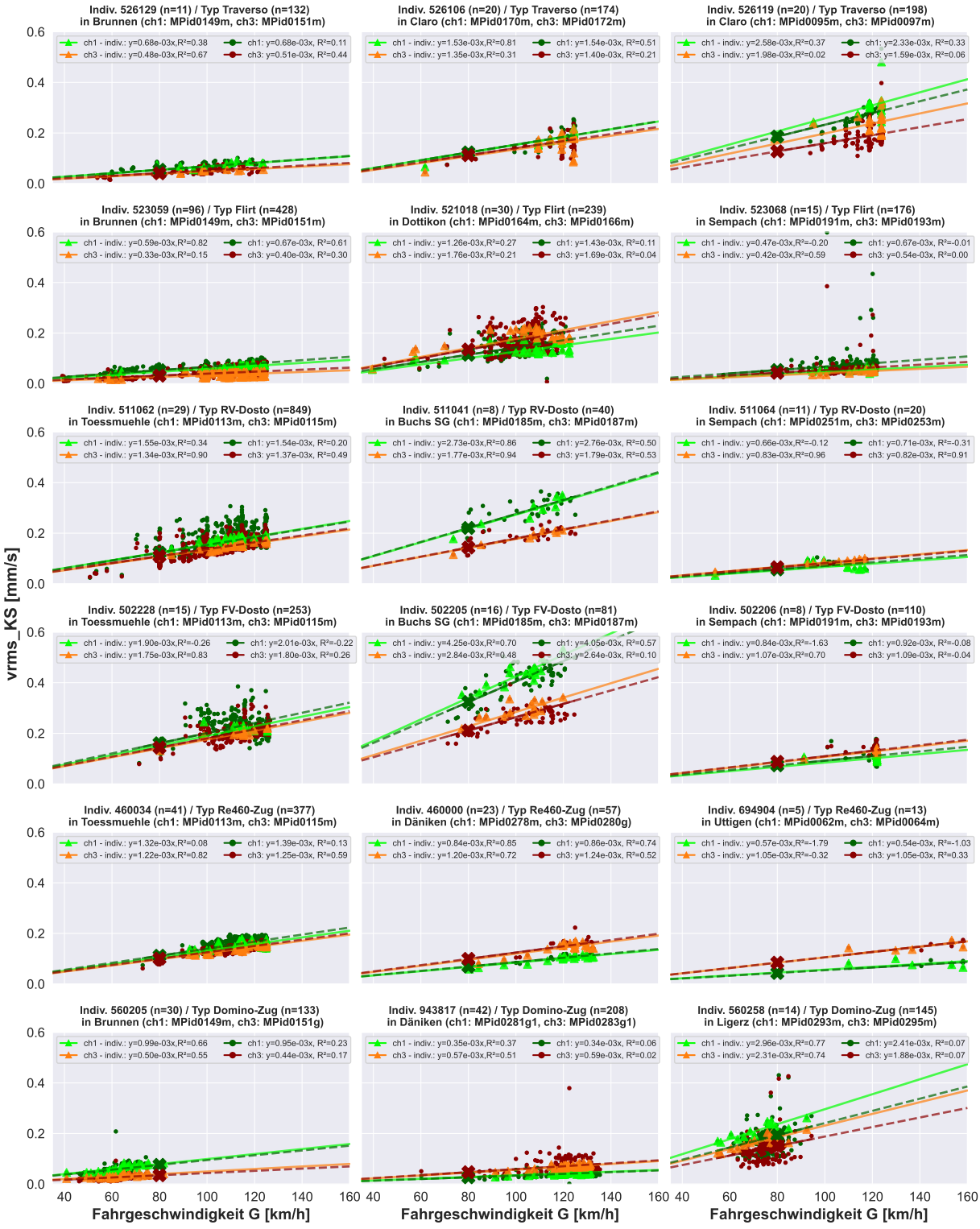


Abbildung C.2.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms_KS***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte

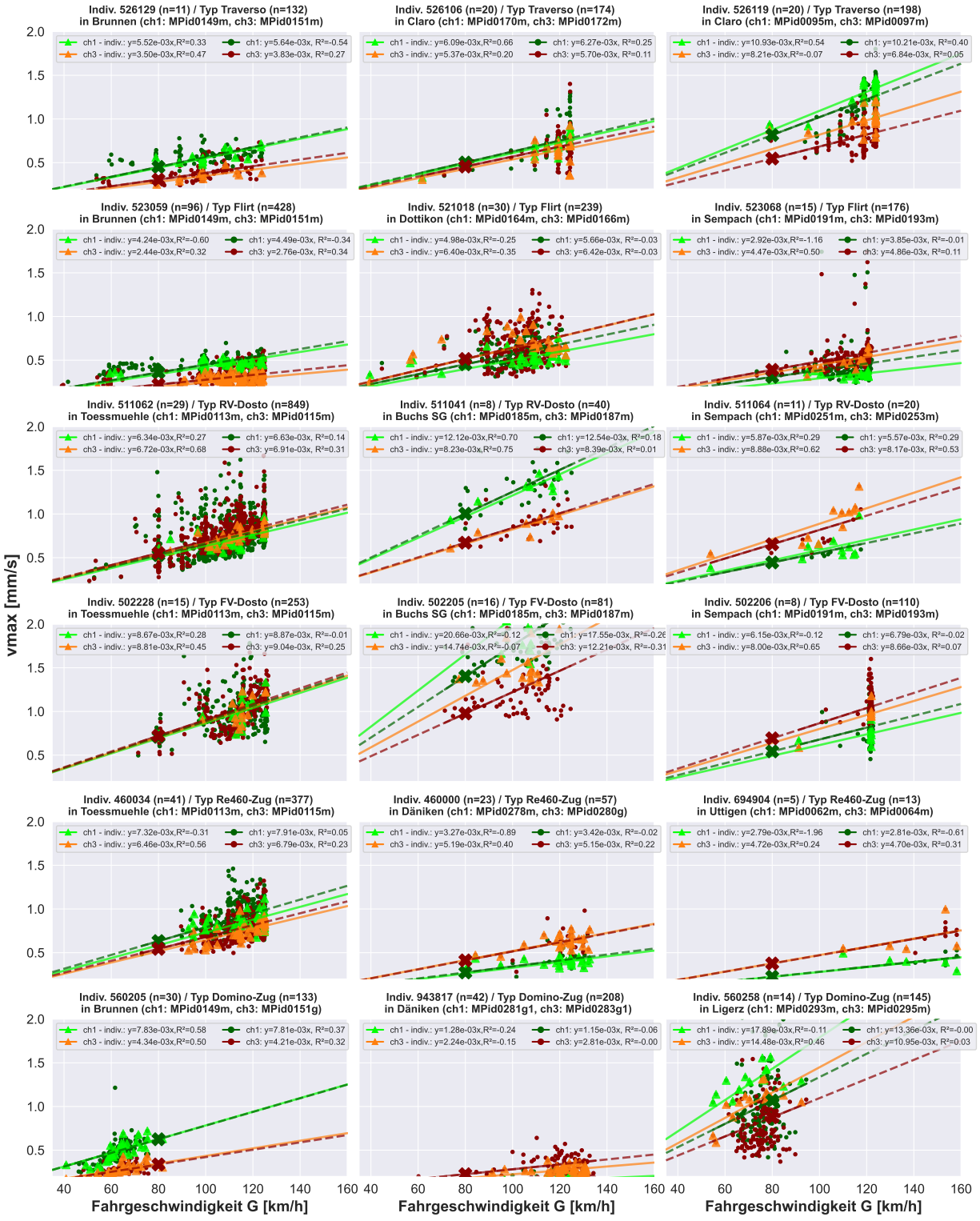


Abbildung C.3.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vmax***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte

C.2. Abhängigkeit der RMS-Werte mit dem Abstand Messpunkt zur Gleismitte

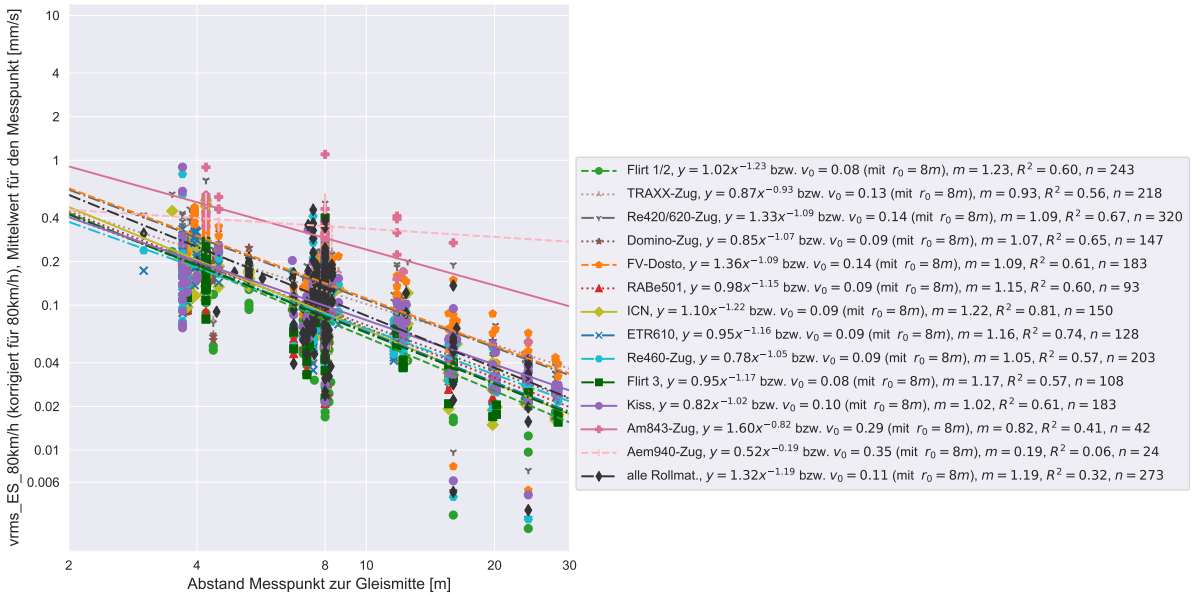


Abbildung C.4.: Abminderung der Fahrzeugemissionenen (Metrik: ***vrms_ES***, fahrgeschwindigkeitskorrigiert auf 80 km/h und Mittelwert je Messpunkt) nach Rollmaterialtypen.

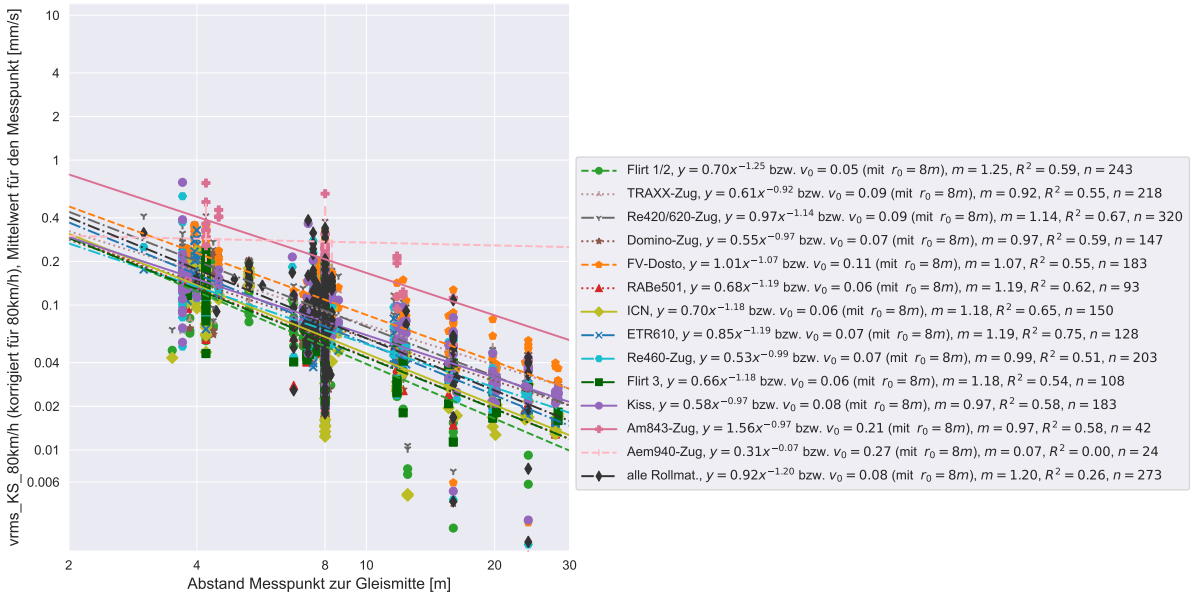


Abbildung C.5.: Abminderung der Fahrzeugemissionenen (Metrik: ***vrms_KS***, fahrgeschwindigkeitskorrigiert auf 80 km/h und Mittelwert je Messpunkt) nach Rollmaterialtypen.

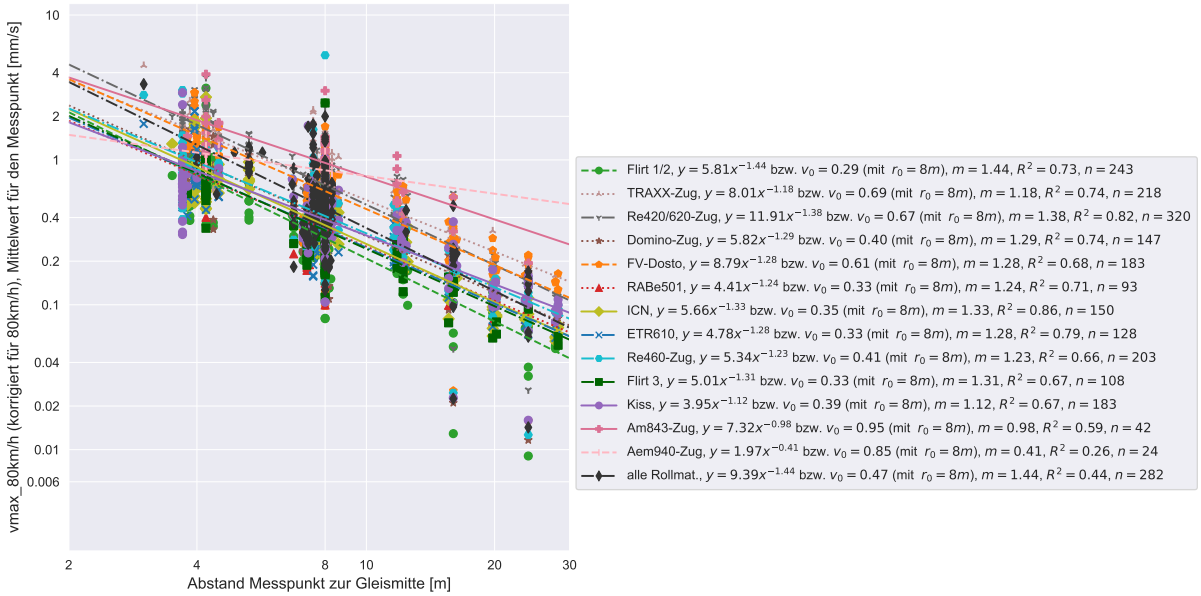


Abbildung C.6.: Abminderung der Fahrzeugemissionenen (Metrik: ***vmax***, fahrgeschwindigkeitskorrigiert auf 80 km/h und Mittelwert je Messpunkt) nach Rollmaterialtypen.

C.3. Fahrzeugunterschiede über Standorte und Messpunkte

C.3.1. Mit Abstandskorrektur, ohne Fahrgeschwindigkeitskorrektur

Fahrgeschwindigkeitsbereich zwischen 75 - 85 km/h

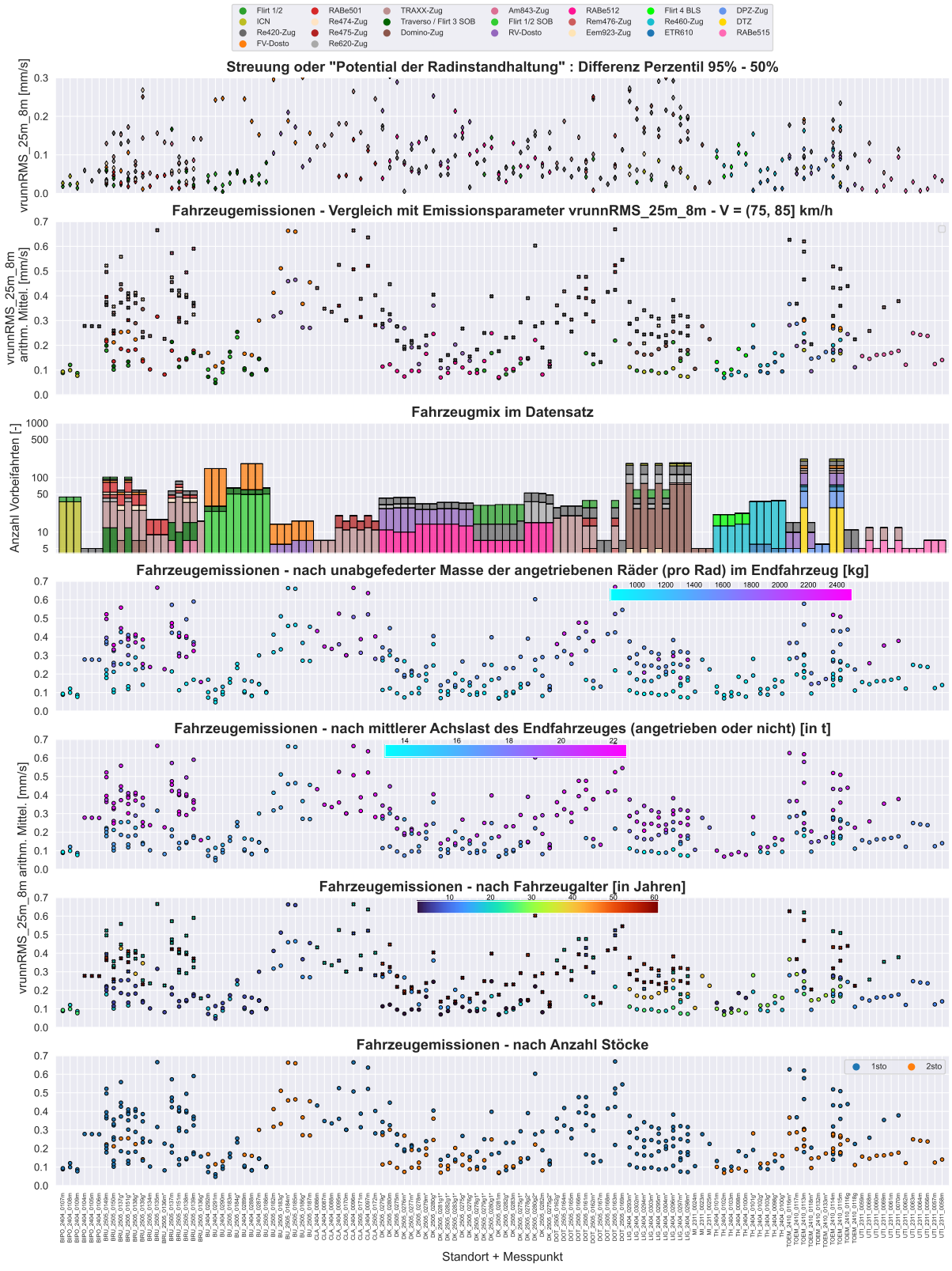


Abbildung C.7.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrunnRMS_25m_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte

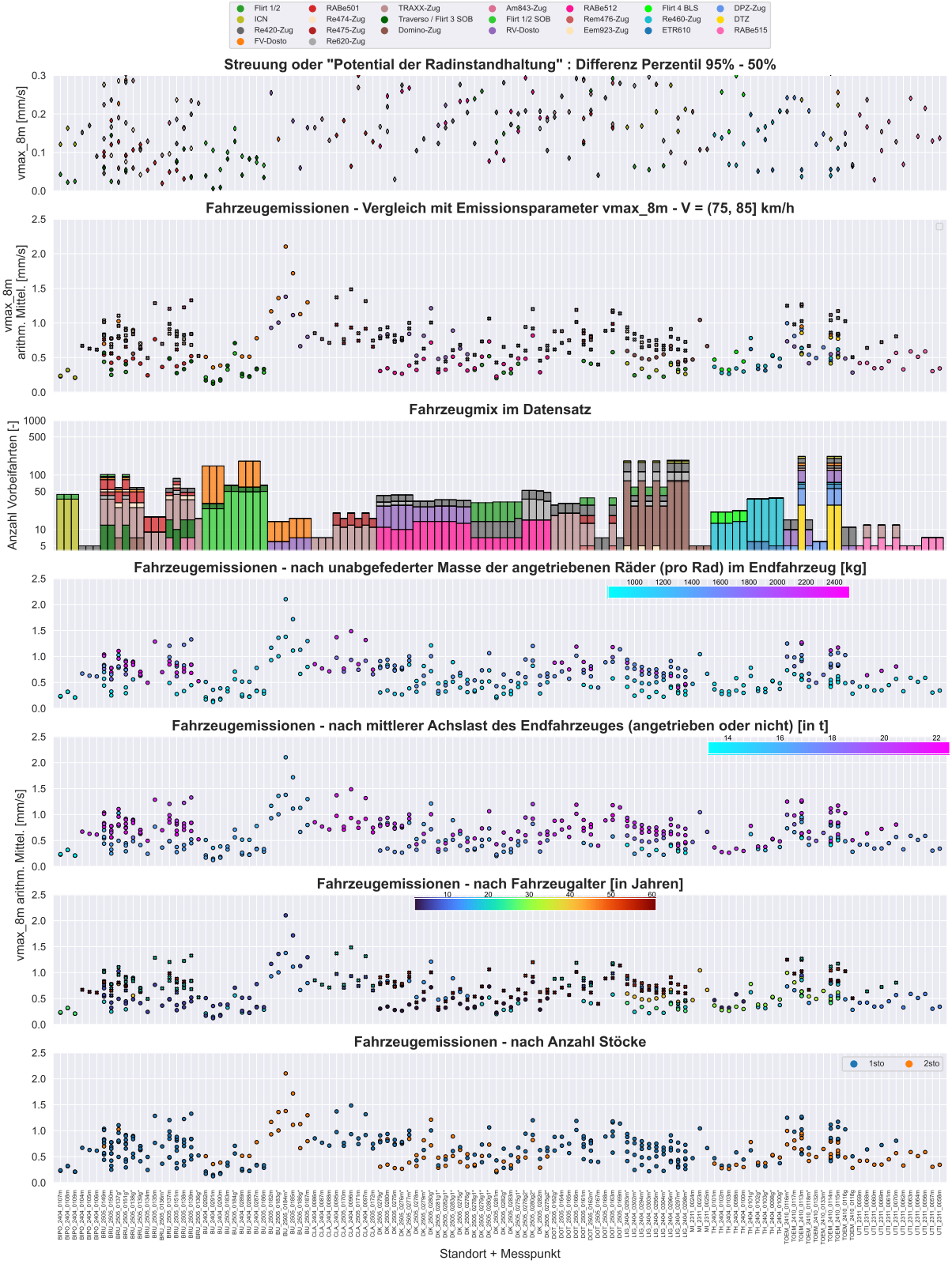


Abbildung C.8.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vmax_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte

Fahrgeschwindigkeitsbereich zwischen 95 - 105 km/h

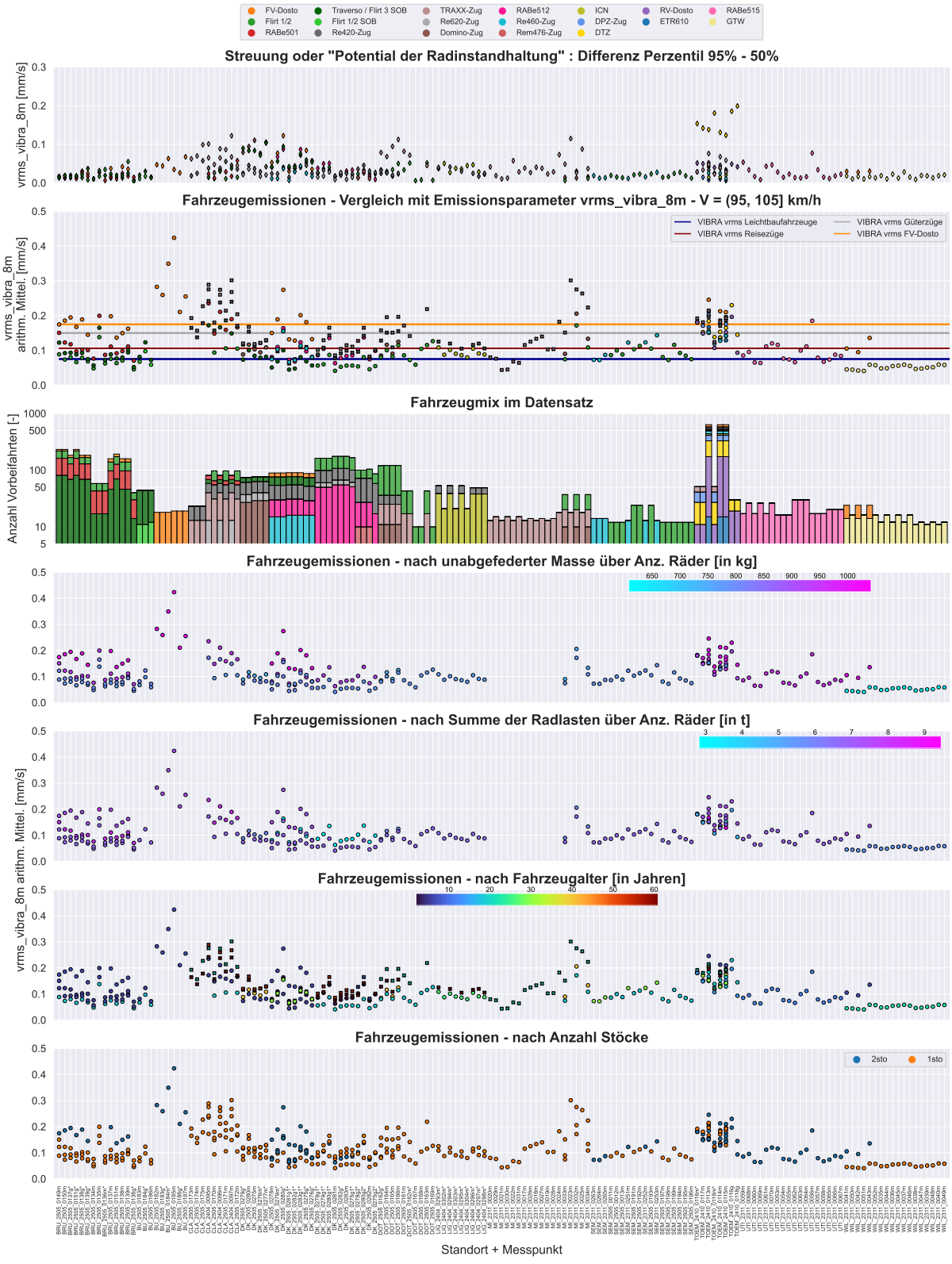


Abbildung C.9.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms_vibra_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte

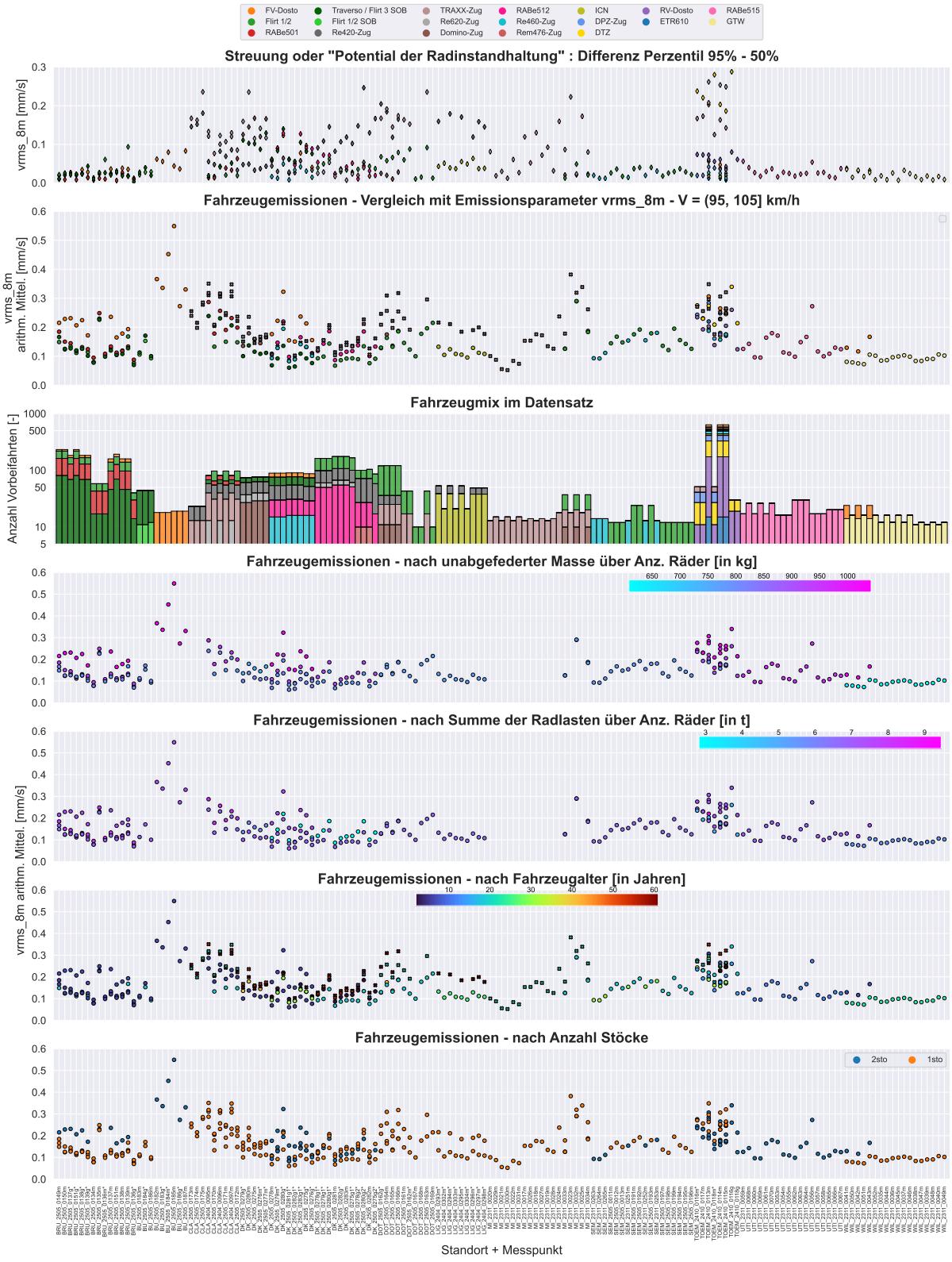


Abbildung C.10.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte



Abbildung C.11.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vmaxRunnRMS_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte

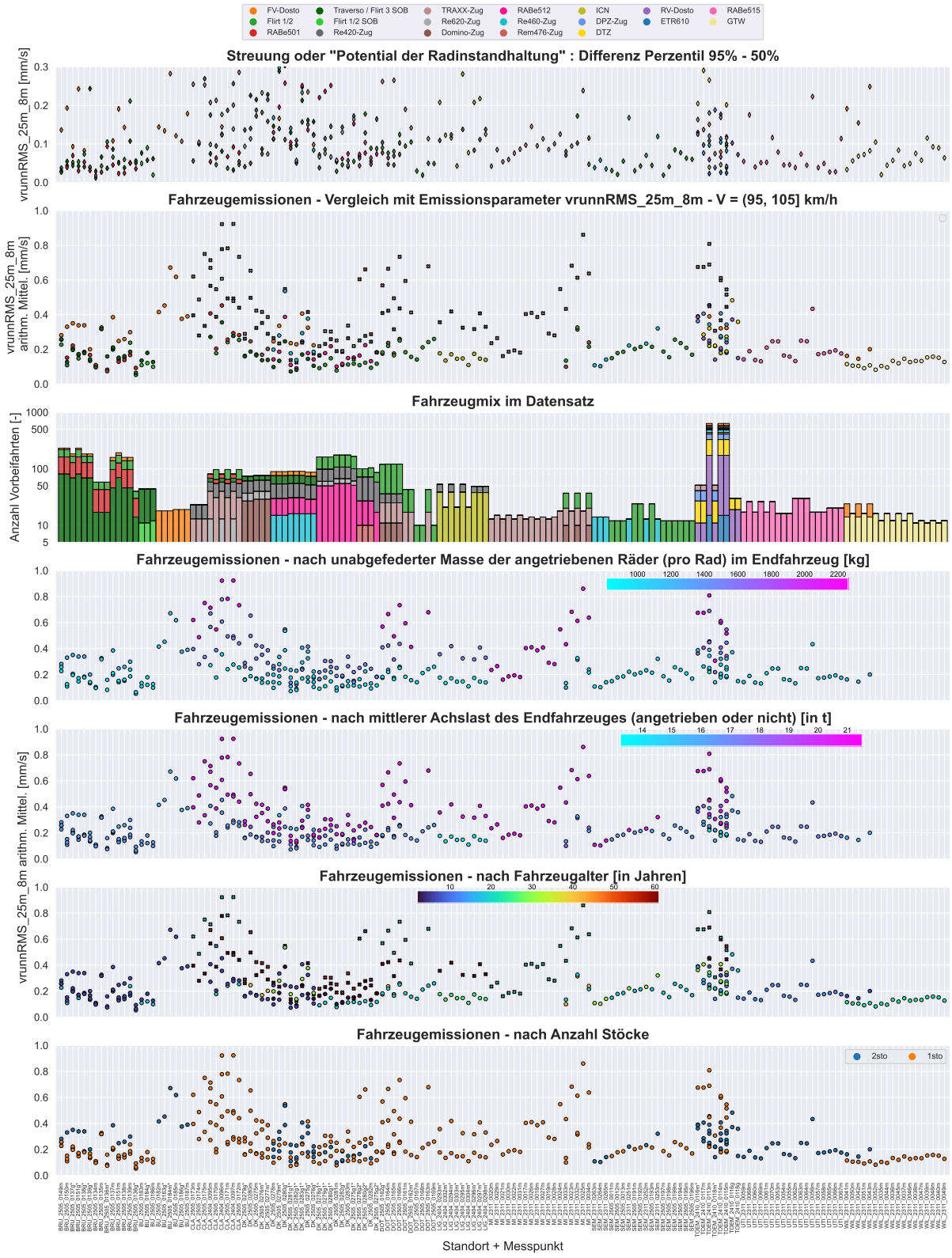


Abbildung C.12.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrunnRMS_25m_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte

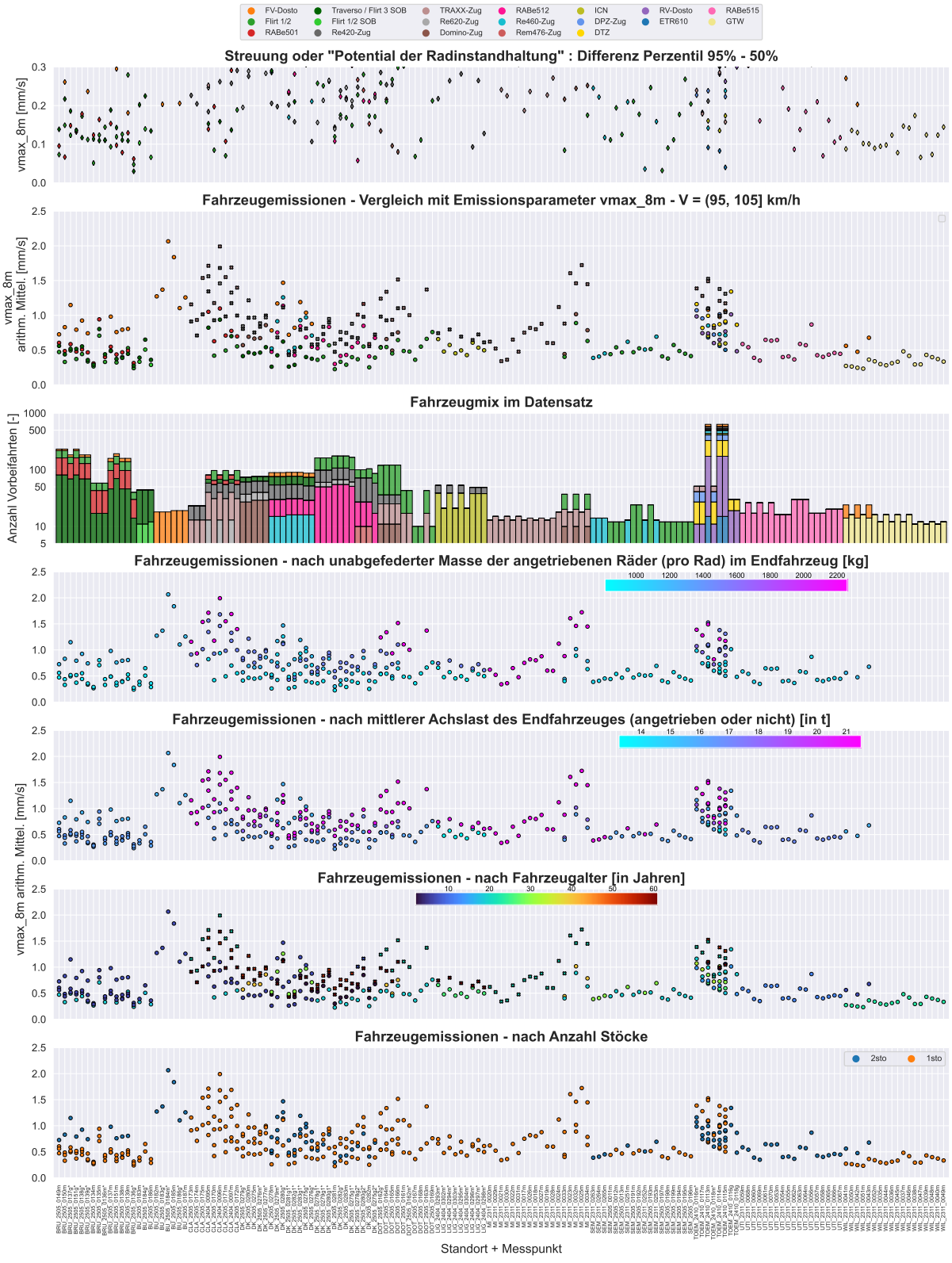


Abbildung C.13.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vmax_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte

Fahrgeschwindigkeitsbereich zwischen 115 - 125 km/h

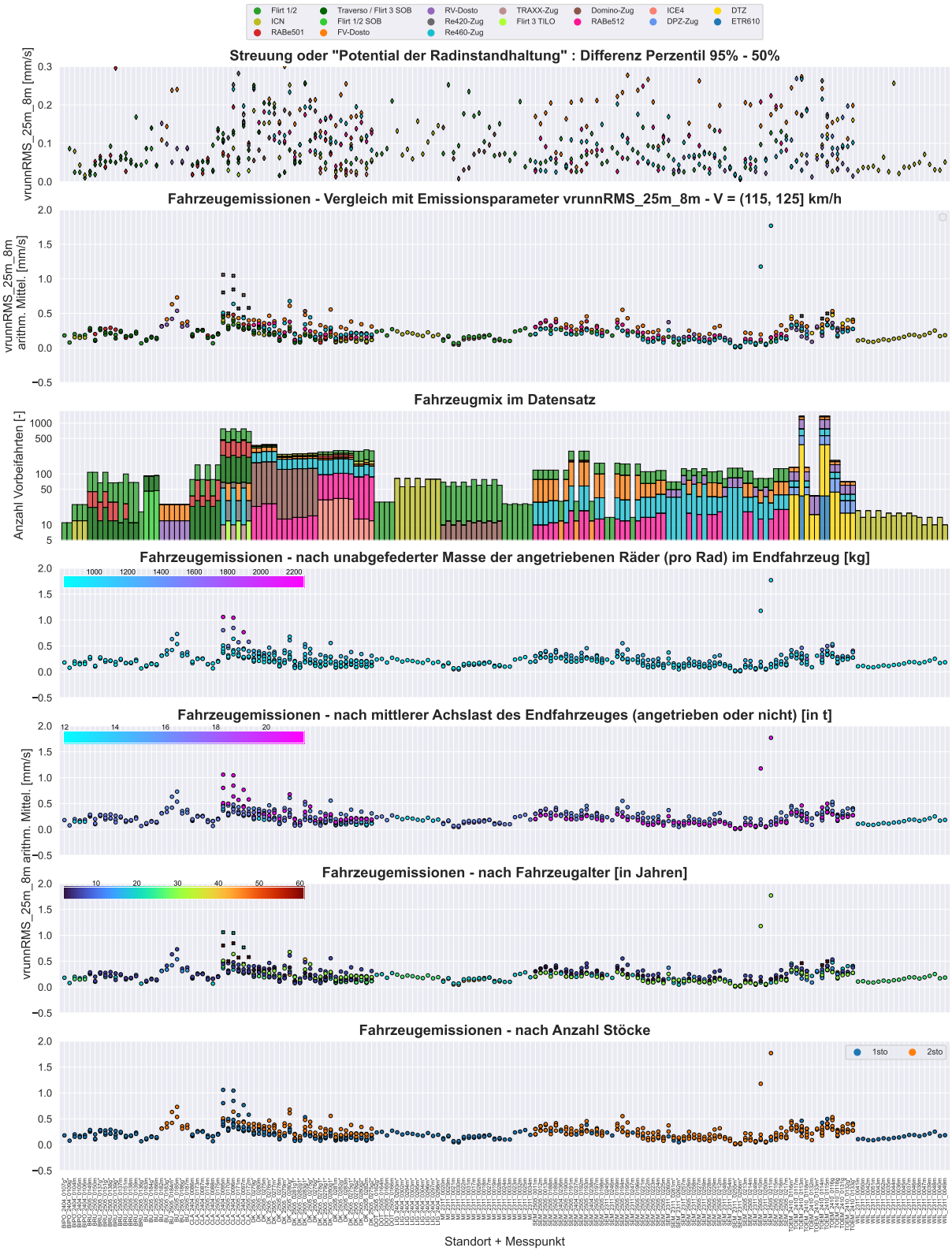


Abbildung C.14.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrunnRMS_25m_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte



Abbildung C.15.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vmax_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte

C.3.2. Mit Abstands - und Fahrgeschwindigkeitskorrektur

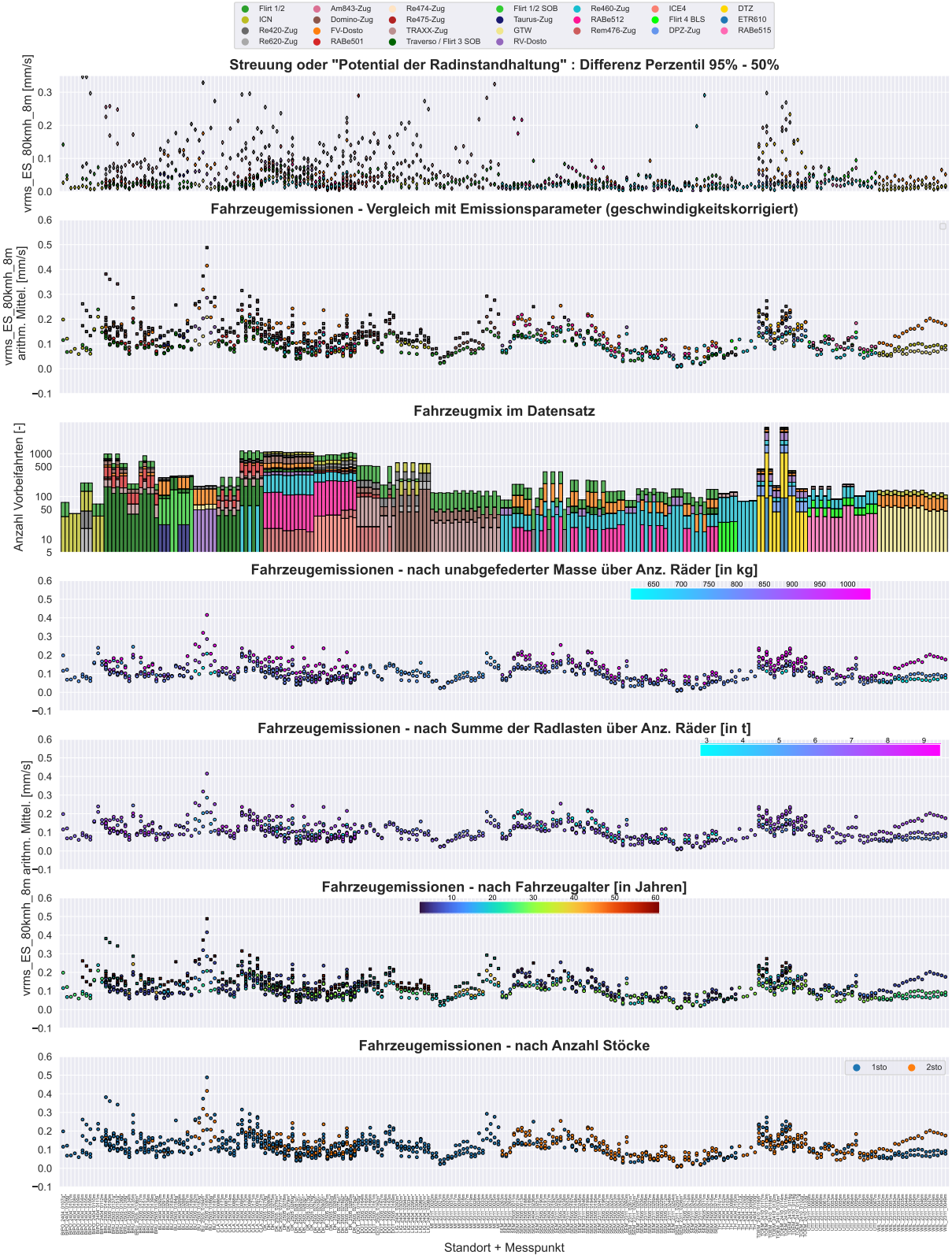


Abbildung C.16.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms_ES_80kmh_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte

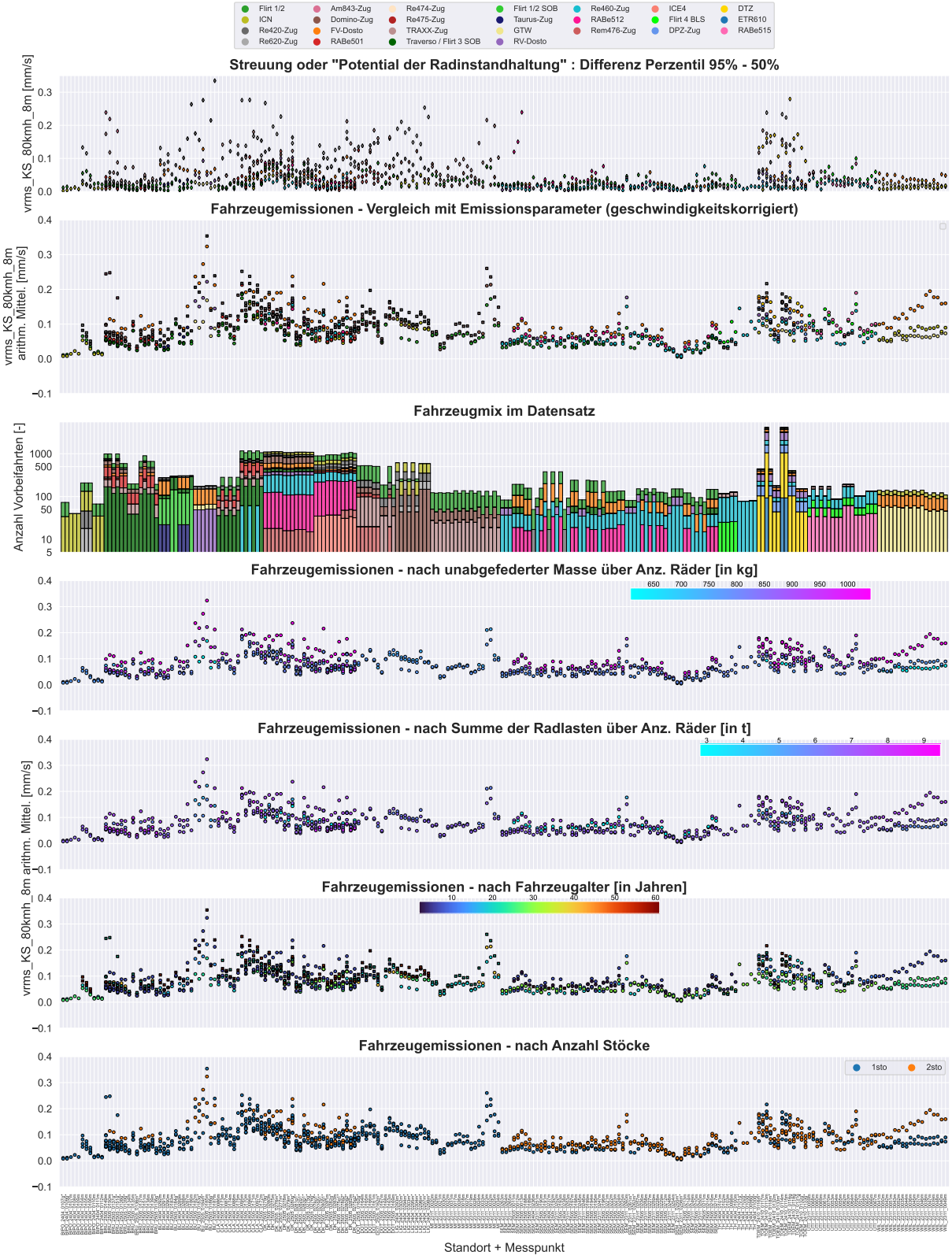


Abbildung C.17.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrms_KS_80kmh_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte

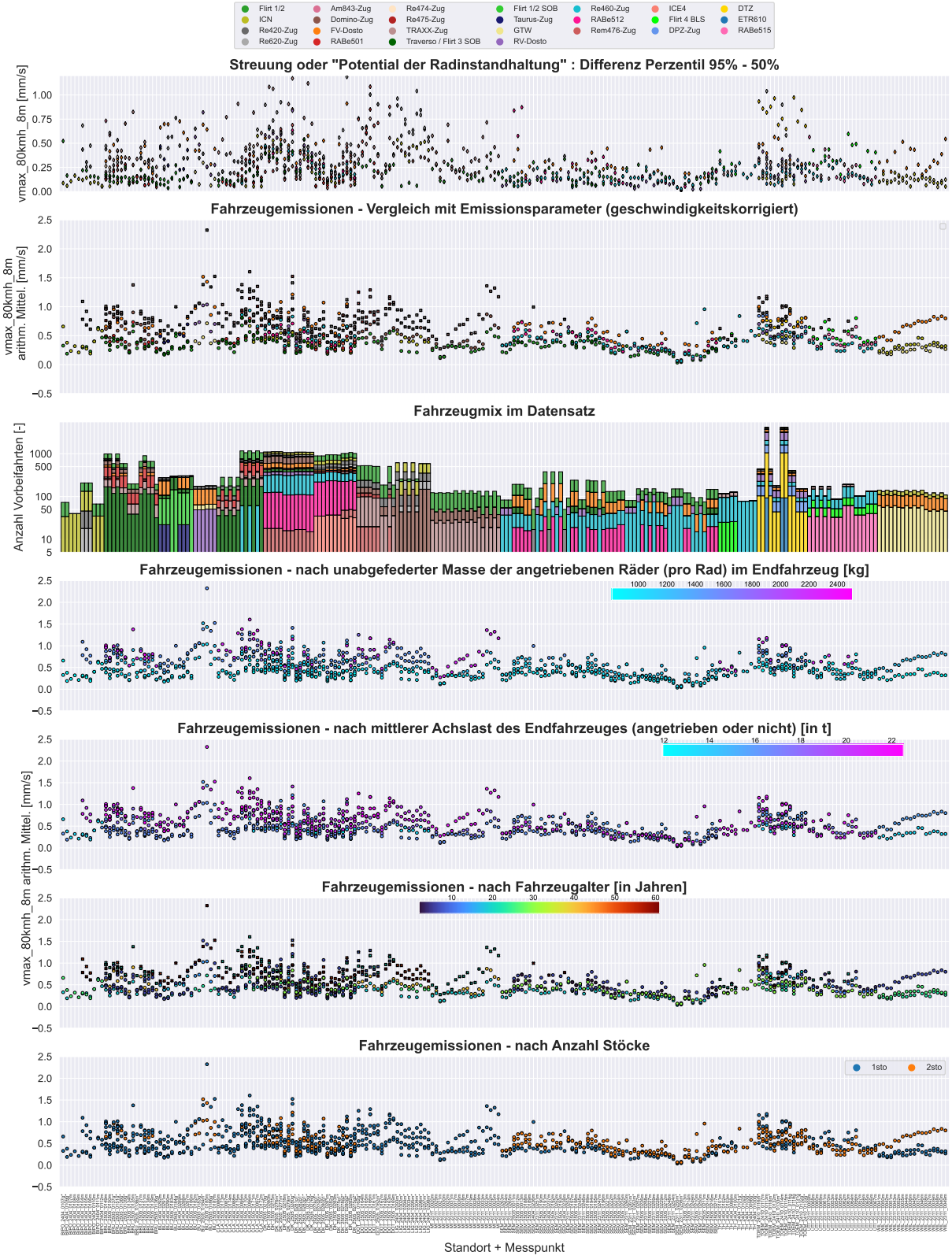


Abbildung C.18.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vmax_80kmh_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte

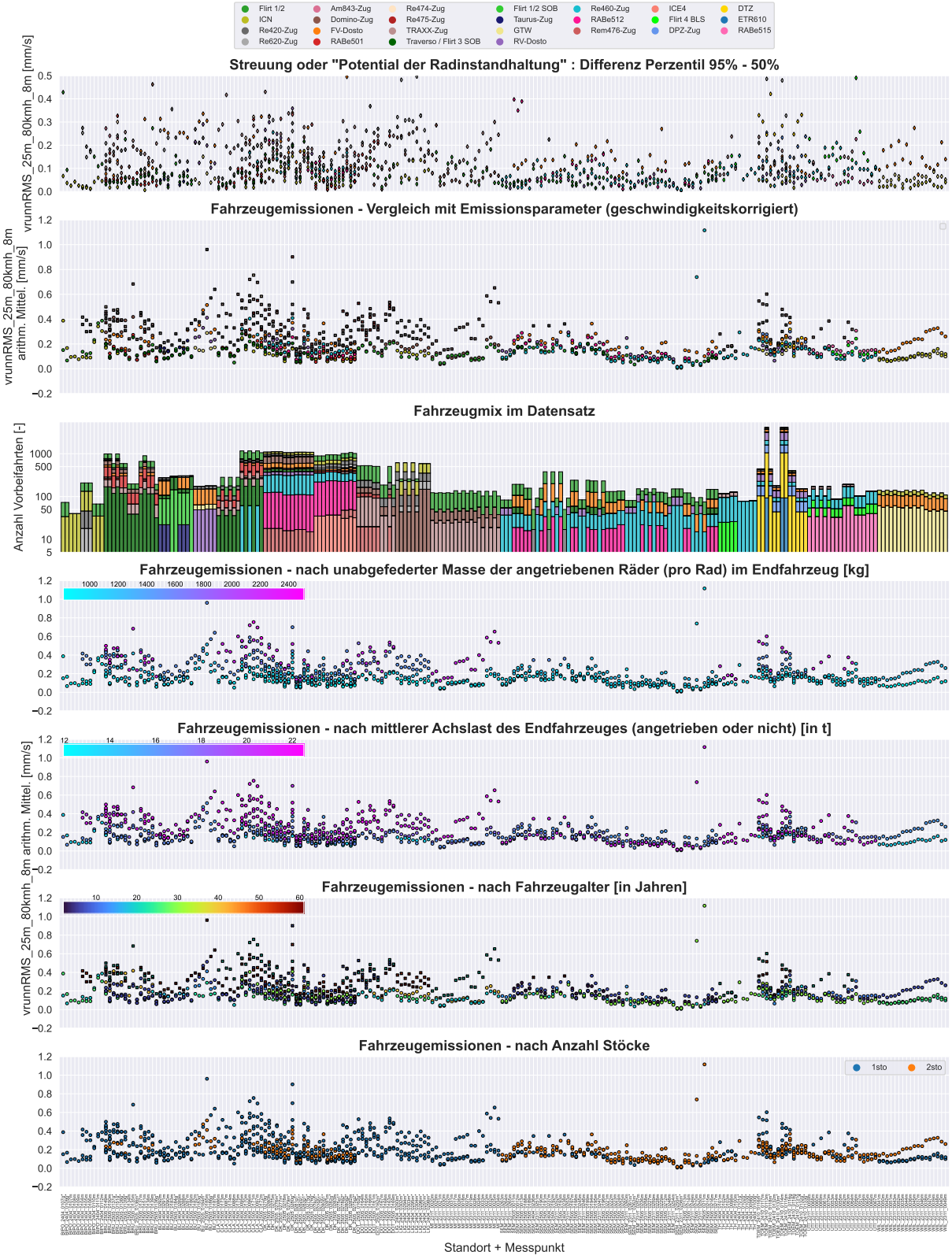


Abbildung C.19.: Fahrzeugemissionen (Metrik: ***vrunnRMS_25m_80kmh_8m***) über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte bzw. Messpunkte

C.4. Standortunterschiede

C.4.1. Für vrms_vibra_80kmh_8m

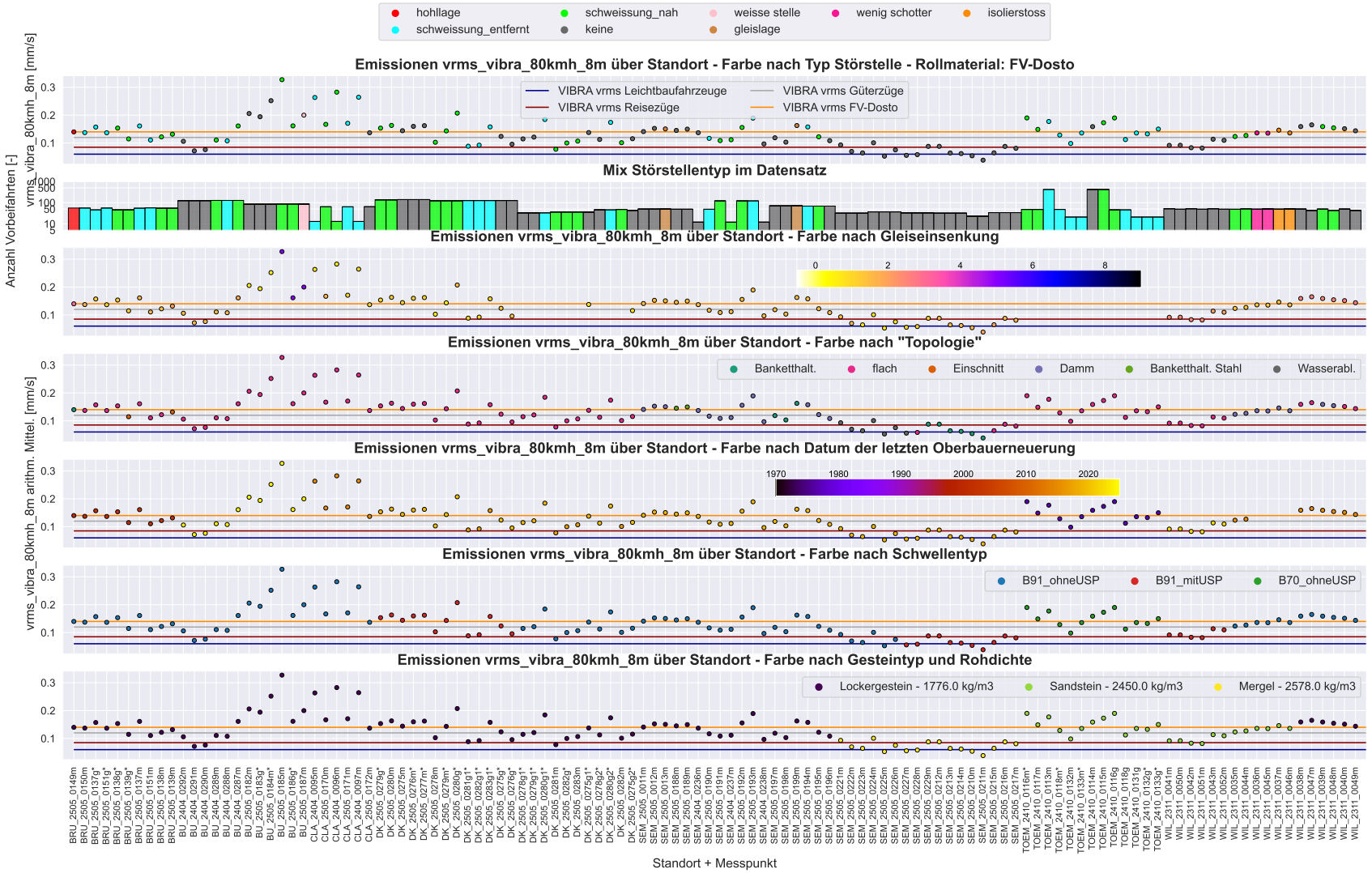


Abbildung C.20.: Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial FV-Dosto - Farbe nach Standortmerkmale

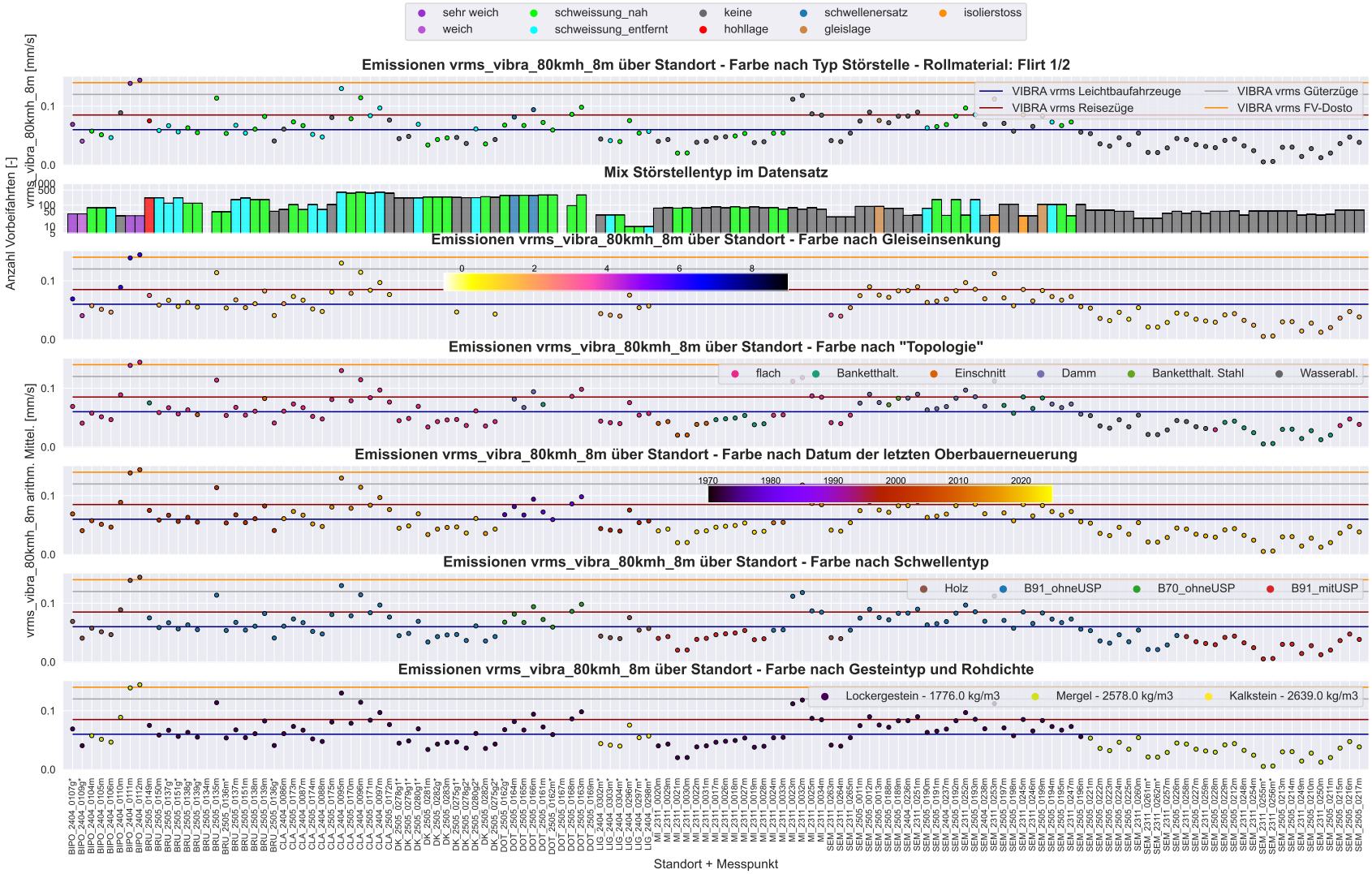


Abbildung C.21.: Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Flirt 1-2 - Farbe nach Standortmerkmale

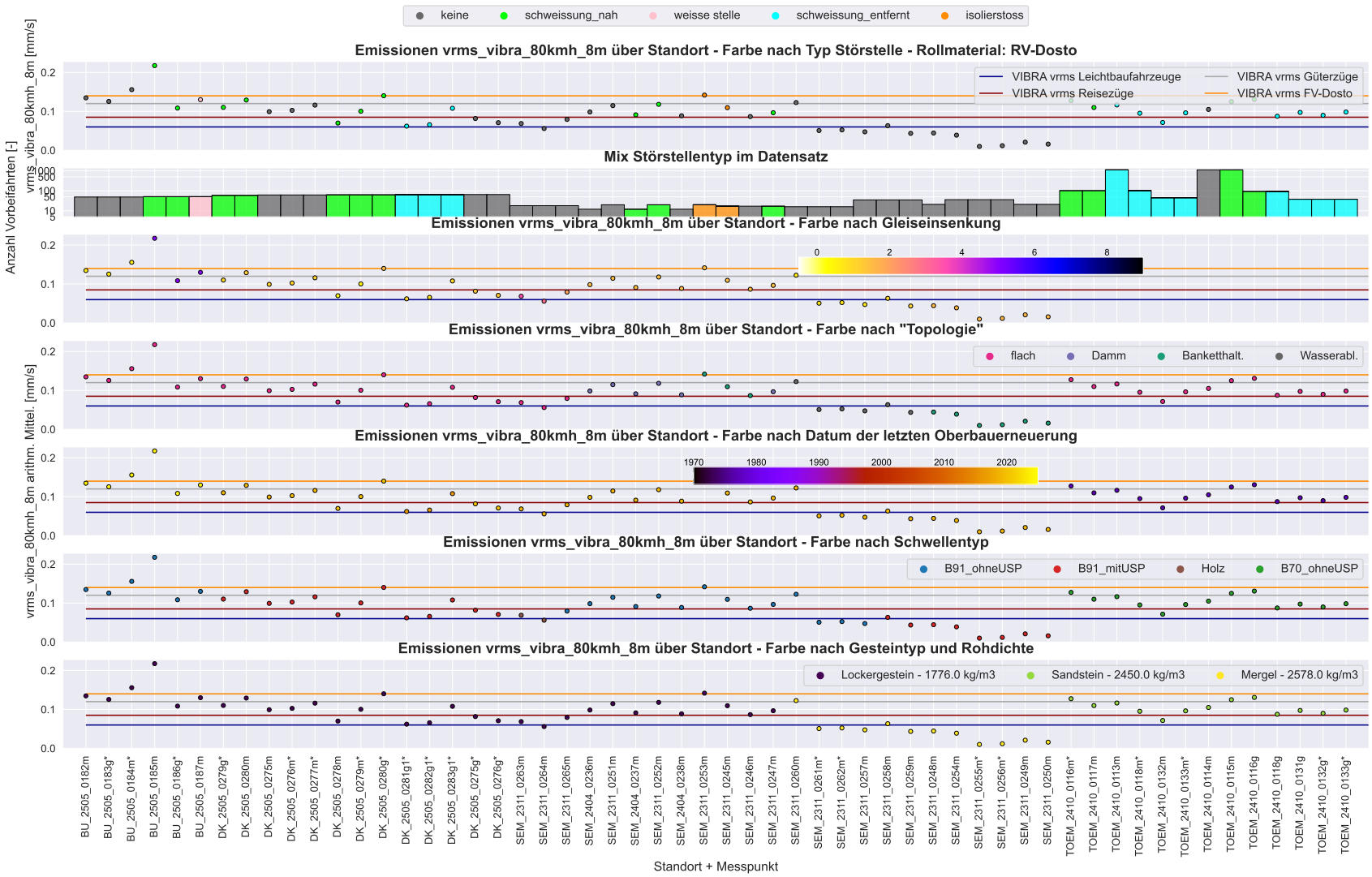


Abbildung C.22.: Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial RV-Dosto - Farbe nach Standortmerkmale

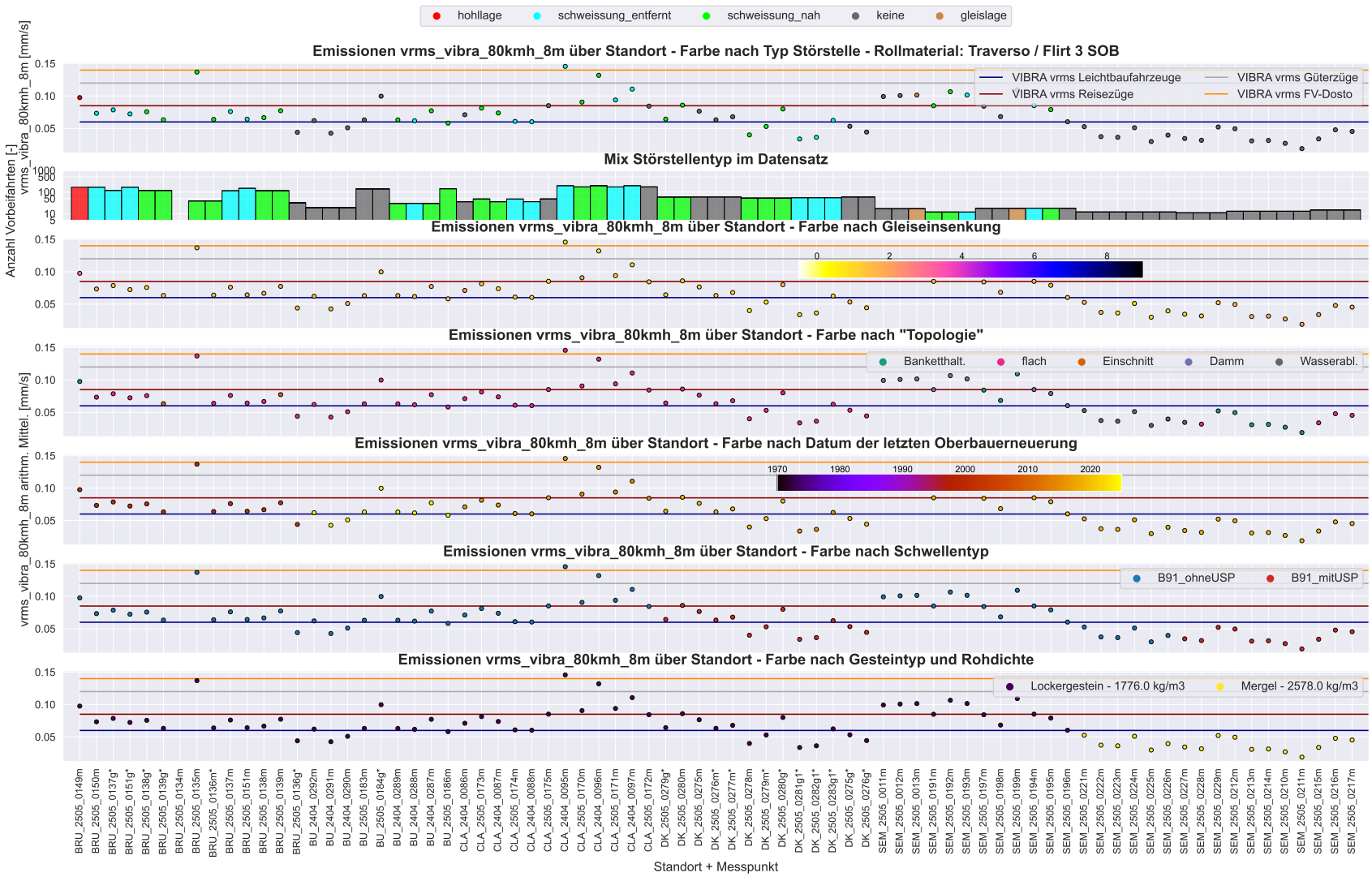


Abbildung C.23.: Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Traverso - Flirt 3 SOB - Farbe nach Standortmerkmale

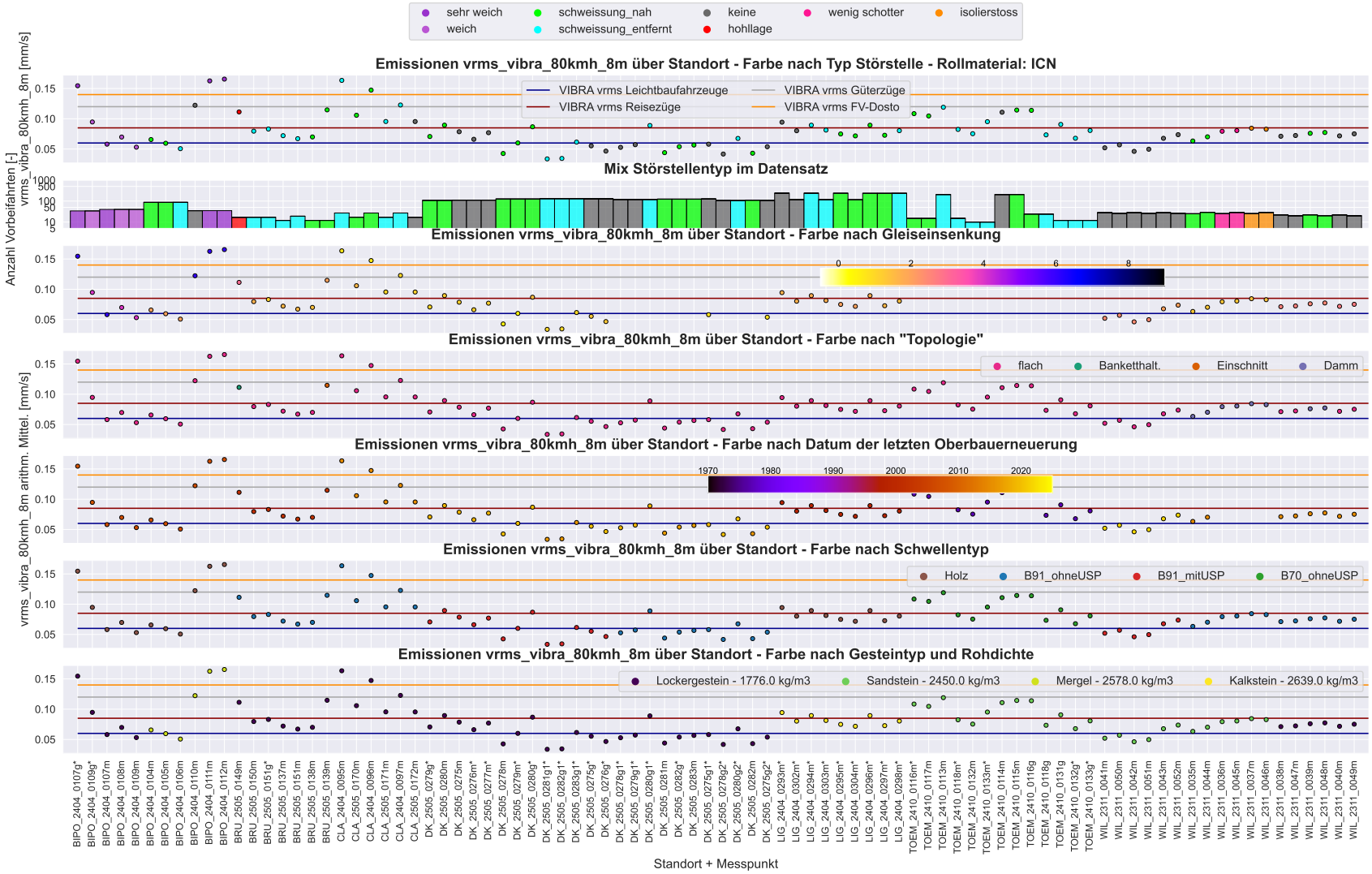


Abbildung C.24.: Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial ICN - Farbe nach Standortmerkmale

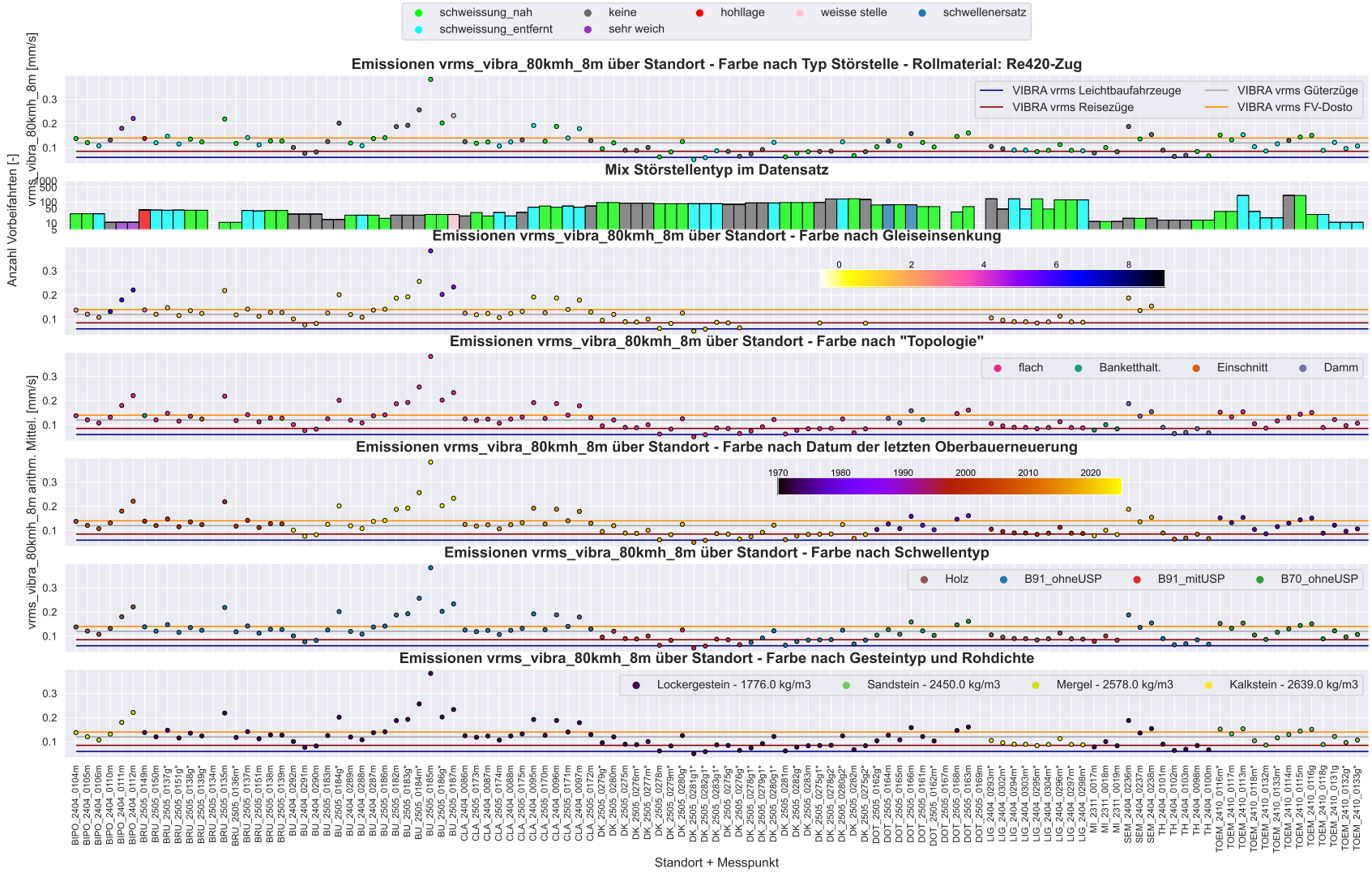


Abbildung C.25.: Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Re420-Zug - Farbe nach Standortmerkmale

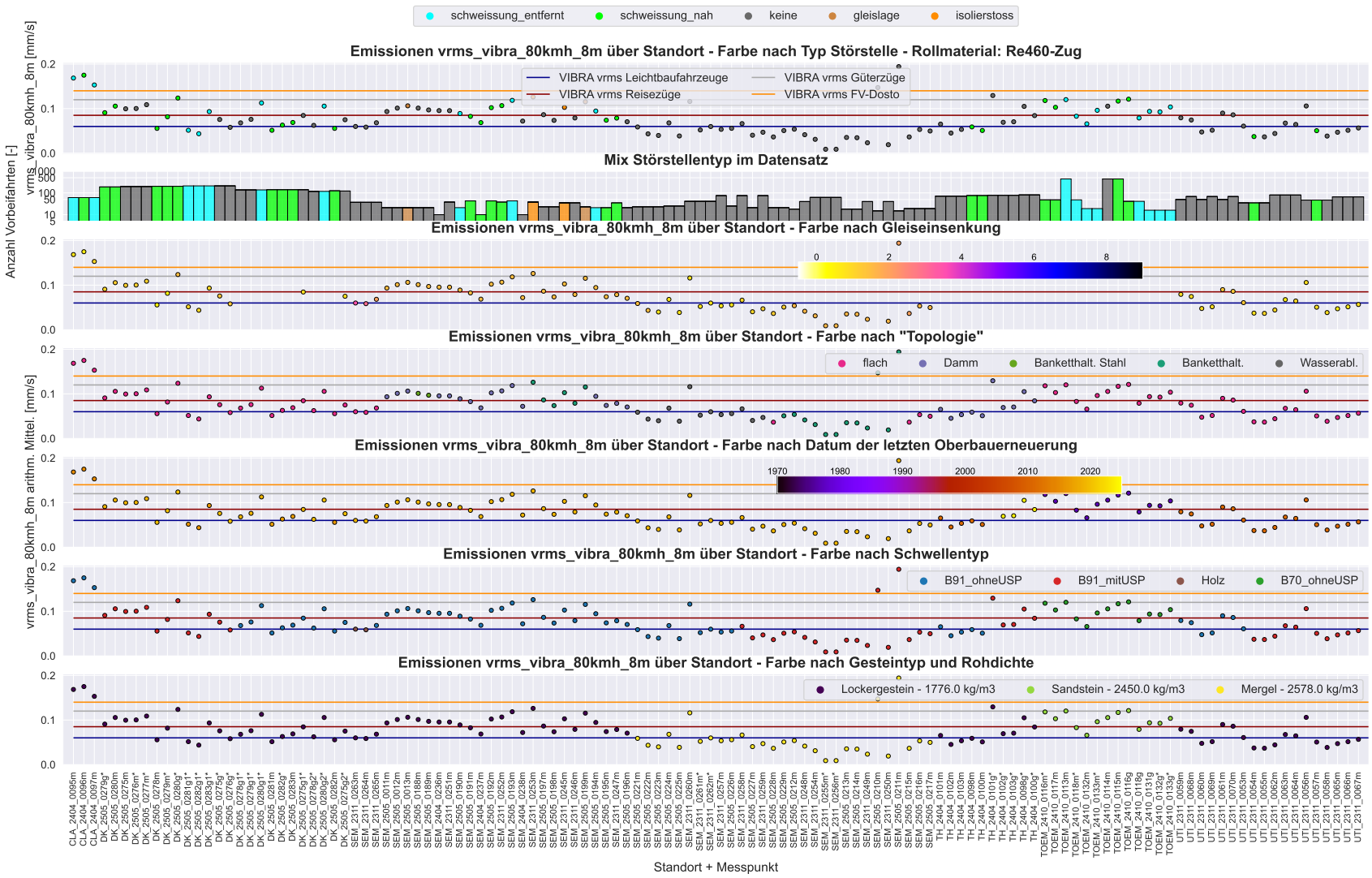


Abbildung C.26.: Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Re460-Zug - Farbe nach Standortmerkmale



Abbildung C.27.: Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial ETR610 - Farbe nach Standortmerkmale

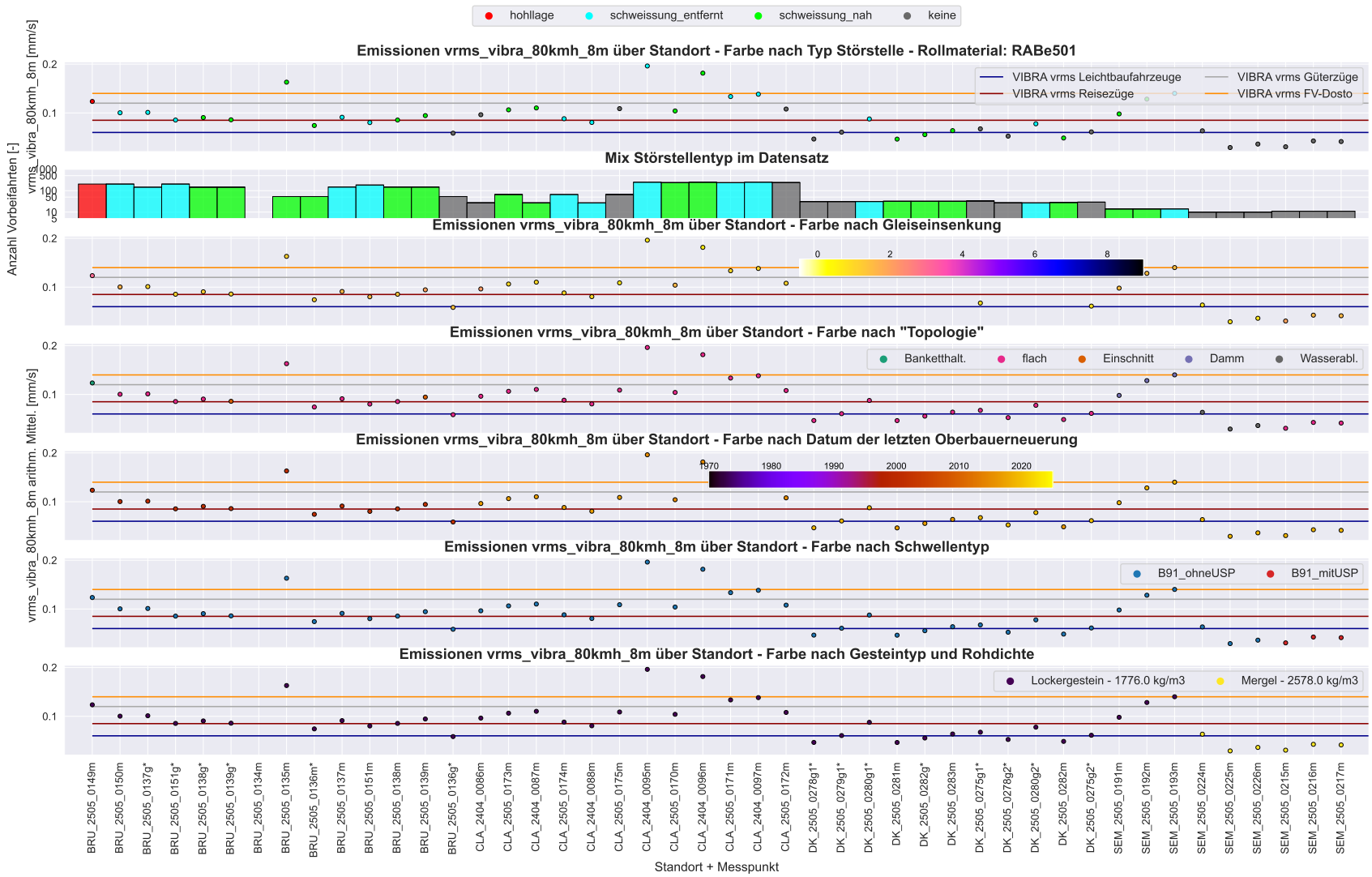


Abbildung C.28.: Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_vibra_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial RABe501 - Farbe nach Standortmerkmale

C.4.2. Für vrms_80kmh_8m

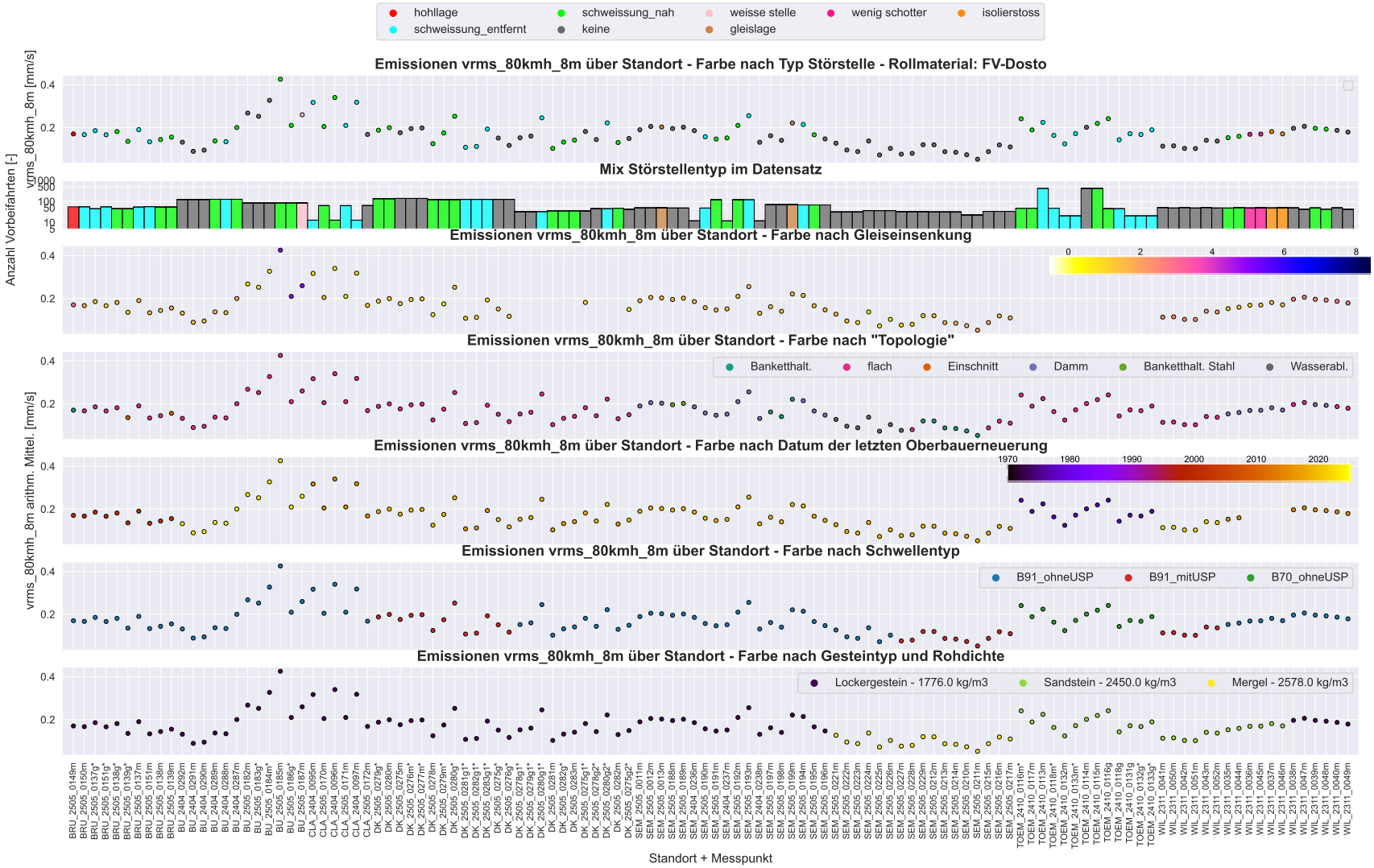


Abbildung C.29.: Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial FV-Dosto - Farbe nach Standortmerkmale

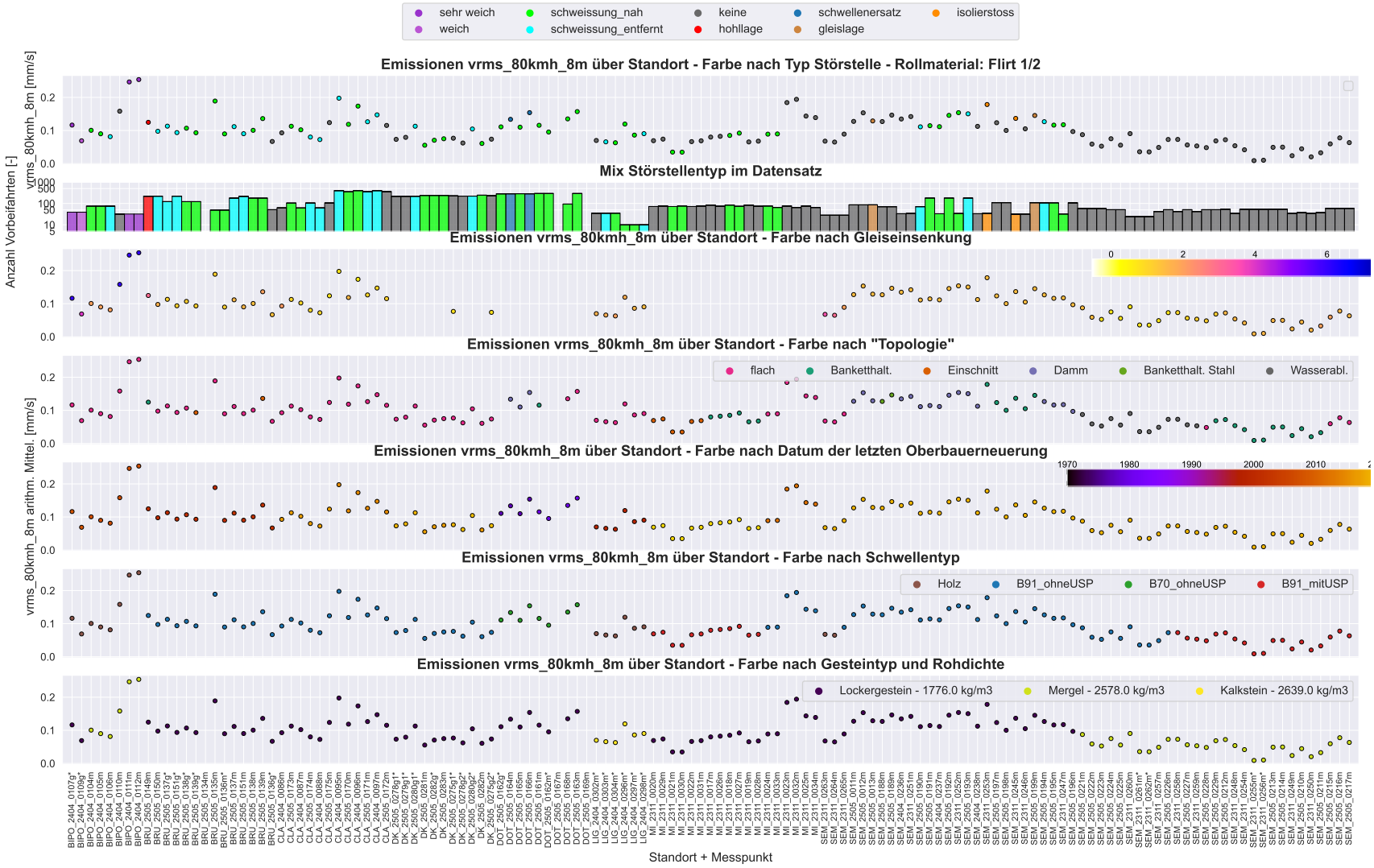


Abbildung C.30.: Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Flirt 1-2 - Farbe nach Standortmerkmale

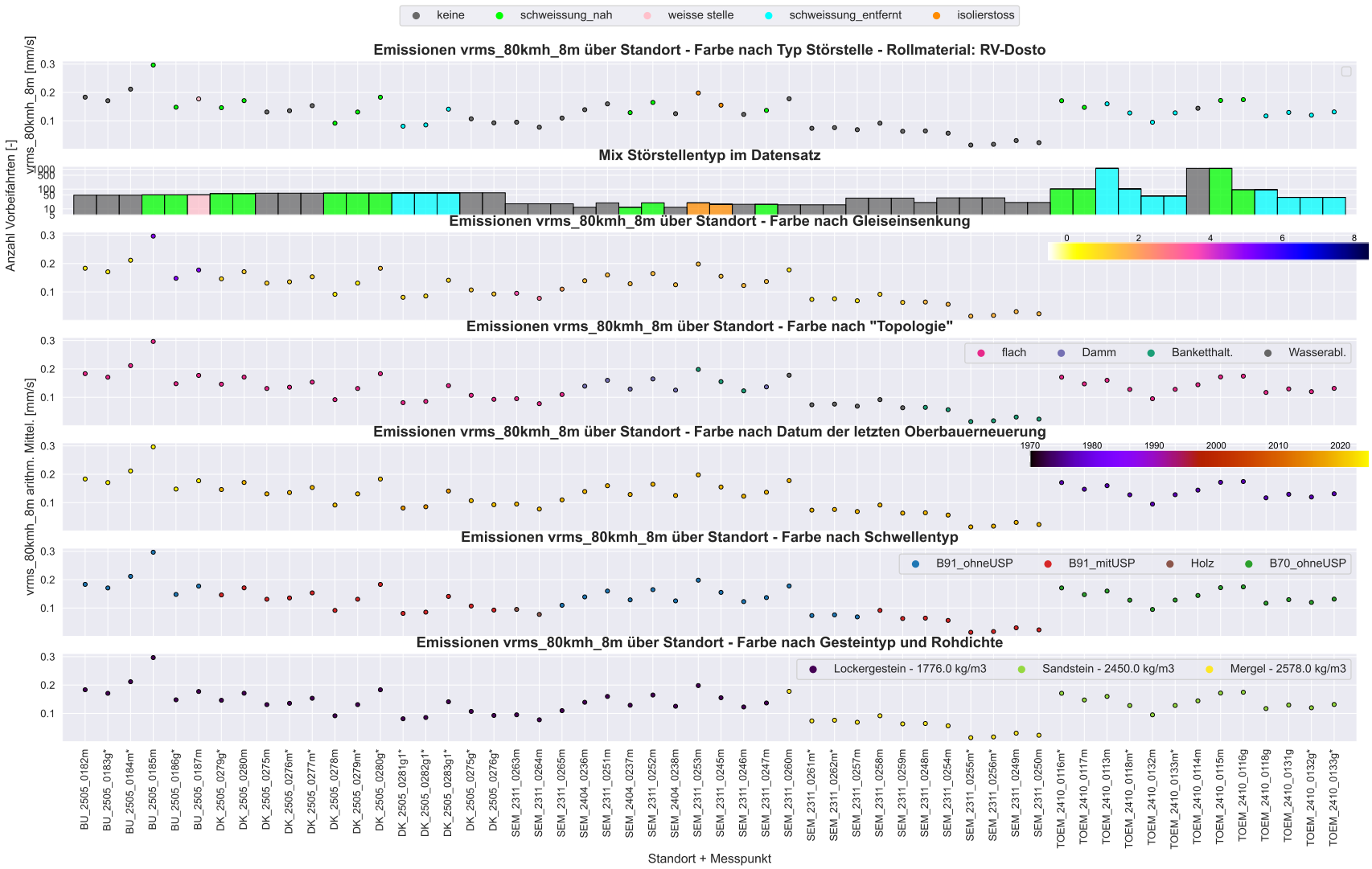


Abbildung C.31.: Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial RV-Dosto - Farbe nach Standortmerkmale

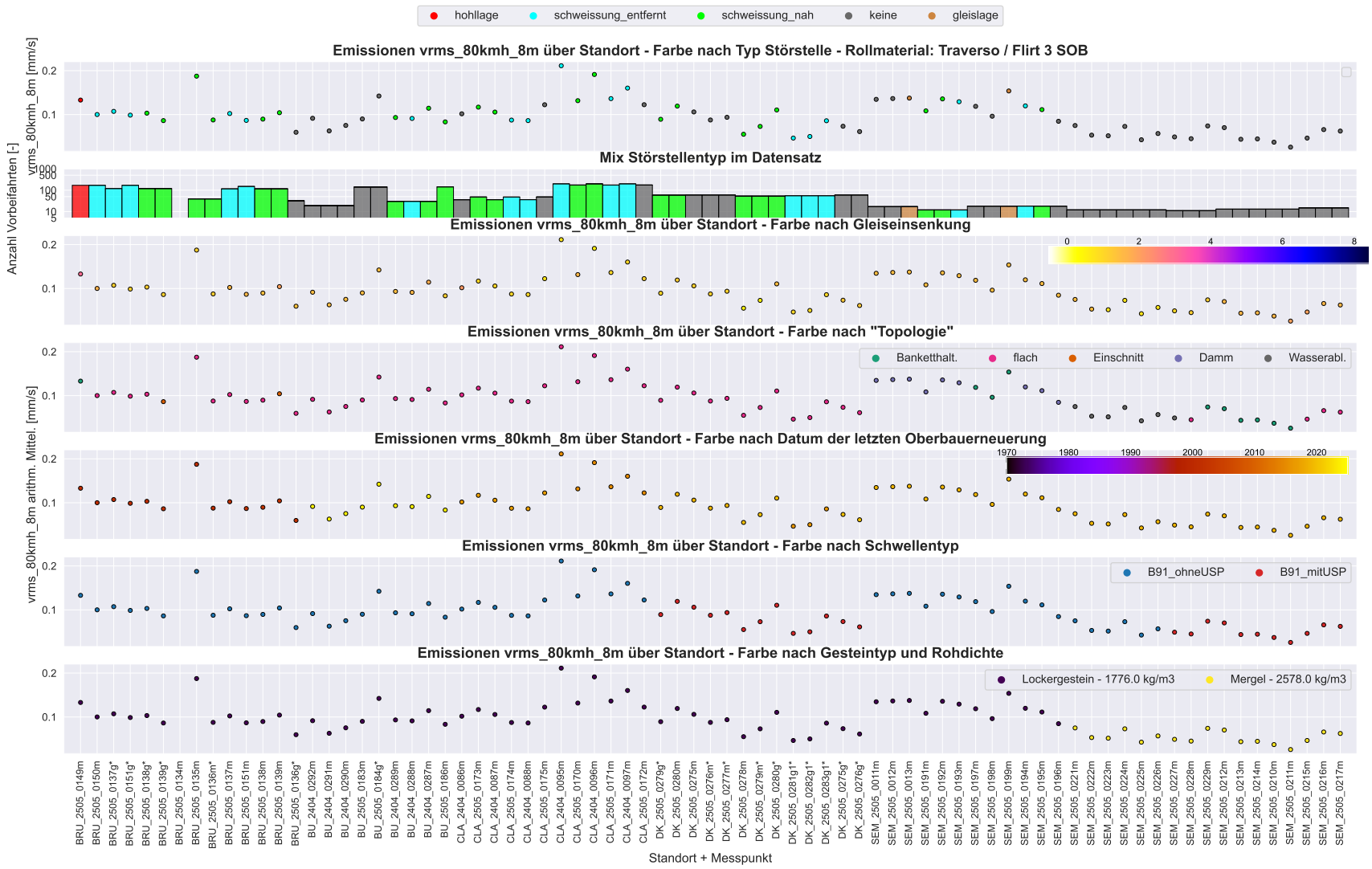


Abbildung C.32.: Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Traverso - Flirt 3 SOB - Farbe nach Standortmerkmale

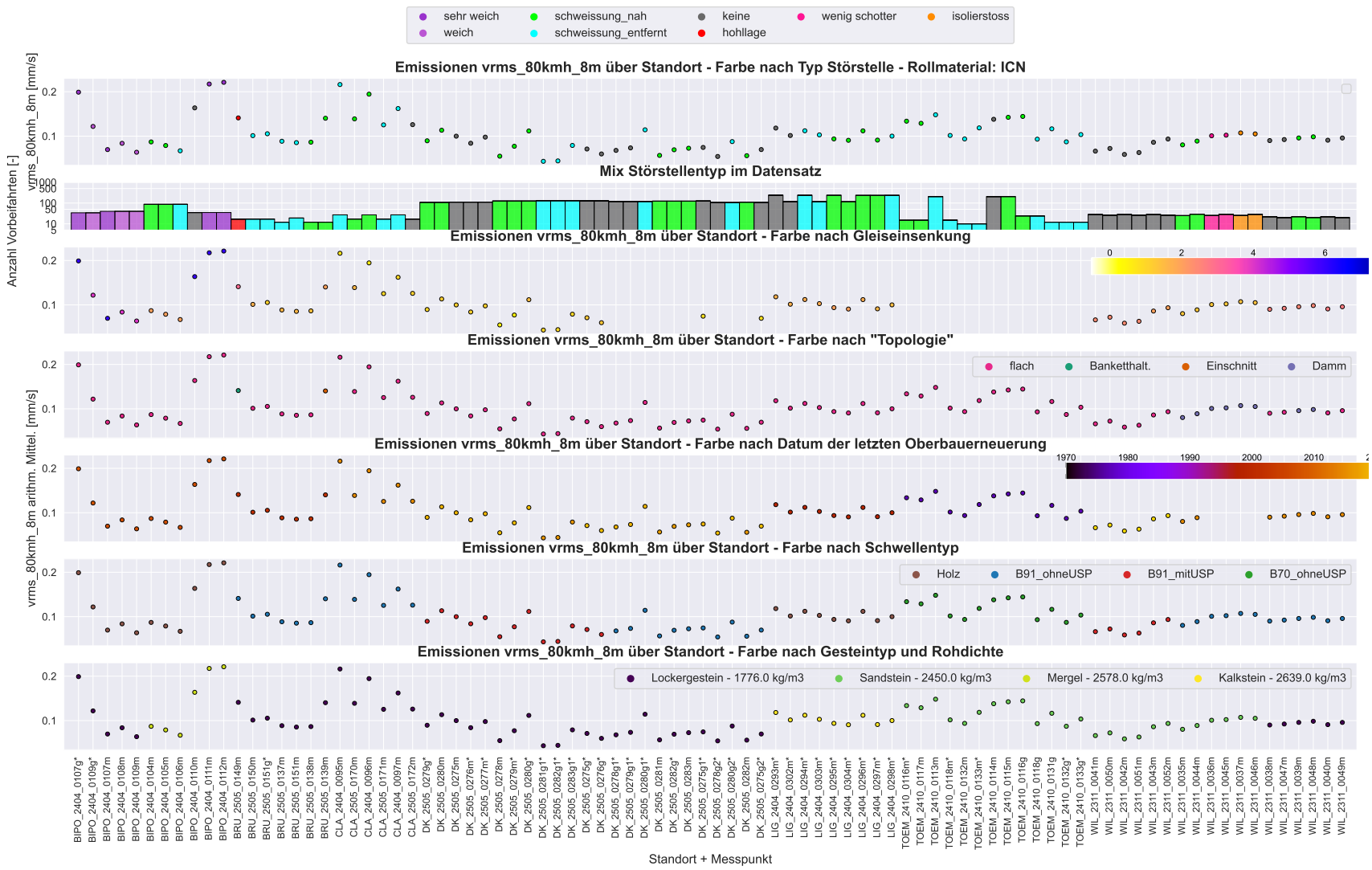


Abbildung C.33.: Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial ICN - Farbe nach Standortmerkmale

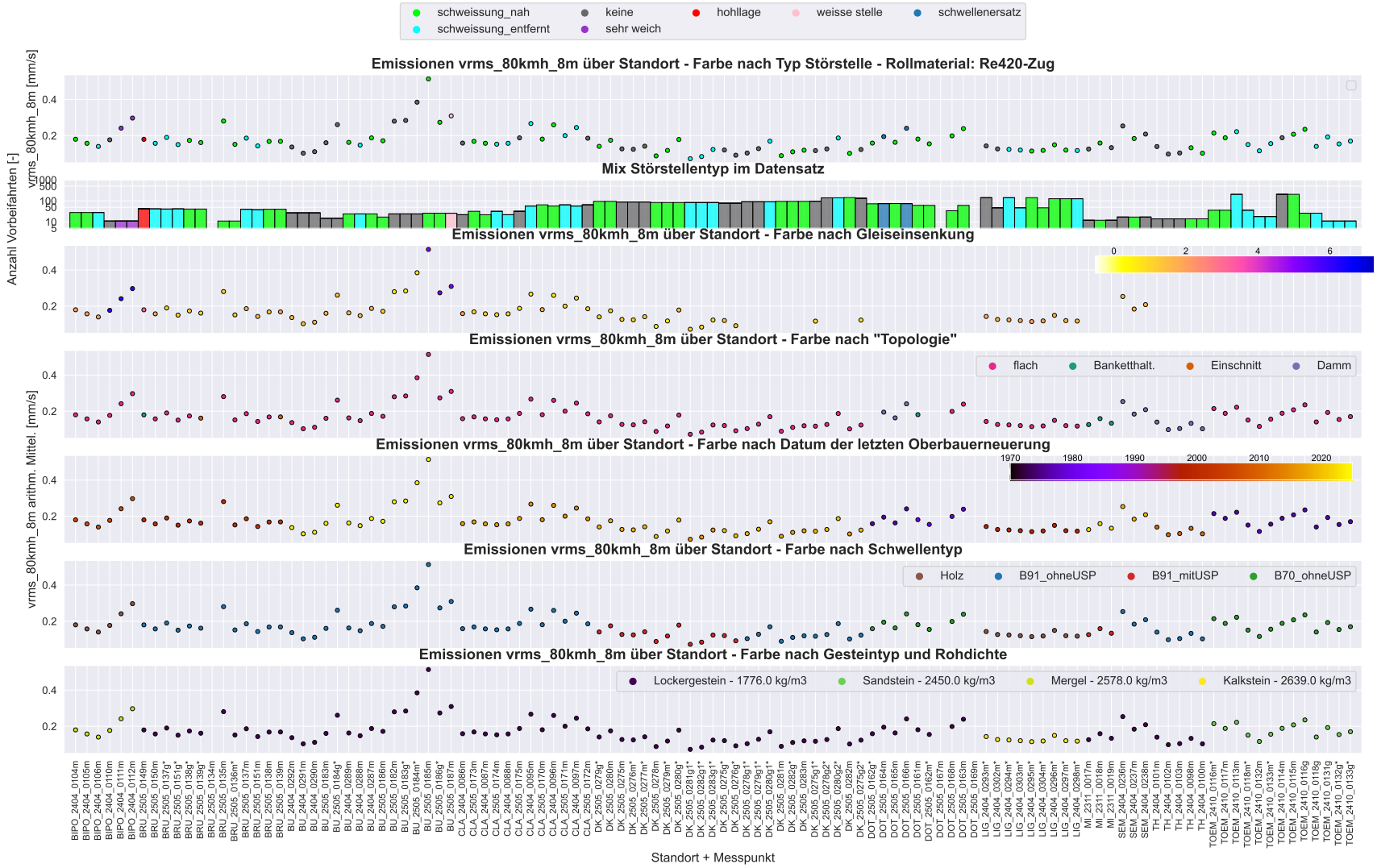


Abbildung C.34.: Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Re420-Zug - Farbe nach Standortmerkmale

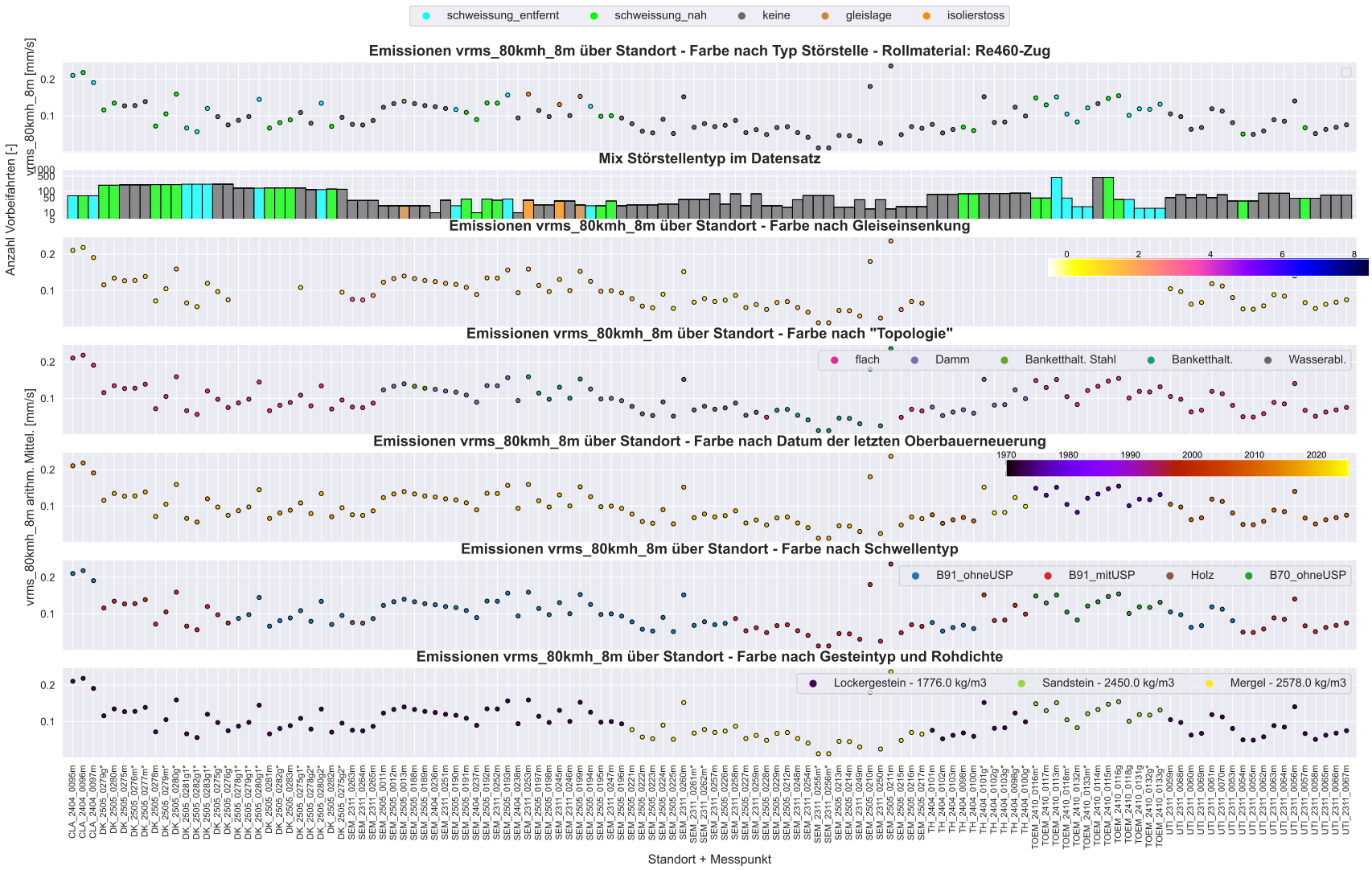


Abbildung C.35.: Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Re460-Zug - Farbe nach Standortmerkmale

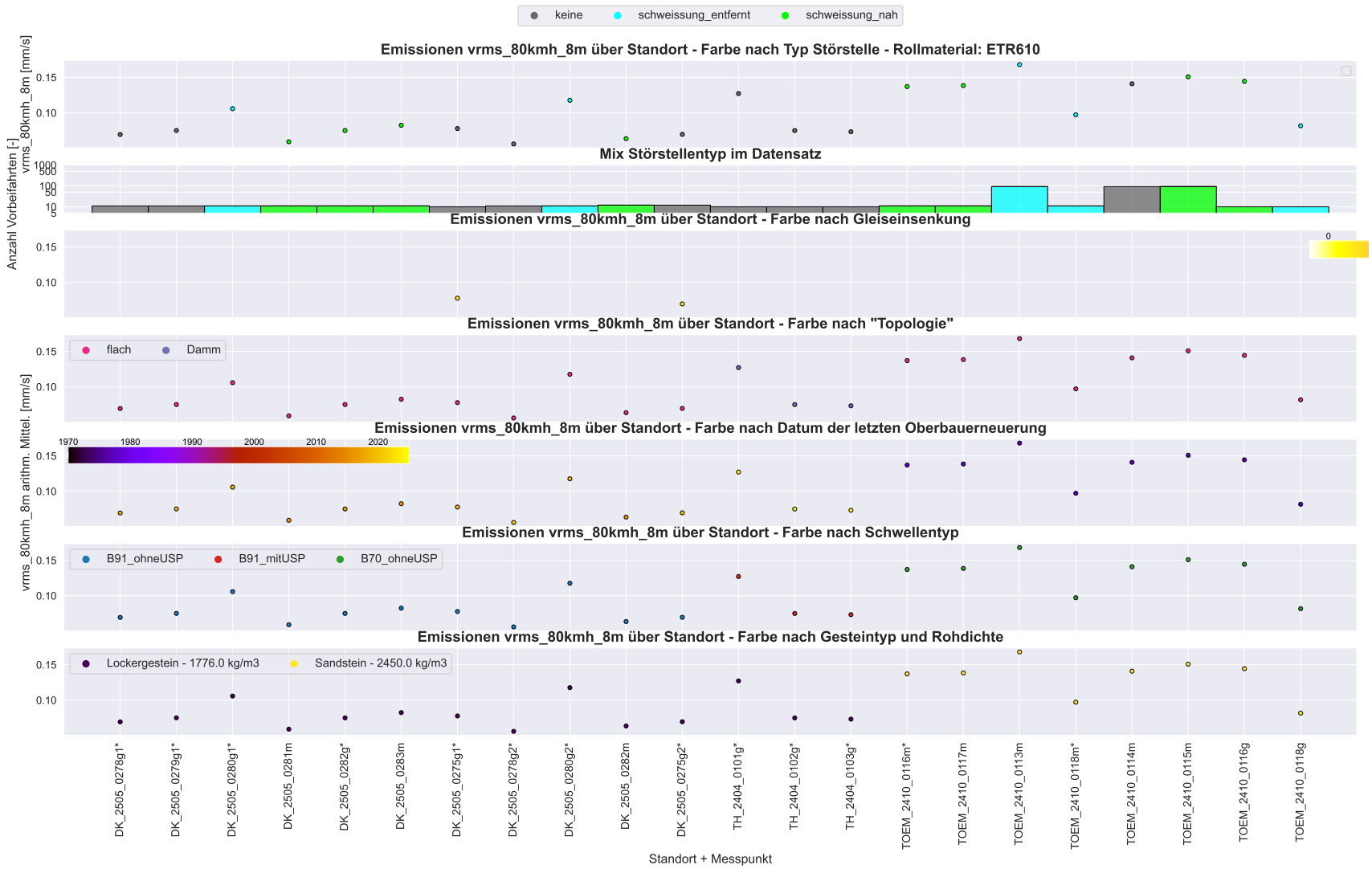


Abbildung C.36.: Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial ETR610 - Farbe nach Standortmerkmale

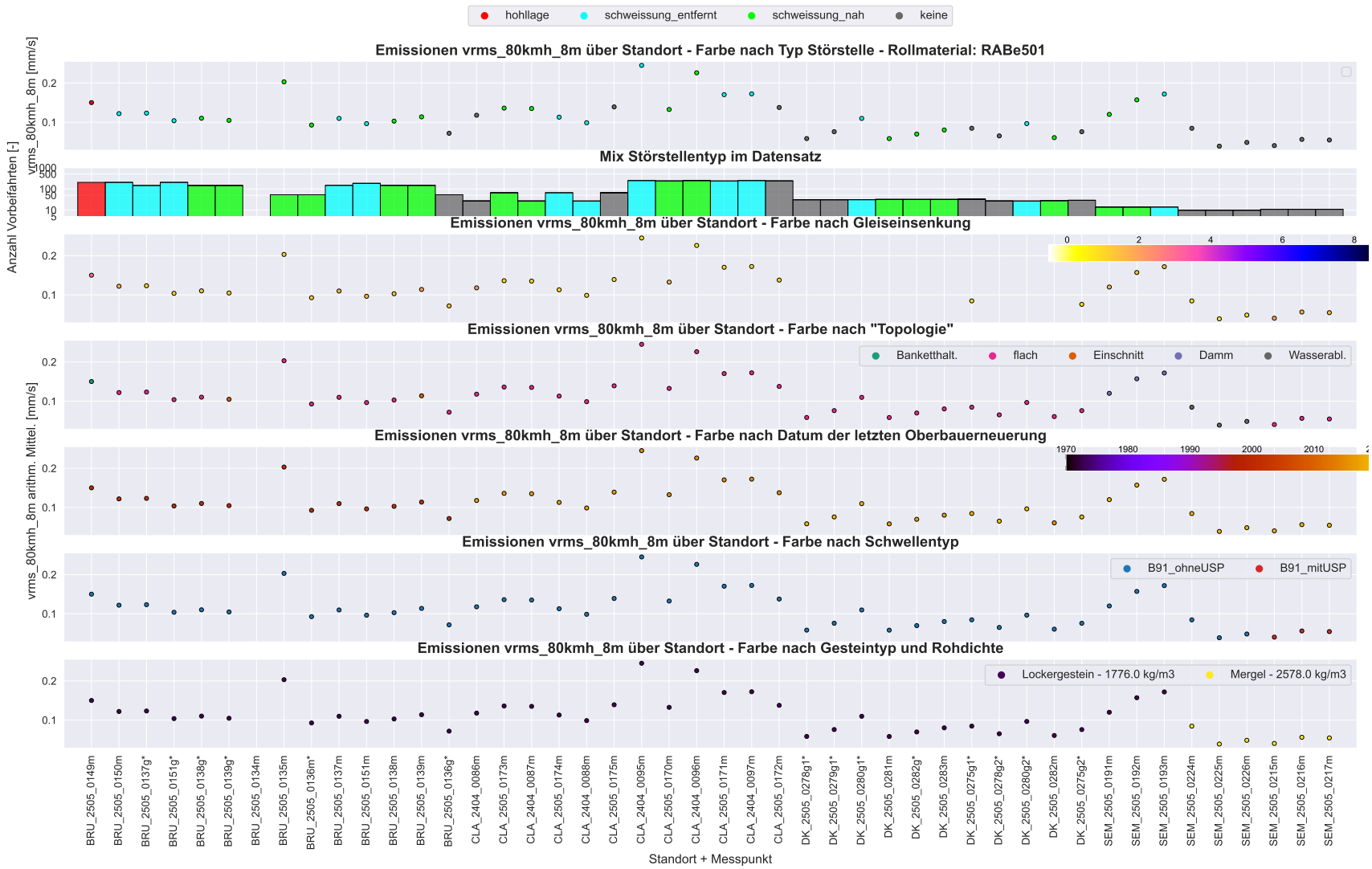


Abbildung C.37.: Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial RABe501 - Farbe nach Standortmerkmale

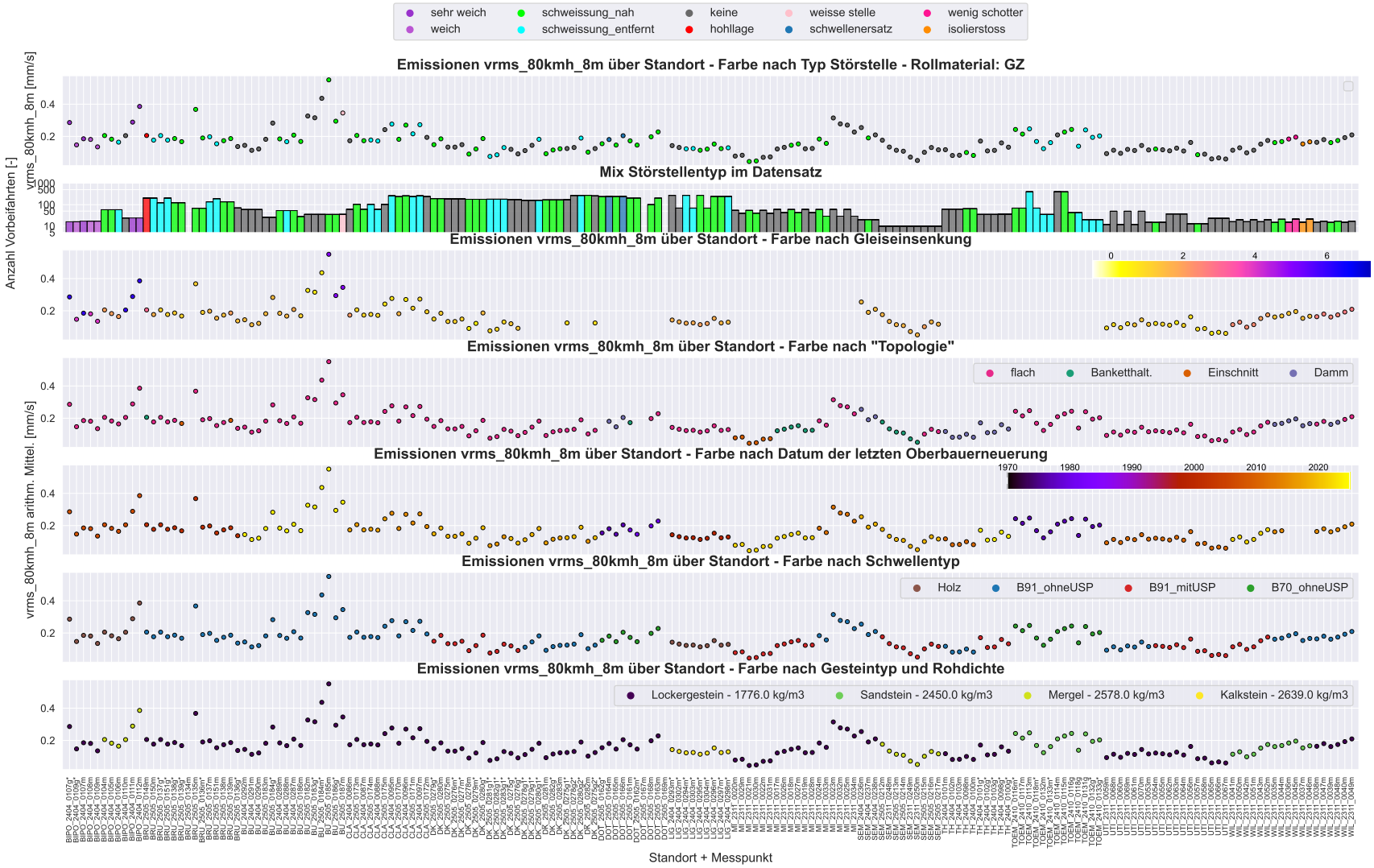


Abbildung C.38.: Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Güterzüge - Farbe nach Standortmerkmale

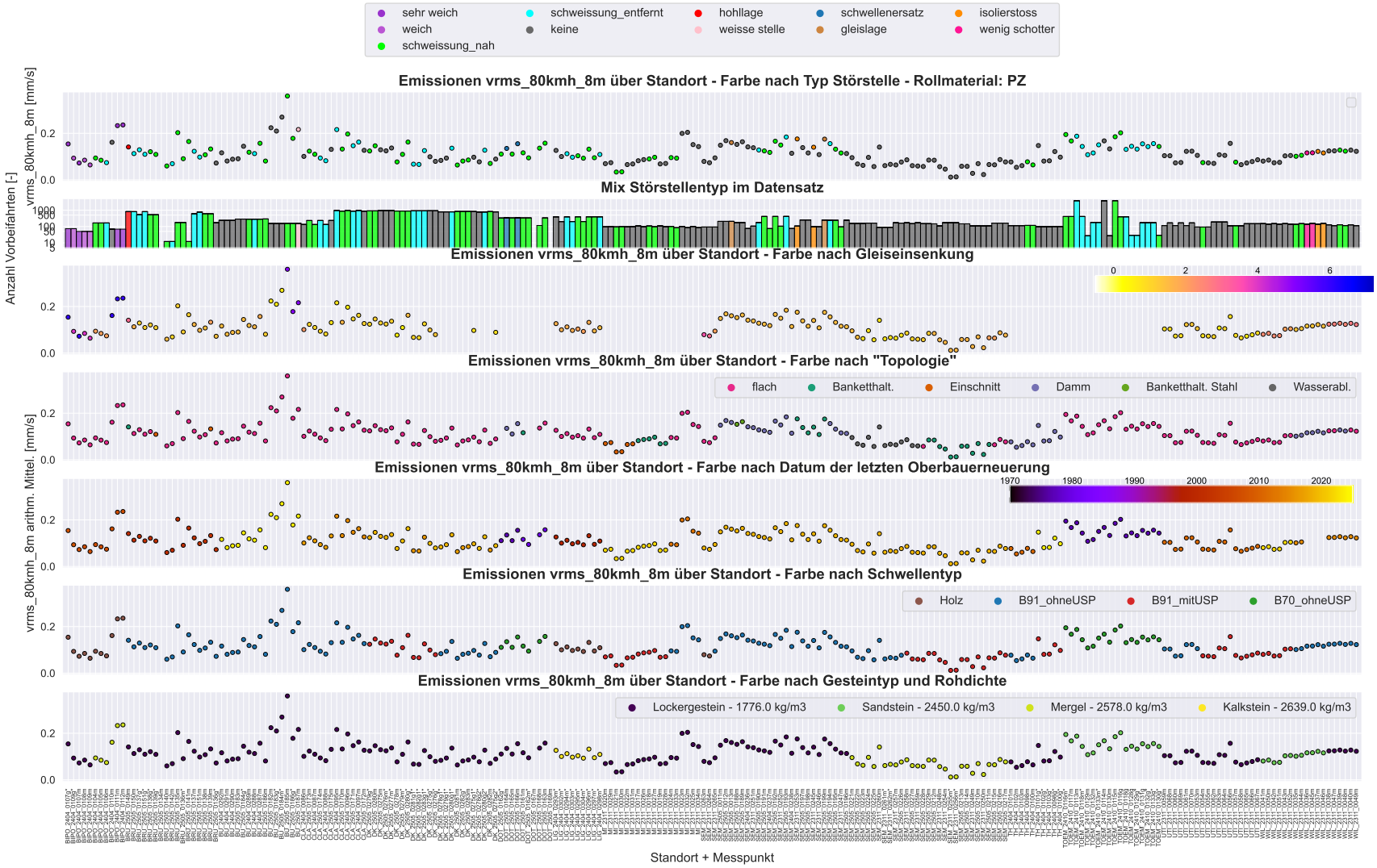


Abbildung C.39.: Fahrzeugemissionen für Metrik: ***vrms_80kmh_8m*** (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Personenzüge - Farbe nach Standortmerkmale

C.4.3. Für vrms_ES_80kmh_8m

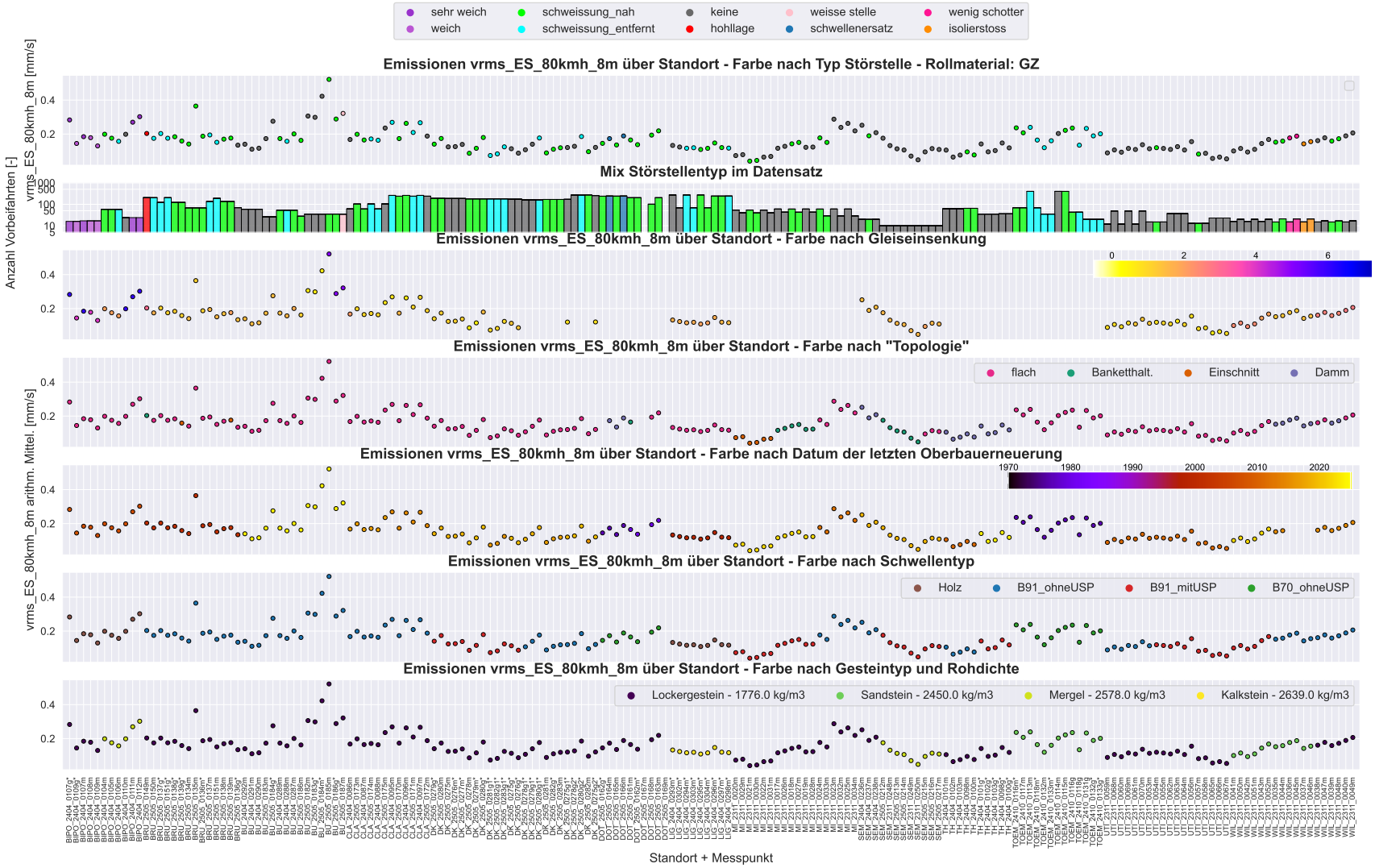


Abbildung C.40.: Fahrzeugemissionen für Parameter: vrms_ES_80kmh_8m (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Güterzüge - Farbe nach Standortmerkmale

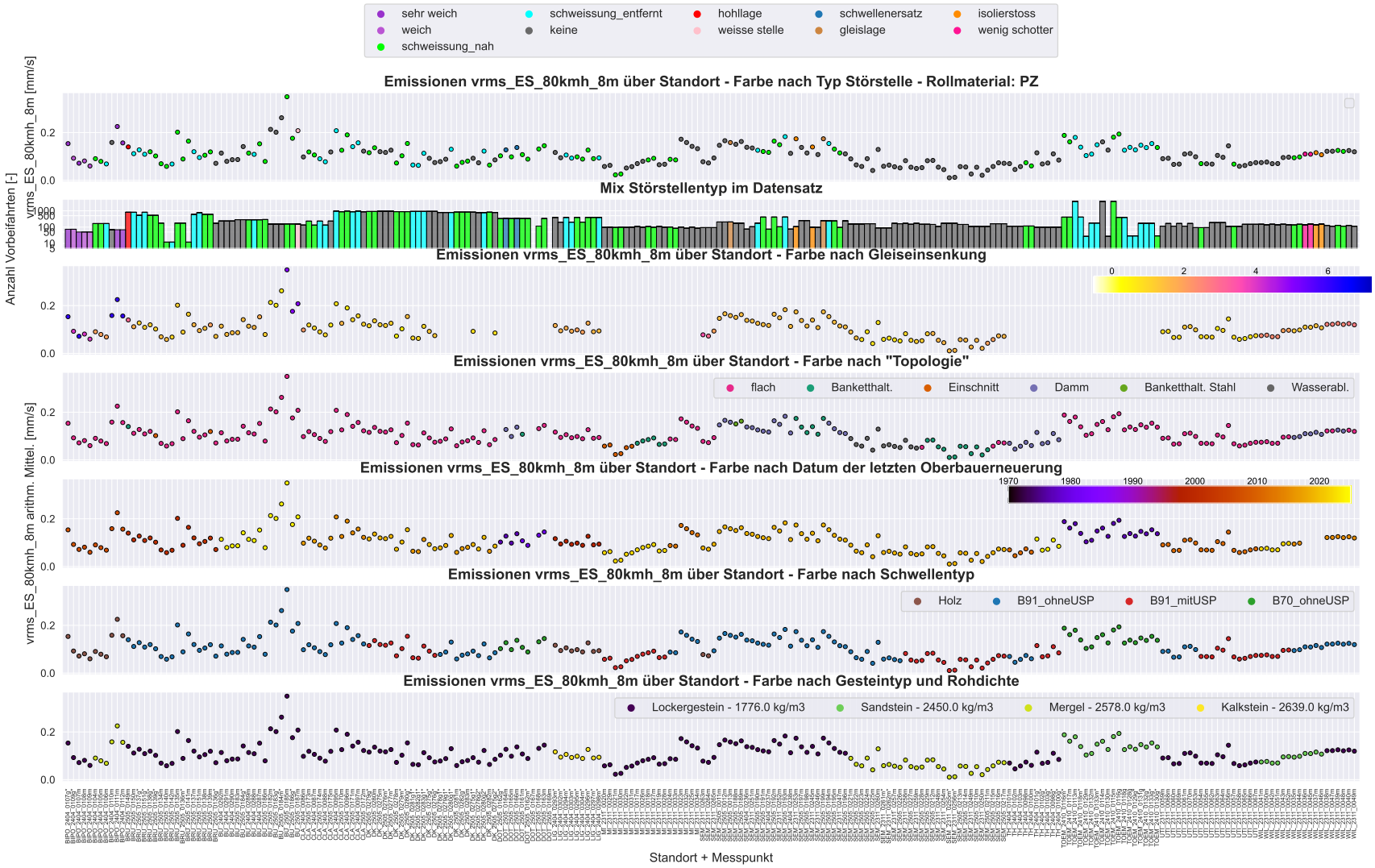


Abbildung C.41.: Fahrzeugemissionen für Parameter: vrms_ES_80kmh_8m (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Personenzüge - Farbe nach Standortmerkmale

C.4.4. Für vrms_KS_80kmh_8m

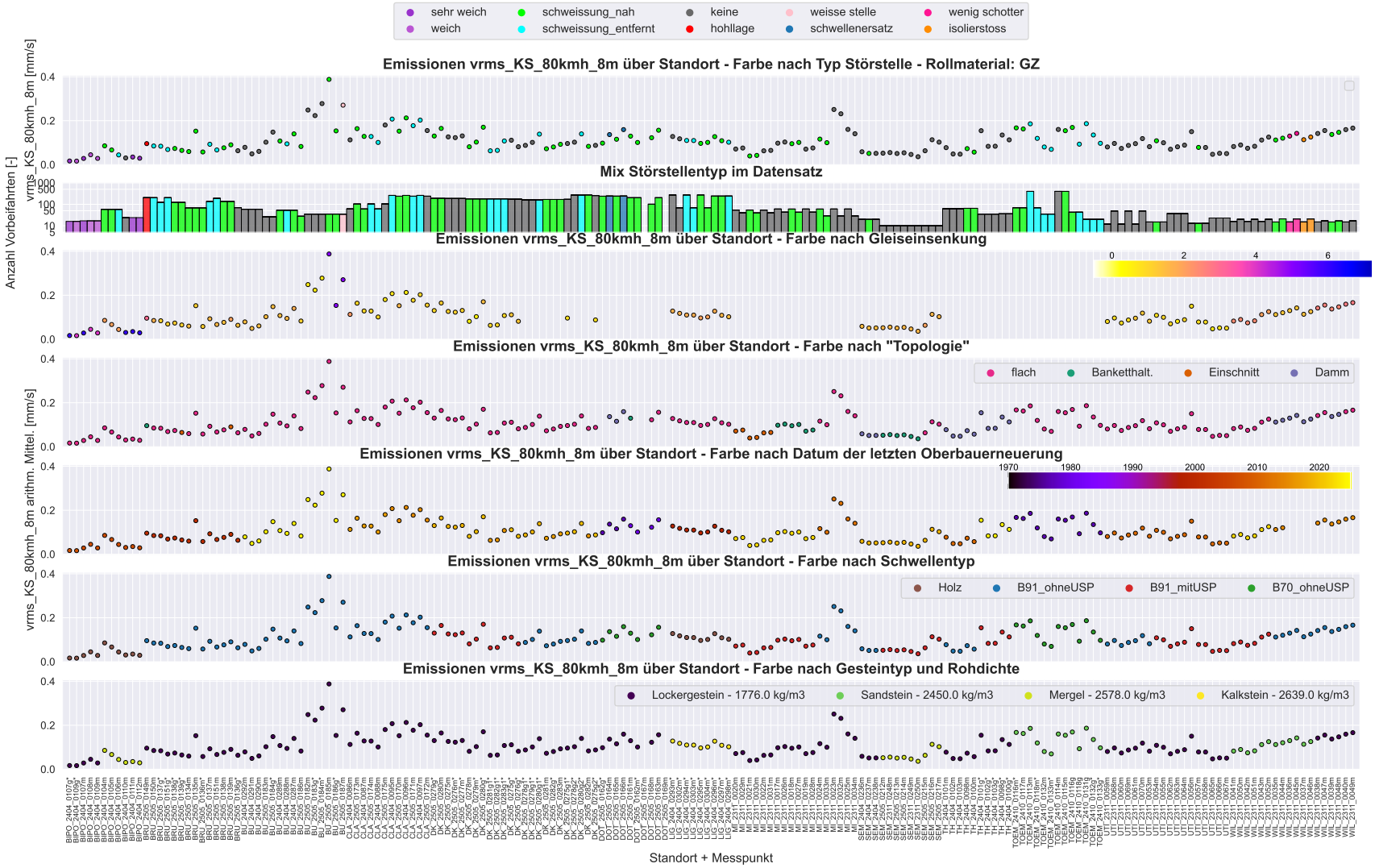


Abbildung C.42.: Fahrzeugemissionen für Parameter: vrms_KS_80kmh_8m (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Güterzüge - Farbe nach Standortmerkmale

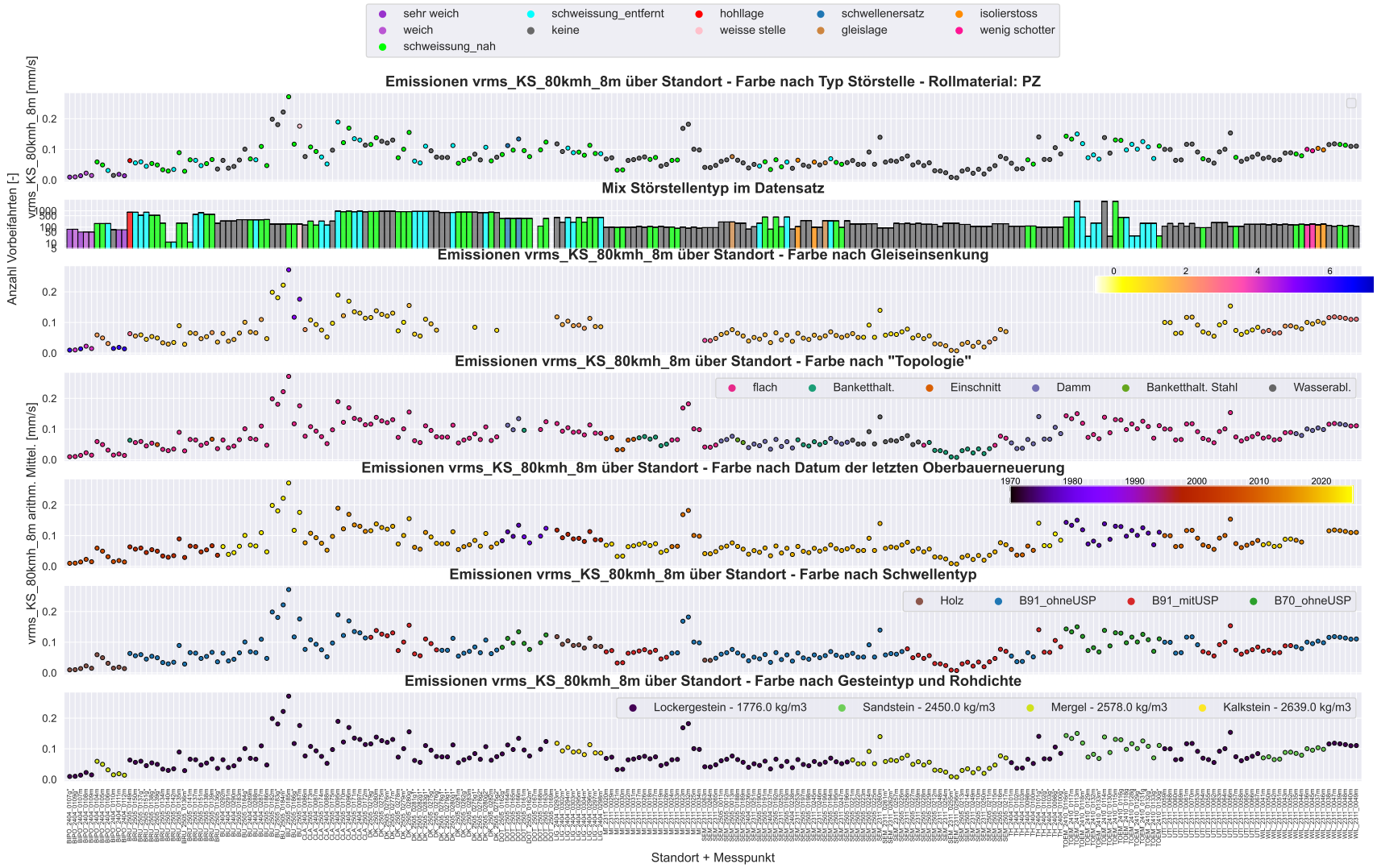


Abbildung C.43.: Fahrzeugemissionen für Parameter: vrms_KS_80kmh_8m (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Personenzüge - Farbe nach Standortmerkmale

C.4.5. Für vmaxRunnRMS_80kmh_8m

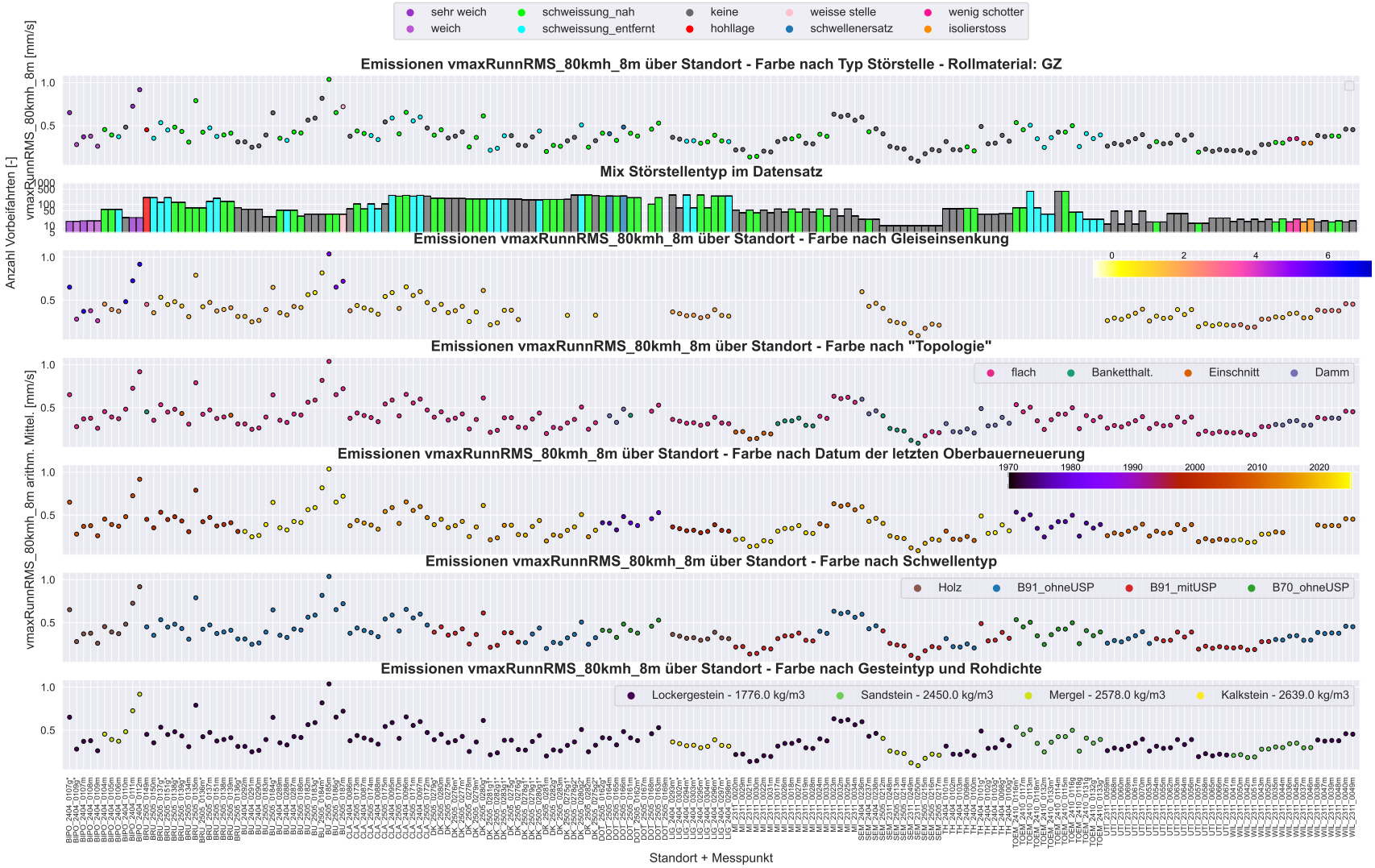


Abbildung C.44.: Fahrzeugemissionen für Parameter: vmaxRunnRMS_80kmh_8m (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Güterzüge - Farbe nach Standortmerkmale

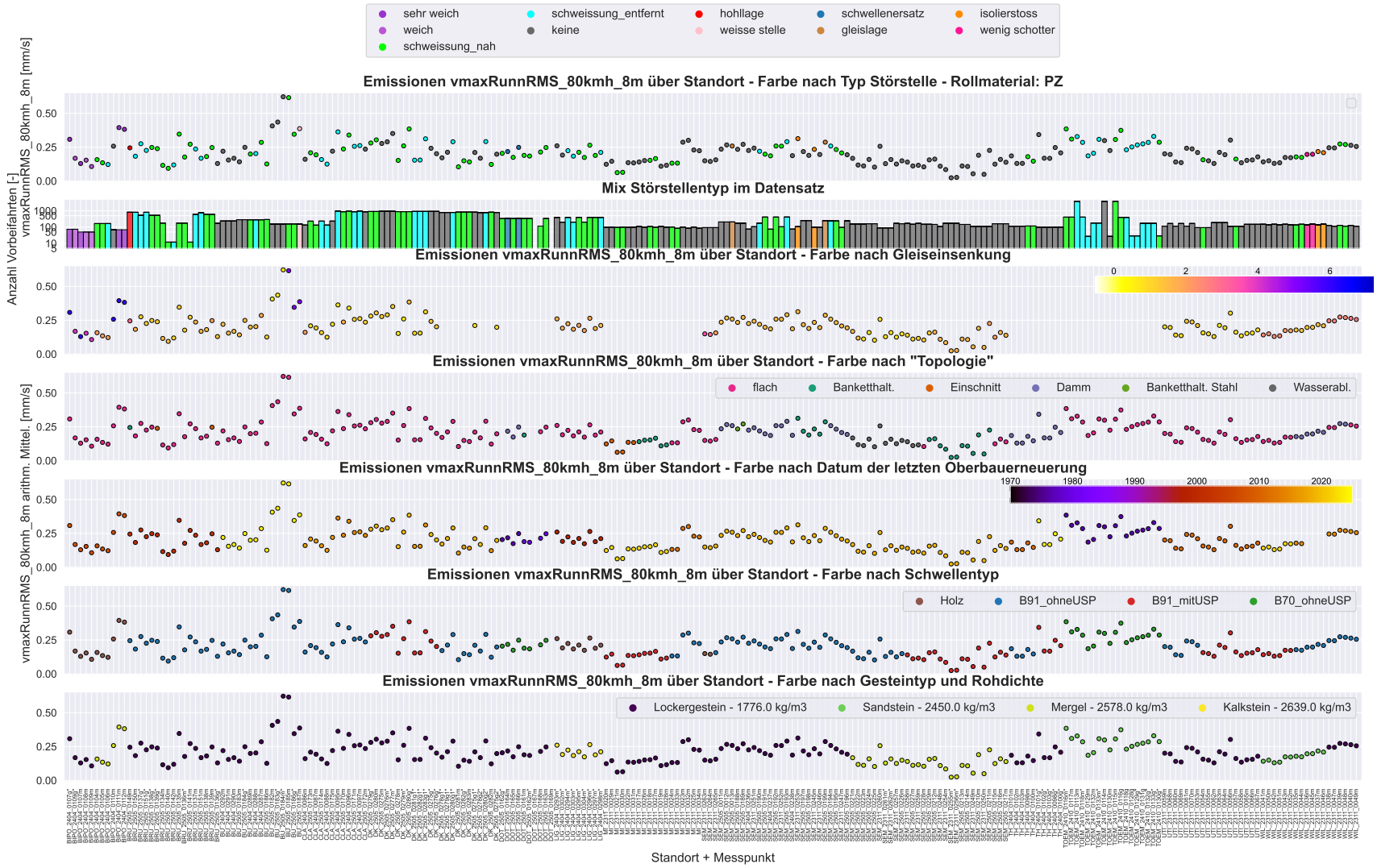


Abbildung C.45.: Fahrzeugemissionen für Parameter: vmaxRunnRMS_80kmh_8m (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Personenzüge - Farbe nach Standortmerkmale

C.4.6. Für vmax_80kmh_8m

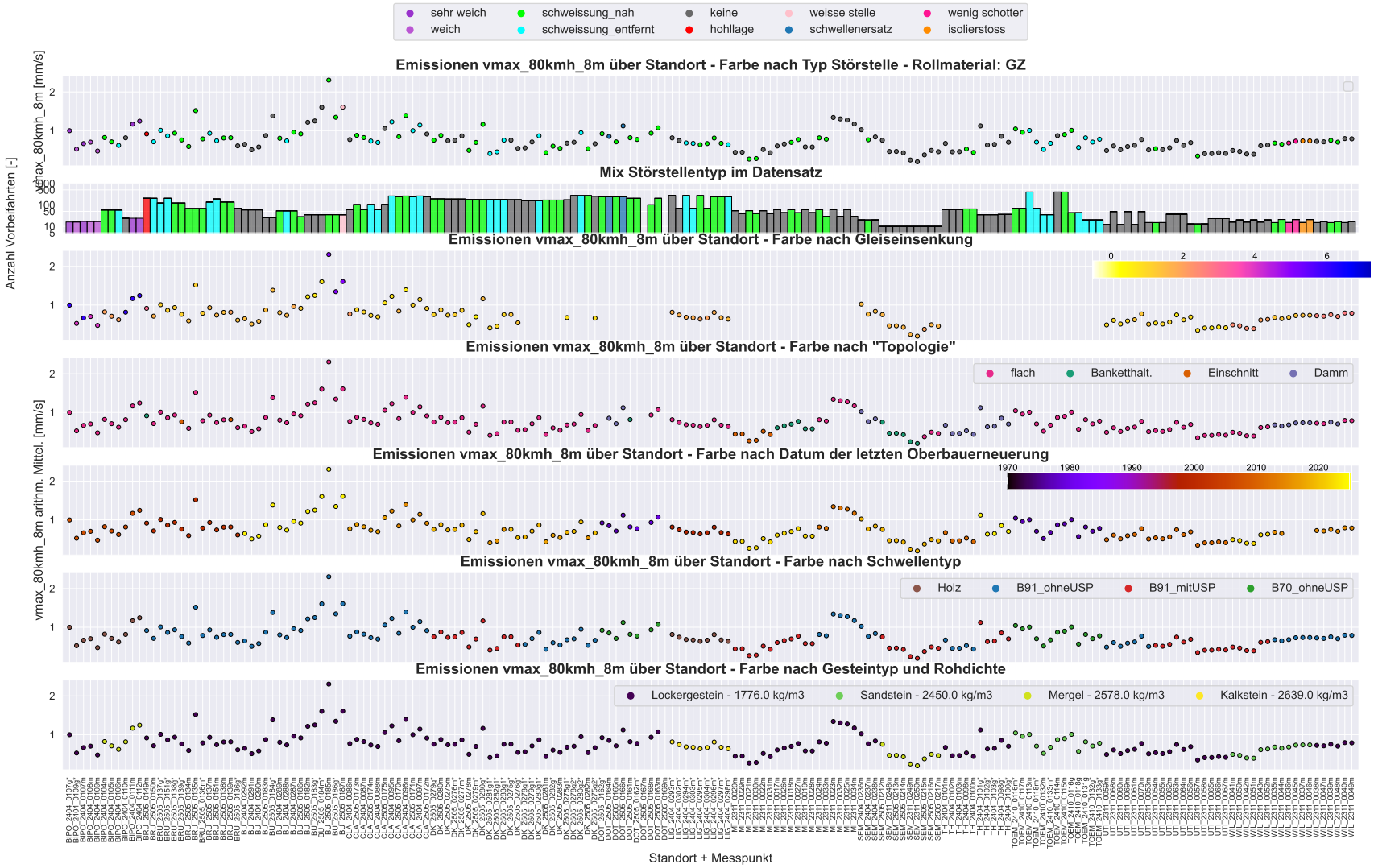


Abbildung C.46.: Fahrzeugemissionen für Parameter: vmax_80kmh_8m (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Güterzüge - Farbe nach Standortmerkmale

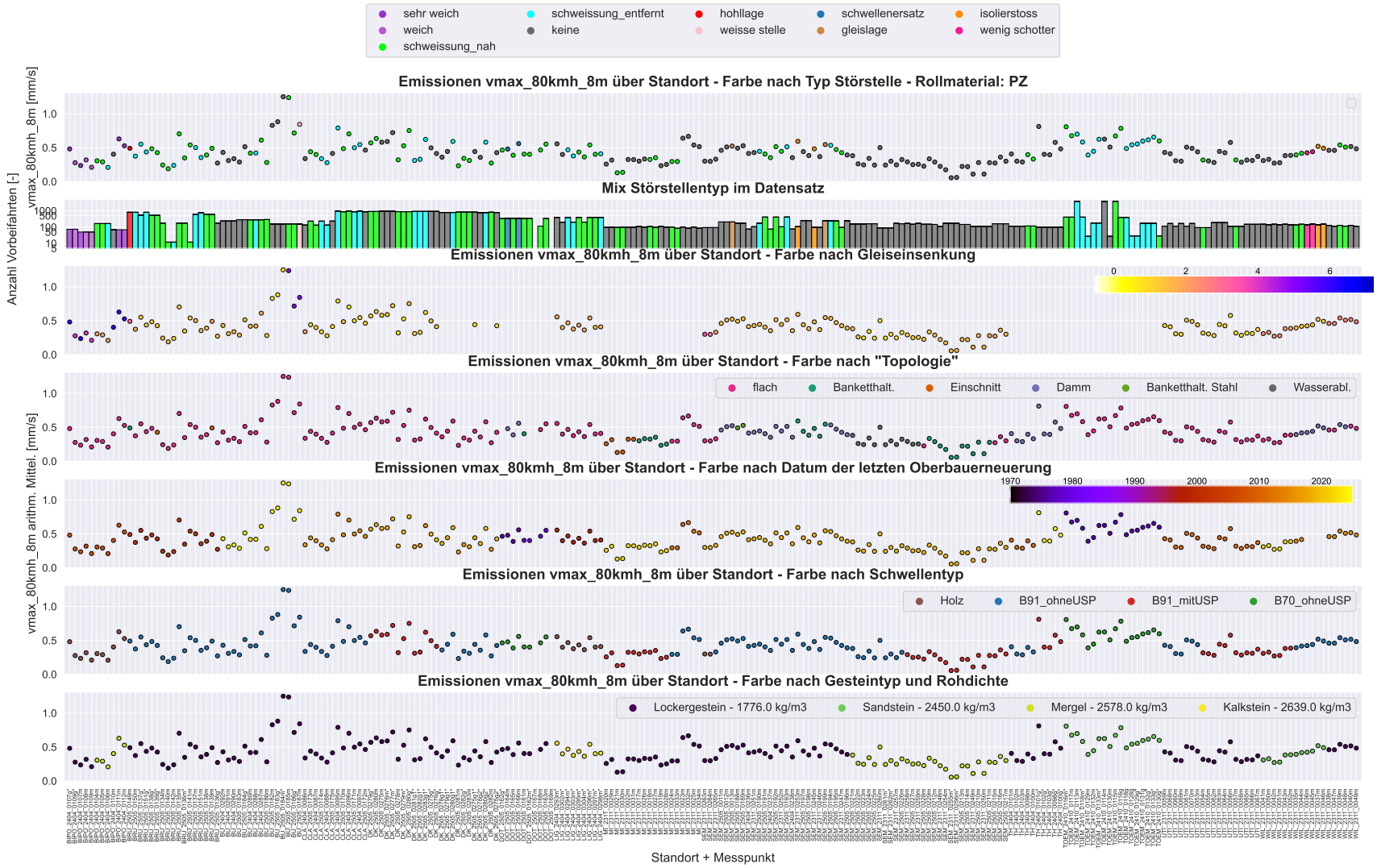


Abbildung C.47.: Fahrzeugemissionen für Parameter: vmax_80kmh_8m (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert) - Mittelwerte nach MPid über MPid für Rollmaterial Personenzüge - Farbe nach Standortmerkmale

C.5. Anwendbarkeit der aktuellen VIBRA-1 Emissionsparameter

In diesem Kapitel wurden die Auswertungen aus Abbildungen 4.25 und 4.27 wiederholt mit der Zuordnung der GTW-Fahrzeuge als Leichtbauzüge anstatt Reisezüge.

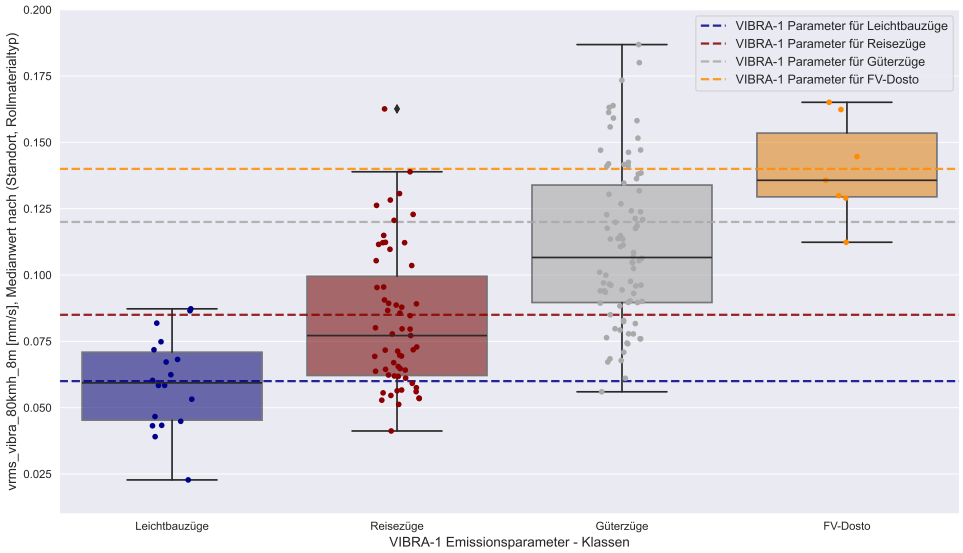


Abbildung C.48.: Vergleich mit den VIBRA-Emissionsparametern nach VIBRA-1-Klasse - vrms_vibra (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert - Medianwerte nach Standort und Rollmaterialtyp) - GTW als Leichtbauzug

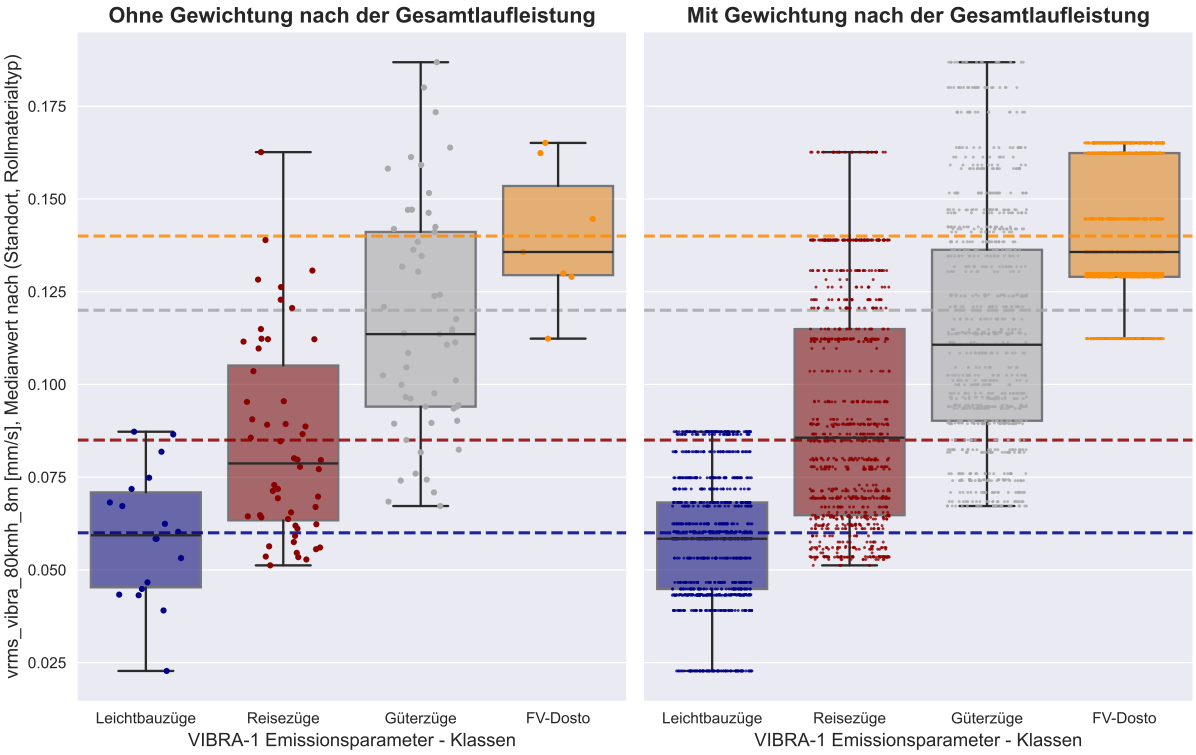


Abbildung C.49.: Vergleich mit den VIBRA-Emissionsparametern nach VIBRA-1-Klasse - vrms_vibra (geschwindigkeits- und abstandskorrigiert - Medianwerte nach Standort und Rollmaterialtyp), ohne und mit Gewichtung nach Gesamtlaufleistung des Rollmaterialtyps für das Jahr 2024 - GTW als Leichtbauzug