

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

Laurence Conreaux, SBB AG, Bern, CH

### **Abstract**

Die SBB hat ab 2023 gezielt Emissionsmessungen von Schienenfahrzeugen an 15 Standorten im Netz durchgeführt, um Unterschiede in Rollmaterial, Oberbau und Unterbau zu untersuchen. Dabei wurden etwa 50.000 Zeitsignale von Zugdurchfahrten in 8m-Abstand vom Gleis erfasst. Die erhobenen Daten wurden durch den Abgleich mit Betriebsdaten den jeweiligen Fahrzeugnummern und Rollmaterialtypen zugeordnet, die Fahrgeschwindigkeiten wurden ebenfalls ermittelt. Diese umfassende Datenerfassung ermöglicht eine detaillierte Analyse und einen Vergleich der Emissionen verschiedener Rollmaterialtypen untereinander und an unterschiedlichen Standorten.

Das empirische Modell VIBRA-1, das für die Prognose von Erschütterungs- und Körperschallimmissionen in Gebäuden eingesetzt wird, unterscheidet lediglich drei Varianten für Rollmaterialemissionen – Leichtbauzüge, Reisezüge und Güterzüge. Diese Einteilung basiert auf Messdaten von Flotten, die heute teilweise nicht mehr in Betrieb sind und durch neues Rollmaterial ersetzt wurde. Der vorliegende Beitrag präsentiert statistische Auswertungen, welche die Grössenordnungen der VIBRA-1 Fahrzeugparameter für die heute verkehrenden Flotten überwiegend bestätigen können. Gleichzeitig wird jedoch auch die erhebliche Streuung sichtbar, die sowohl innerhalb der Rollmaterialtypen als auch zwischen den verschiedenen Standorten auftritt. Darüber hinaus wird versucht, diese Unterschiede durch spezifische Fahrzeugeigenschaften und standortspezifische Faktoren zu erklären.

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

**Laurence Conreaux, SBB AG**

26. Symposium für Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen  
27. Juni 2025, Empa Dübendorf

# 1 Einleitung

Die Software VIBRA-1 ist in der Schweiz ein 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 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 über einem Jahrzehnt bestimmt 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 SBB hat in den letzten zwei Jahren gezielt Emissionsmessungen von Schienenfahrzeugen an 15 Standorten im Netz durchgeführt, um Unterschiede in Rollmaterial, Oberbau und Unterbau zu untersuchen. Dabei wurden über 50.000 Zeitsignale von Zugdurchfahrten erfasst, die eine solide Grundlage für einen Vergleich mit den bestehenden VIBRA-Parametern bietet. Ziel dieses Beitrags ist es, die Angemessenheit der VIBRA-1 Parameter im Kontext der heutigen Rollmaterialtypen zu überprüfen und die Ursachen für mögliche Abweichungen 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.

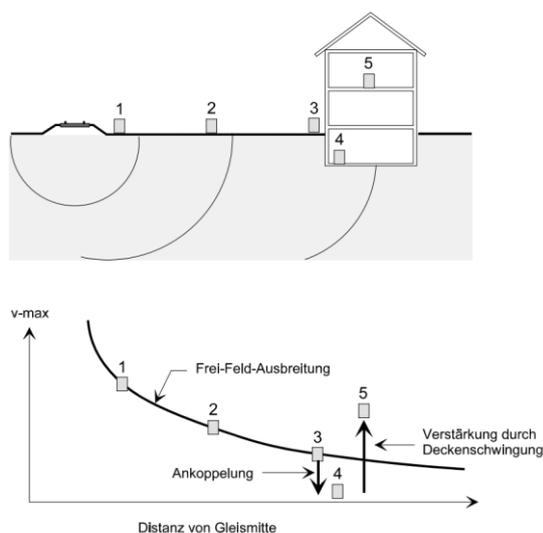
Dynamische Anregungsmechanismen entstehen ebenfalls aufgrund von Steifigkeitsänderungen der Fahrbahn, die eine örtlich unterschiedliche Einsenkung der Schiene bewirken. Konkret tritt dieser Mechanismus periodisch mit der Schwellenfachfrequenz aufgrund der punktuellen Lagerung der Schwellen auf, oder stochastisch bei einer Änderung der Bettungssteifigkeit, zum Beispiel an Übergängen im Ober- und 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 [1][2][3][4].

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 [4][5].

## 2.2 Das Prognosemodell VIBRA-1

Beim Aus-, Um- oder Neubau von Eisenbahninfrastruktur müssen in der Schweiz Richtwerte bezüglich Erschütterungen und abgestrahltes Körperschalls gemäss der nationalen Weisung BEKS [6] und der Checkliste Umwelt für Eisenbahnanlagen [7] Kapitel 5.14 eingehalten werden. Diese fordern eine Prognose zur erwarteten Erschütterungs- und Körperschallwerte 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 1: Schematische Darstellung des Abminderungsverhaltens von Erschütterungen [8]**

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

$$v_j = v_{0,j} \cdot \frac{G}{G_0} \cdot F_t \cdot F_s \cdot F_b \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^m \cdot F_a \cdot F_d \quad (1)$$

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 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)
- $m$ : Exponent für geometrische und Materialdämpfung im Boden
- $F_a$ : Ankopplungsfaktor Gebäude – Baugrund
- $F_d$ : Faktor für Eigenschwingung der Geschossdecken

Die verschiedenen Parameter wurden statistisch 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 [8]. Die Validierung des VIBRA-1 Modells aus dem Jahr 2016 ist im Bericht [9] dokumentiert und berücksichtigt Daten aus den Jahren 2001 bis 2014: daher sind die seitdem eingeführten Rollmaterialtypen nicht berücksichtigt.

In diesem Beitrag werden nur Fahrzeugemissionen betrachtet, d.h. nur bis zum Frei-Feld-Messpunkt (2) der Abbildung 1. Die Datengrundlage für die Analyse beruht ausschliesslich auf Messungen an offenen Strecken (keine Messungen bei Tunneln oder Brücken), ausserhalb von Weichenstrassen und es werden nur Messungen in ca. 8 m Abstand der Gleisachse betrachtet.

Somit sind die folgenden Parameter aus Gleichung ( 1 ) von Interesse:

$$v_j = v_{0,j} \cdot \frac{G}{G_0} F_t \cdot F_s \quad ( 2 )$$

Der Einfluss der Trasse (Gleisquerschnitt) und der Schienenbesonderheiten wird in dieser Arbeit nicht als getrennter Parameter betrachtet, sondern in Kapitel 4.5 gemeinsam untersucht. Die lineare Abhängigkeit des Effektivwertes von der Fahrgeschwindigkeit  $G$  wird in Kapitel 4.3 untersucht.

Der Vergleich der Messwerte erfolgt mit den in [9] festgelegte Emissionsparametern für drei Rollmaterialkategorien:

- Reisezüge:  $v_{0,rms} (8m, 80km/h) = 0.085 \text{ mm/s}$
- Leichtbauzüge:  $v_{0,rms} (8m, 80km/h) = 0.060 \text{ mm/s}$
- Güterzüge:  $v_{0,rms} (8m, 80km/h) = 0.12 \text{ mm/s}$

## 3 Methodik

### 3.1 Messdaten

Die SBB hat zwischen dem Herbst 2023 und Sommer 2025 gezielt Emissionsmessungen an 15 Standorten im Netz durchgeführt, um Unterschiede in Rollmaterial, Oberbau und Unterbau zu untersuchen. Dabei wurden über 50.000 Zeitsignale von Zugsdurchfahrten erfasst. Die Schwinggeschwindigkeiten wurden ausschliesslich in vertikaler Richtung erfasst. Die Sensoren wurden bis auf einige Ausnahmen in 8m-Abstand von der Gleisachse des Messgleises in Anlehnung an [4][5] platziert. 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 4kHz. Die Sensoren wurden auf ca. 40 cm tief im Boden eingeschlagene Erdspieße geschraubt.



Abbildung 2: Verwendete Messequipment und Erdspieß

### 3.2 Datenverarbeitung

Die erhobenen Daten wurden durch den Abgleich mit Betriebsdaten den jeweiligen Fahrzeugnummern und Rollmaterialtypen zugeordnet. Je nach Standort stammen diese Daten von den Zugkontrollrichtungen, aus dem RCS-System («Railway Control System», abgefragt über die SBB interne Anabel-Datenbank) und am Standort Sempach aus der Fahrbahnlabor-Datenbank [11]. Weitere Daten wie die Fahrgeschwindigkeit und die Zuglänge werden ebenfalls aus diesen Datenbanken abgerufen oder abgeleitet.

Aus den Zeitsignalen wurden folgende Metriken abgeleitet:

- $vrms\_vibra$  [mm/s] («VIBRA-Methode»): „Root-Mean-Square“-Wert der Schwinggeschwindigkeit einer Zugdurchfahrt (Mittelung über die effektive Vorbeifahrtszeit des Zuges plus ca. 5s 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.
- $vrms$  [mm/s] in ihrer üblichen Definition wie zum Beispiel in [5] vorgegeben und wie in der Fahrbahnlaboratenbank [10] umgesetzt: der „Root-Mean-Square“-Wert der Schwinggeschwindigkeit einer Zugdurchfahrt, gemittelt über die Vorbeifahrtszeit der effektiven Zuglänge.

In jeder Grafik dieses Beitrags wird auf den Achsen angegeben, welche Variante des Effektivwerts dargestellt wird.

Anschliessend wurden die Daten der verschiedenen Messkampagnen, -standorte und Messpunkte in eine Matrix zusammengeführt.

- Es wurden ausschliesslich Messpunkte mit einem Abstand von 7.2 bis 8.5 m zur Mitte des Messgleises berücksichtigt. Vorbeifahrten auf dem Gegengleis wurden ausgeschlossen.
- Es wurden nur Messpunkte berücksichtigt, bei welchem eine Mindestanzahl an Vorbeifahrten per Kategorie erfasst wurden, diese Mindestanzahl variiert je nach Grafik und wird jeweils angegeben.
- Informationen zu bekannten Auffälligkeiten im Oberbau oder im Unterbau, wie das Vorhandensein eines Isoliertosses, einer Hohllage, von Schweissungen oder die Gleiseinsenkungen, wurden den betroffenen Messpunkten zugeordnet.
- Analog wurden Fahrzeugmerkmale, die in den Analysen herangezogen werden, den Rollmaterialtypen bzw. den einzelnen Vorbeifahrten zugeordnet. Konkret sind dies folgende Merkmale:
  - die unabgefederte Radsatzmasse, umgerechnet für den ganzen Zug aus den Angaben nach Drehgestelltypen.
  - das Fahrzeugalter als Anzahl Jahre seit der Inbetriebnahme
  - ein- oder doppelstöckiges Fahrzeug

Diese Merkmale werden in den Ergebnisgrafiken des Kapitels 4.4 mit unterschiedlichen Farben dargestellt.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Reproduzierbarkeit der Messungen eines Zugindividuums

Für die späteren Auswerteschritte erschien 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 zu konsistenten Effektivwerten führen. Dies wird anhand eines Beispiels in Abbildung 3 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.

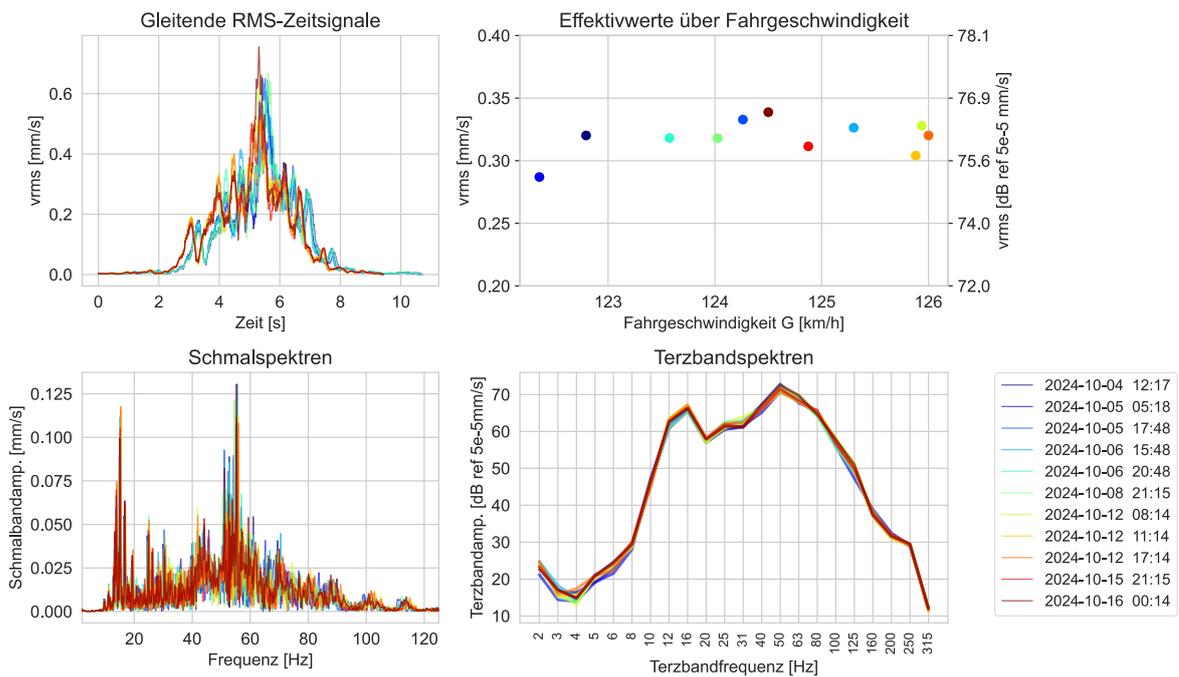
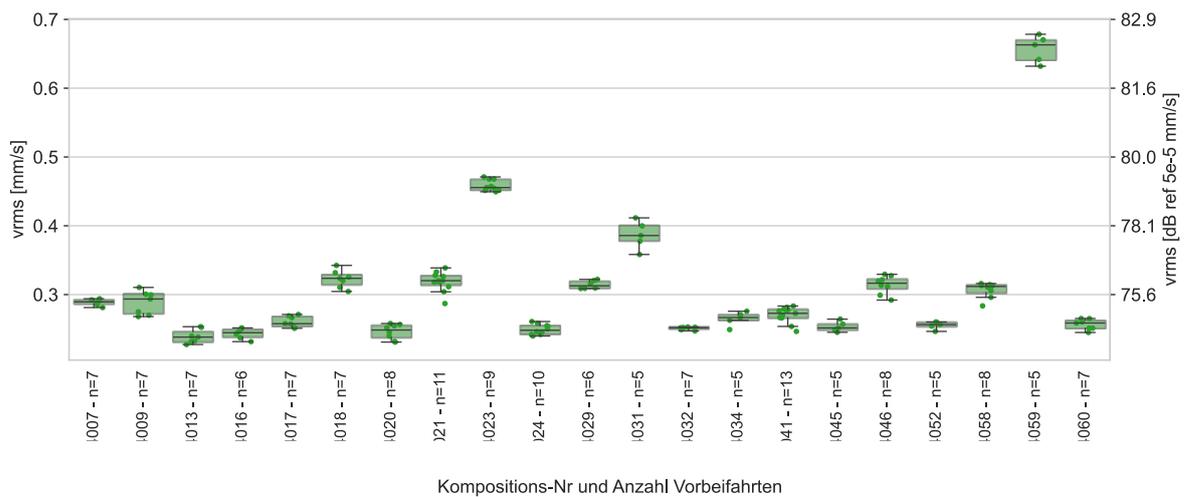


Abbildung 3: Erschütterungsemissionen vom Zugindividuum Nr. xx021 innerhalb von 12 Tagen in Tössmühle -  $v = 122 - 126$  km/h

### 4.2 Variabilität innerhalb eines Rollmaterialtyps

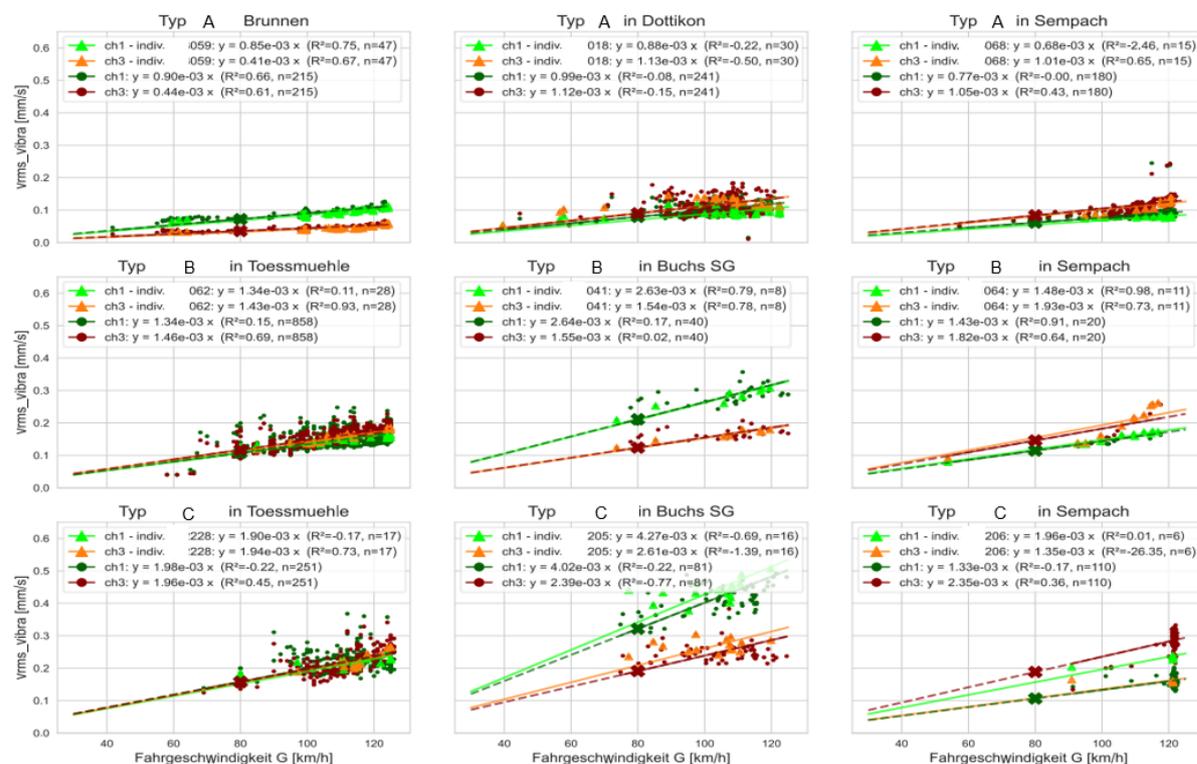
Werden alle Kompositionen des gleichen Rollmaterialtyps bei gleichbleibender Fahrgeschwindigkeit betrachtet, wie im vorangegangenen Kapitel am Beispiel von einem ausgewählten Zugtypen, zeigt Abbildung 4, dass die Variabilität der Messungen für alle einzelnen Individuen des gleichen Zugtyps gering ist, während die Unterschiede zwischen den verschiedenen Individuen erheblich sein können. In Abbildung 4 ist ein Unterschied von bis zu Faktor 2,5 in den gemessenen Emissionen festzustellen.



**Abbildung 4: Vergleich nach Kompositionsnummer der Erschütterungsemissionen des gleichen Zugtyps innerhalb 16 Tage in Tössmühle -  $v = 122 - 126$  km/h**

### 4.3 Abhängigkeit der RMS-Werte mit der Fahrgeschwindigkeit

In Abbildung 5 wird die Abhängigkeit der RMS-Werte (Parameter `vrms_vibra`) von der Fahrgeschwindigkeit  $G$  dargestellt. Jeder Subplot zeigt einen Rollmaterialtyp und zwei um maximal 50m versetzte Messpunkte an einem 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  $G_0 = 80$  km/h ist durch einen kreuzförmigen Marker gekennzeichnet. Die Koeffizienten der linearen Regression sind in den Legenden zusammen mit dem  $R^2$ -Wert und der Anzahl  $n$  der betrachteten Punkte im Datensatz angegeben.



**Abbildung 5: Fahrzeugemissionen über Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Rollmaterialtypen und Standorte**

Diese Grafik:

- Bestätigt, dass die Fahrgeschwindigkeit ein relevanter Parameter für die Beurteilung von Erschütterungen ist.
- Bestätigt, dass die Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen Schwinggeschwindigkeit und Fahrgeschwindigkeit in VIBRA-1 gemäss Gleichung ( 2 ) angemessen ist. Die Steigung der Regressionskurve variiert jedoch deutlich je nach Rollmaterialtyp und Standort.
- Zeigt, dass die ausgewählten Individuen in fast allen Fällen repräsentativ für den entsprechenden Zugtyp an diesem Standort sind.

Als Konsequenz wird für die weiteren Analysen die Fahrgeschwindigkeit bei Rollmaterial- oder Standortvergleichen entweder auf einen bestimmten Bereich von 10 km/h begrenzt oder mithilfe von Gleichung ( 2 ) korrigiert.

#### 4.4 Fahrzeugunterschiede über Standorte und Messpunkte

In den folgenden Abbildungen werden die durchschnittlichen Fahrzeugemissionen über verschiedene Standorte hinweg dargestellt. Abbildung 6 zeigt die Emissionen von Passagierzügen bei Geschwindigkeiten zwischen 115 und 125 km/h, wobei eine Mindestanzahl von 10 Vorbeifahrten pro Rollmaterialtyp und Messpunkt berücksichtigt wird. Abbildung 7 zeigt die Emissionen bei Geschwindigkeiten zwischen 75 und 85 km/h mit mindestens 5 Vorbeifahrten. Die Fahrzeugemissionen werden mit den Emissionsparametern des VIBRA-1 Modells verglichen, welche durch horizontale Linien dargestellt sind und mittels Gleichung ( 2 ) korrigiert wurden. Abbildung 8 betrachtet die Fahrzeugemissionen, die mittels Gleichung ( 2 ) und einer Referenzgeschwindigkeit von 80 km/h korrigiert wurden (im Datensatz wurden Fahrten mit Geschwindigkeiten ab 50 km/h berücksichtigt) und eine Mindestanzahl von 20 Vorbeifahrten.



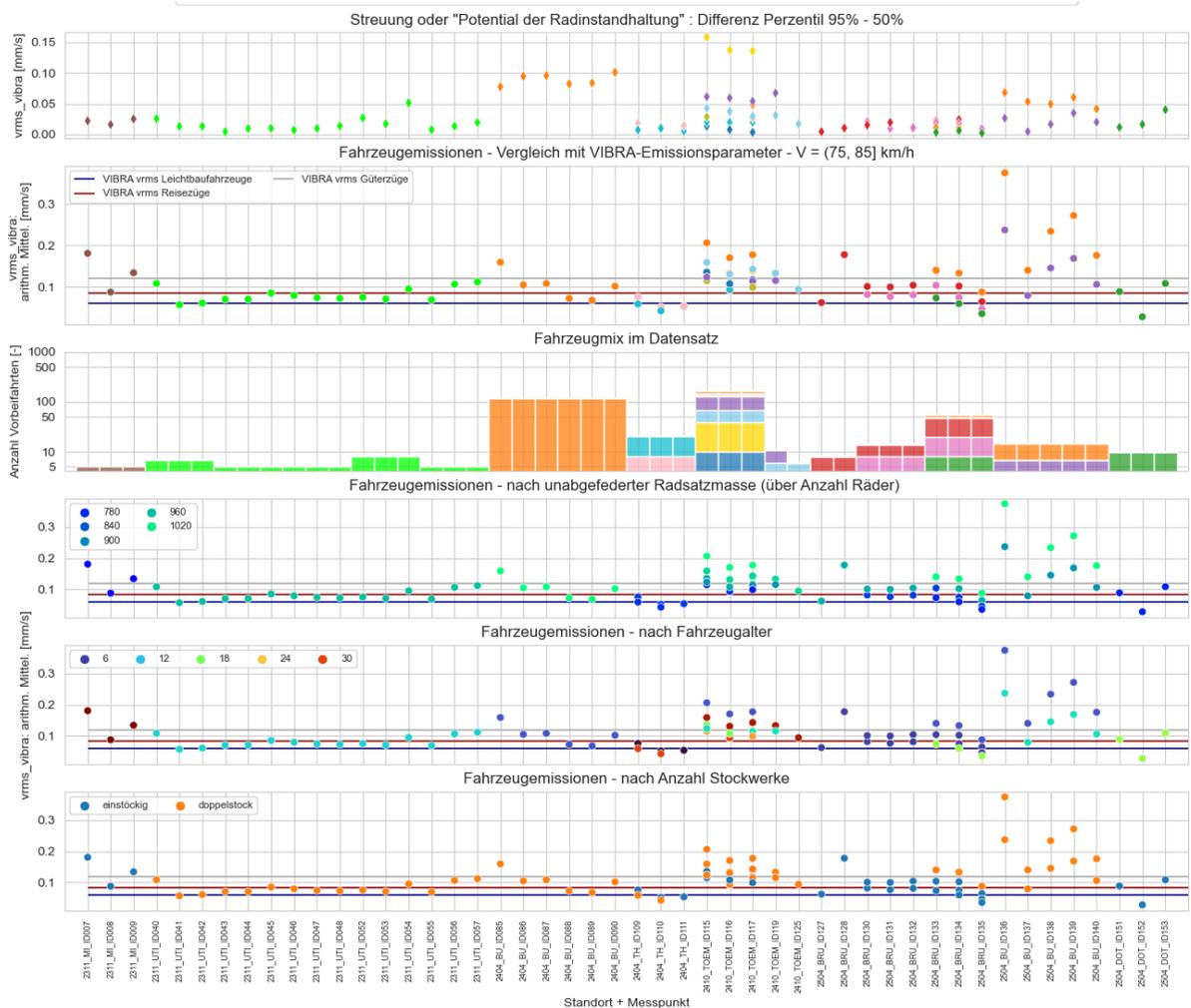
**Abbildung 6: Mittlere Fahrzeugemissionen nach Standort nach Rollmaterialtyp und Fahrzeugmerkmale, dargestellt sind nur diejenigen Fahrzeuge mit V = 115 bis 125 km/h**

Der erste Subplot quantifiziert die Streuung der Emissionswerte durch die Differenz zwischen dem 95%- und 50%-Perzentil von vrms\_vibra und dient als Indikator für das Potenzial der Radstandhaltung. Der zweite Subplot zeigt die reinen Fahrzeugemissionen (arithmetisches Mittel von vrms\_vibra). Der dritte Subplot gibt die Anzahl der Vorbeifahrten nach Rollmaterialtyp und Standort im gesamten Datensatz wieder. Die drei unteren Subplots enthalten die gleichen Datenpunkte wie der zweite, wobei die Punktfarbe entsprechend der folgenden drei Parameter angepasst wird:

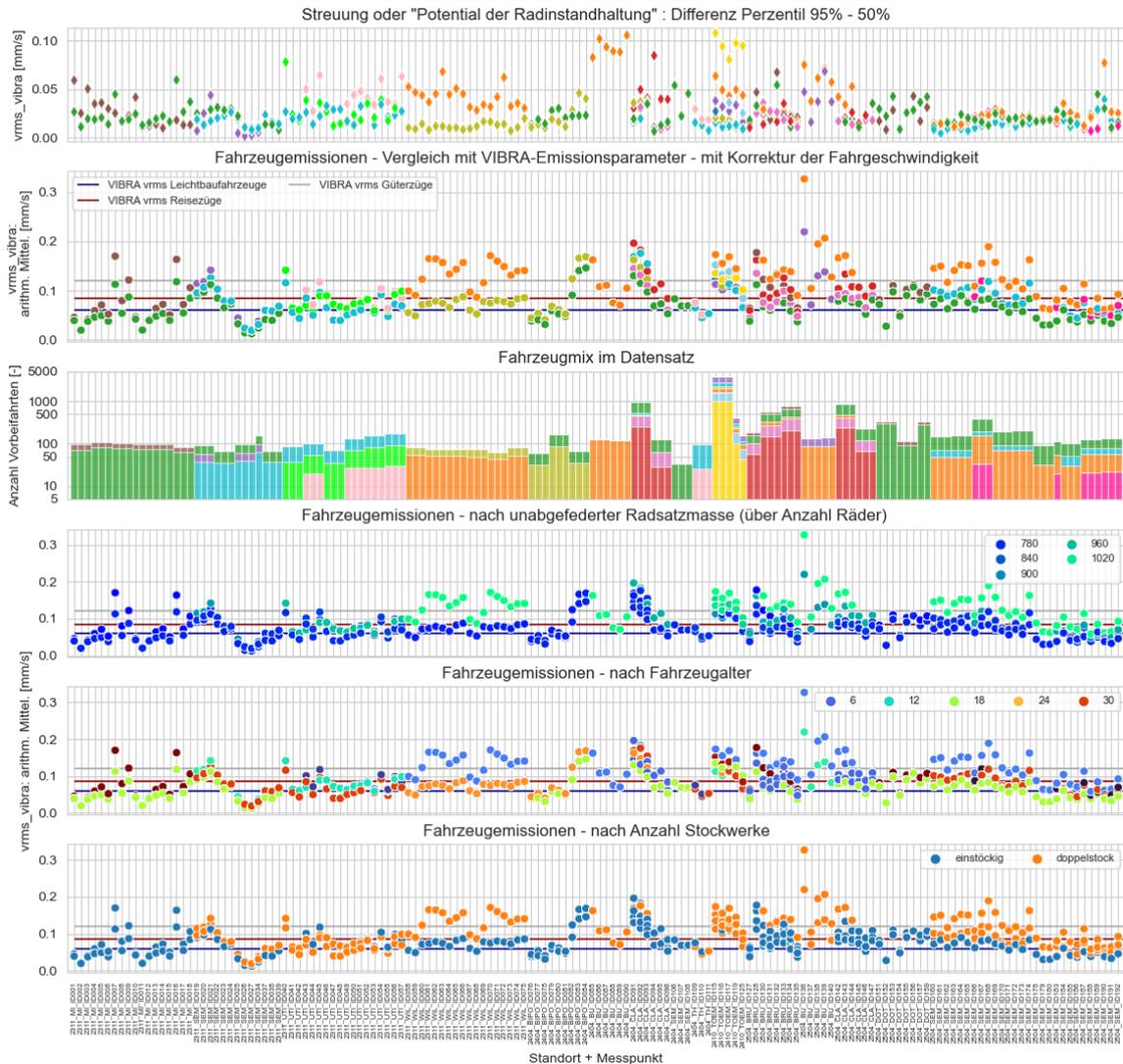
- Unabgedeckte Radsatzmasse: Summe der unabgedeckten Massen des Zuges, dividiert durch die Gesamtzahl der Räder, in kg.
- Alter des Fahrzeugs: Anzahl Jahre seit der Erstinbetriebnahme dieses Rollmaterialtyps (Punktfarbe nach Alter).
- Anzahl Stockwerke im Zug: ein- oder zweistöckig.

Diese Grafiken verdeutlichen, dass es je nach Rollmaterialtyp relevante Unterschiede gibt. Zudem sind 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. Einige Kombinationen von Rollmaterialtypen und Standorten stimmen gut mit den bestehenden VIBRA-Parametern überein. Bei anderen werden die VIBRA-Parameter

deutlich überschritten, selbst der Parameter, der für Güterzüge gilt. Des Weiteren zeigt sich eine Korrelation zwischen der unabgedeckten Radsatzmasse und den Emissionen. Darüber hinaus lässt sich eine Tendenz erkennen, dass neuere Fahrzeugtypen zu höheren Emissionen führen. Die Anzahl der Stockwerke im Zug hat hingegen keinen relevanten Einfluss auf die Emissionen.



**Abbildung 7: Mittlere Fahrzeugemissionen nach Standort nach Rollmaterialtyp und Fahrzeugmerkmale, dargestellt sind nur diejenigen Fahrzeuge mit V = 75 bis 85 km/h**

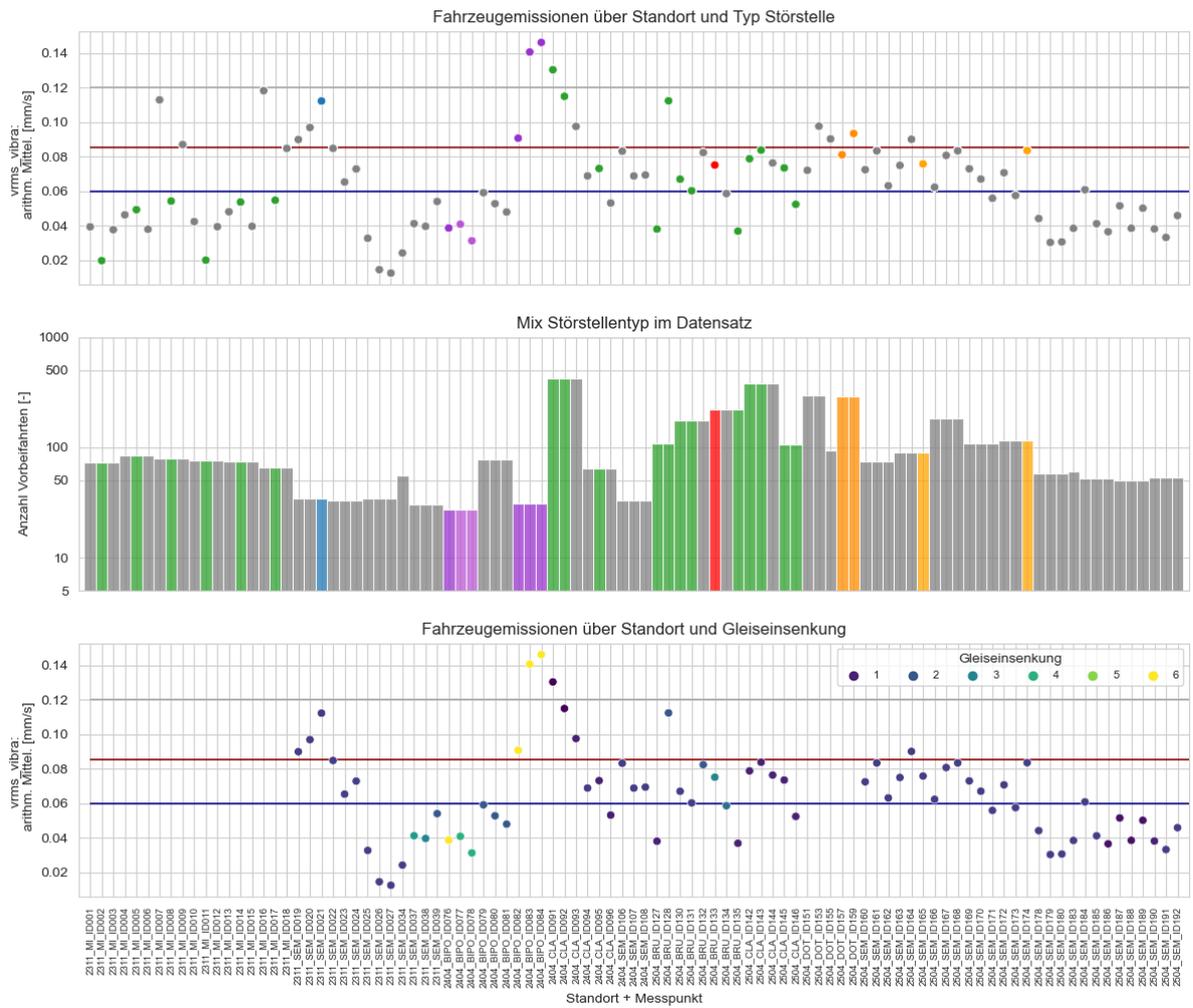


**Abbildung 8: Mittlere Fahrzeugemissionen (geschwindigkeitskorrigiert) nach Standort, nach Rollmaterialtyp und Fahrzeugmerkmalen, gesamter Datensatz mit allen Fahrzeugen über der Mindestanzahl pro Standort**

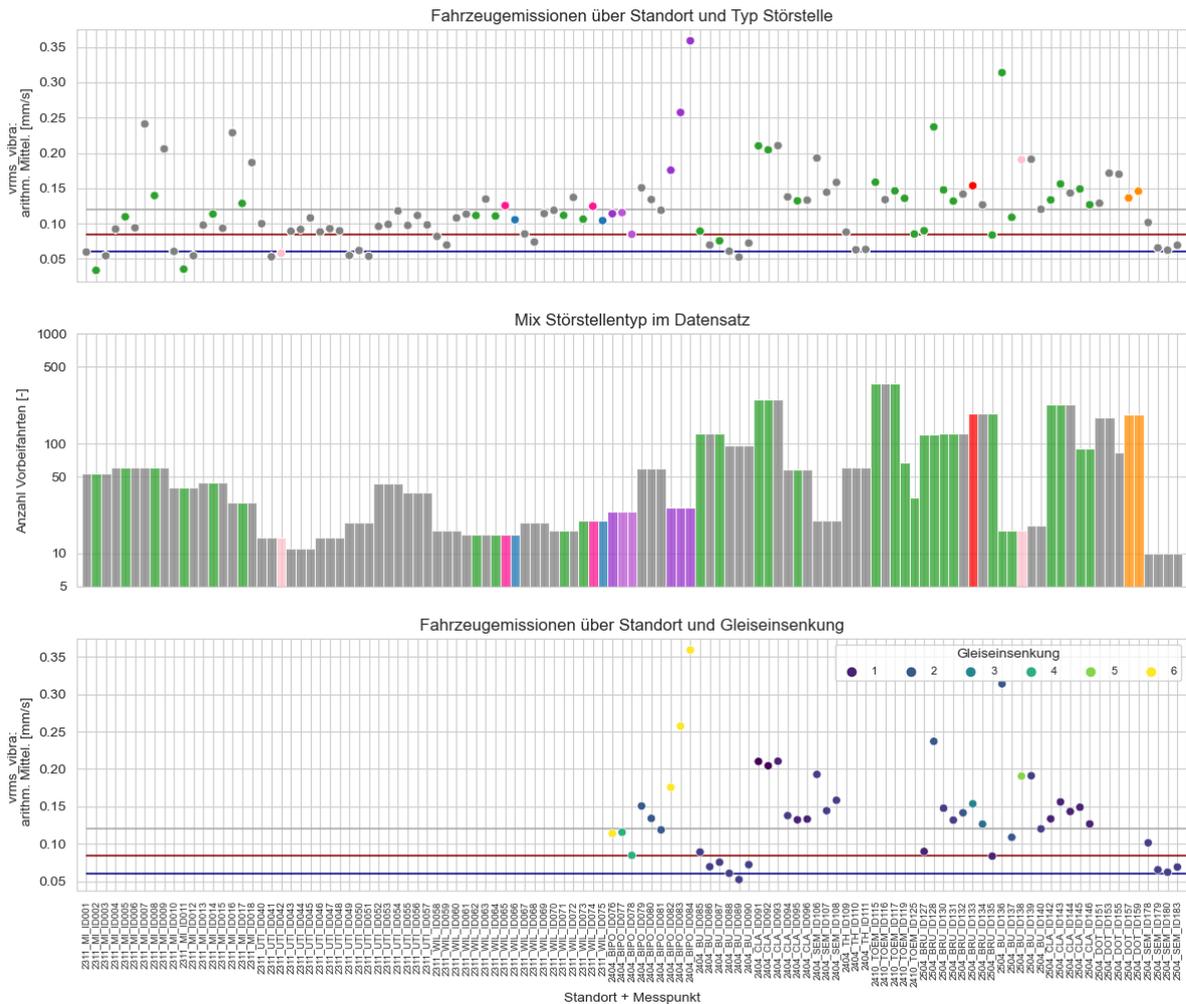
#### 4.5 Standortunterschiede

In diesem Kapitel wird eine ähnliche Auswertesystematik wie in Kapitel 4.4 angewendet, wobei der Schwerpunkt auf den Unterschieden zwischen den Standorten sowie deren spezifischen Merkmalen und Auffälligkeiten liegt.

In Abbildung 9 bzw. Abbildung 10 sind die Fahrzeugemissionen (arithmetisches Mittel von  $vrms\_vibra$ , korrigiert für die Fahrgeschwindigkeit) für die Rollmaterialtypen «Flirt» bzw. «Güterzüge» gefiltert und über die verschiedenen Standorte dargestellt. 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.



**Abbildung 9: Standortunterschiede in den Fahrzeugemissionen (fahr Geschwindigkeitskorrigiert) eines «Leichtbau»-Zugtyps nach Typ Störstelle und Gleiseinsenkung**



**Abbildung 10: Standortunterschiede in den Fahrzeugemissionen (fahr Geschwindigkeitskorrigiert) der Güterzüge nach Typ Störstelle und Gleiseinsenkung**

Aus diesen Abbildungen geht hervor, dass einige der dokumentierten Störstellen die hohen Fahrzeugemissionen erklären können. Viele unauffällige Messpunkte führen zu niedrigen Fahrzeugemissionen, jedoch nicht jeder unauffällige Standort resultiert in niedrigen Werten. Ebenso führt nicht jede dokumentierte Auffälligkeit zu hohen Emissionen. 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. Eine gründliche Validierung des Modells würde eine gezielte Untersuchung dieser Aspekte erfordern.

## 5 Diskussion & Schlussfolgerungen

Die umfassenden Messungen der SBB an 15 Standorten des Schienennetzes haben wertvolle Einblicke in die Erschütterungsemissionen verschiedener Rollmaterialtypen geliefert. Die Analyse von über 50.000 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 Parametern übereinstimmen, sind bei anderen deutliche Abweichungen zu beobachten. Die Studie bestätigt ebenfalls die Angemessenheit eines linearen Zusammenhangs zwischen Schwinggeschwindigkeit und Fahrgeschwindigkeit im VIBRA-1 Modell und zeigt die Korrelation zwischen der unabgefederten Radsatzmasse und den Emissionen.

Dennoch ist die erhebliche Streuung der Emissionswerte innerhalb der Rollmaterialtypen und zwischen den Standorten ein Hinweis darauf, dass die aktuellen VIBRA-1 Parameter möglicherweise nicht ausreichen, um die Vielfalt der seit 2014 eingeführten Flotten abzubilden.

## 6 Danksagung

Die vorliegenden Messungen wurden von der Allianz Fahrweg Normalspur [12] sowie von der SBB finanziert. Die Datenanalyse für diese Arbeit erfolgte im Rahmen eines Projekts der Allianz Fahrweg Normalspur.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] Conreux L., Müller, R., Schönholzer, U. (2023) *Stand der Technik zu Erschütterungen und Körperschall auf dem Schweizer Normalspur-Eisenbahnnetz*, Allianz Fahrweg Normalspur, Bern, ISBN 978-3-907456-00-2, [Online] <https://allianz-fahrweg.ch/publications/9783907456002.pdf>
- [2] Knothe, K. (2001) *Gleisdynamik*.
- [3] Nielsen, J. and Nelain, B., Müller, R. Frid, A., Mirza, A. (2012) *RIVAS - D5.2 - Train Induced Ground Vibration – characterization of vehicle parameters from test data and simulations*.
- [4] ISO 14837-1:2005 *Mechanical vibration - Ground-borne noise and vibration arising from rail systems - Part 1: general guidance*
- [5] Stiebel, D. (2011) *RIVAS - D1.2 - Protocol for free field measurements of mitigation effects in the project RIVAS for WP2,3,4,5*.
- [6] BAFU, BAV (1999) Weisung für die Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienenverkehrsanlagen (BEKS).
- [7] BAFU, BAV (2022) Checkliste Umwelt für Eisenbahnanlagen.
- [8] Ziegler, A. VIBRA-1-2-3: Erschütterungs- und Körperschallprognose bei Eisenbahnlinien. ZIEGLER CONSULTANTS, Zürich. Online: <https://zcag.ch/wp-content/uploads/2022/02/2002-02-ziegler.pdf>
- [9] Birchmeier, M. (2015) Transferfaktoren und Transferspektren für die VIBRA-Modelle (Auswertung der Daten 2001 bis 2014).
- [10] Müller-BBM Rail Technologies (2024) *Fahrbahnlabor Datenbankdokumentation V1*
- [11] Railway Field Laboratory [Online] <https://www.fahrbahnlabor.ch/>
- [12] Allianz Fahrweg Normalspur [Online] <https://allianz-fahrweg.ch/>