



Ermittlung von CPX-Standardspektren für sonROAD18 Dokumentation und Analyse zur Datenaufbereitung

Bundesamt für Umwelt BAFU
Abteilung Lärm und NIS
3003 Bern
A5678
15. Mai 2020

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)
Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)
Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM)
Commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN)

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Lärm und NIS, CH-3003 Bern
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer: Grolimund + Partner AG, 3006 Bern

Autor/Autorin: Erik Bühlmann, Felix Schlatter, Johannes Schindler

Begleitung BAFU: Simon Steiner, Dominique Schneuwly, Michael Gerber

Hinweis: Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst.
Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhalt

1.	Hintergrund und Datengrundlage.....	4
1.1	Ausgangsdatenmenge	4
1.2	Datenaufbereitung	4
2.	CPX-Standardspektren.....	6
2.1	CPX-Standardspektren bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h	6
2.2	CPX-Standardspektren bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h	7
2.3	Pegelverlauf über KB-Klassen	8
2.4	Standardabweichung.....	10
2.5	Enthaltene Belagsklassen	11
2.6	Nach Belagsklasse.....	13
3.	Zusammenfassung	15

Anhang

I	Abbildungsverzeichnis	16
II	Tabellenverzeichnis	16
III	CPX-Messverfahren.....	17
IV	CPX-Standardspektren: 50 km/h	24
V	CPX-Standardspektren: 80 km/h	26
VI	Standardabweichung 50 km/h.....	28
VII	Standardabweichung 80 km/h.....	29
VIII	Enthaltene Beläge 50 km/h	30
IX	Enthaltene Beläge 80 km/h	31

Beilagen

- A) Daten der CPX-Standardspektren: *202003_CPX-Standardspektren_data.xlsx*

1. Hintergrund und Datengrundlage

Zur Herleitung von sonROAD18-Standard-Belagskorrekturen werden gemittelte CPX-Standardspektren verwendet. Dieser Bericht dokumentiert die hierzu verwendete Datenmenge und Datenaufbereitung (Kapitel 1) und zeigt und analysiert die resultierenden CPX-Standardspektren (Kapitel 2).

1.1 Ausgangsdatenmenge

Die gesamte Ausgangs-Datenmenge beinhaltet alle CPX-Messdaten von Grolimund + Partner AG. Die Messungen der Reifen-Fahrbahn Geräusche wurden gemäss EN ISO 11819-2:2017 durchgeführt und verarbeitet und werden in der hauseigenen Datenbank verwaltet (siehe Anhang III). Der Auszug aller verfügbaren CPX-Messdaten von 2008 bis Ende 2019 umfasst mehr als 22'000 km gemessener Strassenbeläge und bildet die Ausgangs-Datenmenge zur Herleitung der CPX-Standardspektren. Alle Messdaten wurden gemäss Norm ausgewertet und normalisiert, über 90% der Messungen entsprechend der neuesten Norm.

1.2 Datenaufbereitung

Filterung

Um eine hohe, repräsentative Datenqualität zu gewährleisten, wurde die Ausgangsdatenmenge durch die Anwendung folgender Filter verfeinert:

- Excludes: wo vorhanden, Ausschluss von Messwerten, die als *Exclude*¹ gekennzeichnet sind, Ausschluss von Messwerten mit Bemerkungen.
- Messungstypen: nur Messwerte der Messungstypen *Abnahmemessung*, *Monitoring* oder *Zustandserfassung*².
- Referenzgeschwindigkeit: nur Messwerte, die bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h oder 80 km/h aufgenommen wurden (getrennte Betrachtung beider Kategorien).
- Geschwindigkeitsabweichung: nur Messwerte mit einer maximalen Abweichung der effektiven Messfahrzeugs-Geschwindigkeit von der Referenzgeschwindigkeit kleiner als 5 km/h.
- Belagstypen: nur Messwerte von bekannten Belagstypen mit Ausschluss von gepflasterten Belägen³.
- Belagsalter: nur Messwerte von Belägen mit bekannten Belagsalter⁴.

Belags-Klassierung

Für eine detaillierte Betrachtung wurden die einzelnen Belagstypen in die fünf Belagsklassen *Asphaltbeton*, *Beton*, *Negativtextur dicht*, *Negativtextur HR (Hohlraum)* und *Positivtextur* eingeteilt. Durch eine Klassierung nach der prinzipiellen Bauart können so den vielen einzelnen Belagstypen übergeordnete

¹ Durch Messingenieur bei der Messung oder Auswertung erkannte, belagsfremde Störgeräusche, wie z.B. Schachtdeckel, Fussgängerstreifen, Markierungen.

² Eine Abnahmemessung besteht aus drei Messfahrten je Reifen und Fahrbahn, eine Monitoring Messung aus zwei Messfahrten je Reifen und Fahrbahn. Eine Zustandserfassung beinhaltet eine Messfahrt je Reifen und Fahrbahn.

³ Messungen von gepflasterten Belägen weichen von der spektralen Signatur stark ab und verzerren die je KB-Klasse ermittelten Spektren, da diese nicht belagstypspezifisch sind.

⁴ Zur Bestimmung der Standardspektren ist das Belagsalter nicht direkt relevant und ist durch die akustische Alterung indirekt in der KB-Klassierung abgebildet. Um eine hohe Qualität der Grundlagedaten zu gewährleisten sind jedoch nur Beläge mit bekanntem Belagsalter in der Datengrundlage enthalten.

15. Mai 2020

Einflüsse erkannt werden. Die Zuordnung ist in Anhang VIII und IX ersichtlich. Für die CPX-Standard-spektren selbst ist die Belags-Klassierung nicht relevant.

KB-Klassierung

Für jeden Messwert wird, ausgehend von den gemessenen Reifen-Fahrbahn Geräuschen für PW- und LWK-Reifen, die Abweichung der Messung gegenüber dem Modell StL-86+ als akustische Belagsgüte in dB(A) angegeben⁵. Gemäss Leitfaden Strassenlärm, Anhang 1b (Version 31.07.2013) wird zur Handhabung im Lärmvollzug für beide Geschwindigkeitskategorien die akustische Belagsgüte im Mischverkehr berechnet (siehe Anhang III). Der hierbei gewählte Schwerverkehrsanteil (N2-Anteil) beträgt:

- Referenzgeschwindigkeit 50 km/h: 8% (MV8)
- Referenzgeschwindigkeit 80 km/h: 15% (MV15)

Dieser Wert wird für eine Klassierung ganzzahlig gerundet und im Folgenden als KB-Klasse bezeichnet. Nach Filterung und KB-Klassierung werden nur jene KB-Klassen weiter betrachtet, die auf einer Datengrundlage von mehr als 10 km Länge basieren, um statistisch robuste Aussagen zu gewährleisten.

Aus Vollzugsrelevanz wurde die Berechnung der Belagsgüte im Mischverkehr gemäss Leitfaden Strassenlärm, Anhang 1b vorgenommen, was allerdings zu verschiedenen N2-Anteilen in der KB-Klassierung der Spektren bei 50 und 80 km/h führt. Dies muss bei direkten Vergleichen beider Gruppen berücksichtigt werden.

Mittelung

Nach Filterung und Klassierung werden die zu den KB-Klassen gehörigen spektralen Pegelwerte der PW Messungen ($L_{CPX, P, f, v}$) arithmetisch gemittelt, um das jeweilige CPX-Standardspektrum zu liefern (je Geschwindigkeitskategorie und je KB-Klasse). Zudem wird die empirische Standardabweichung der je Terzband enthaltenen Daten berechnet.

Bemerkung

Da die KB-Klassierung anhand von Mischverkehrswerten - den massgebenden Grössen im Lärmvollzug - vorgenommen wurde, sind hier sowohl die Messungen mit PW- als auch mit LKW-Reifen eingeflossen. Um eine Anbindung an das Strassenlärm Berechnungsmodell sonROAD18 zu erlauben, wurden die entsprechenden CPX-Standardspektren hingegen nur basierend auf Messungen mit PW-Reifen berechnet. sonROAD18 geht davon aus, dass die Belagskorrektur unabhängig von der Fahrzeugkategorie und Geschwindigkeit ist.

⁵ Entsprechend Leitfaden Strassenlärm, Anhang 1c (Version 11.12.2013), Abs. 5.10 *Datenauswertung im Bezug zum Modell StL-86+*

15. Mai 2020

2. CPX-Standardspektren

2.1 CPX-Standardspektren bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h

Abbildung 1 zeigt die CPX-Standardspektren bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h. Die KB-Klassierung erfolgte anhand der Mischverkehrswerte mit N2-Anteil 8% und führt zu 13 KB-Klassen. Für jede KB-Klasse ist je Terzband Mittenfrequenz der Pegel $L_{CPX, P, f, 50 \text{ km/h}}$ aufgetragen.

In Anhang IV sind die zugrunde liegenden Daten (Tabelle 1) und alle Spektren (Abbildung 14) einzeln je KB-Klasse enthalten.

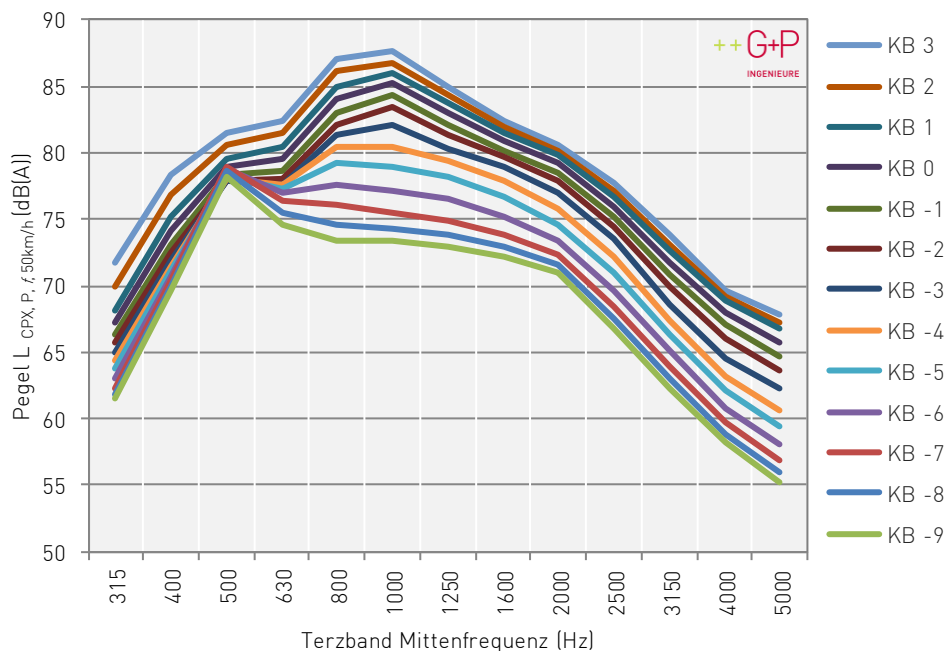


Abbildung 1: CPX-Standardspektren bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h.

Kommentar

- Entsprechend der KB-Klassierung erhöhen sich die spektralen Pegel im Ganzen kontinuierlich je KB-Klasse.
- Die hohen KB-Klassen (grösser -2, «lautere» Beläge) zeigen jedoch eine stärkere Spreizung zwischen den einzelnen Spektren im tiefen und mittleren Frequenzbereich. Dies deutet auf einen verstärkten Einfluss von Reifenvibrationsgeräuschen in diesen KB-Klassen.
- Die tiefen KB-Klassen (kleiner -2, «leisere» Beläge) zeichnen sich hingegen durch einen erhöhten Einfluss von Luftströmungsgeräuschen aus, erkennbar durch die Spreizung im mittleren und hohen Frequenzbereich.
- Bei 500 Hz ist der Pegel nahezu unabhängig von der KB-Klasse. Dies kann gut mit der Geräusentstehung bei dieser Frequenz erklärt werden - diese ist dominiert von reifeneigenen Vibrationen, und so wird hier bei der Messung nicht vornehmlich der Belag, sondern verstärkt der Reifen abgebildet.

15. Mai 2020

2.2 CPX-Standardspektren bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h

Abbildung 2 zeigt die CPX-Standardspektren bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h. Die KB-Klassierung erfolgte anhand der Mischverkehrswerte mit N2-Anteil 15% und führt zu 12 KB-Klassen. Für jede KB-Klasse ist je Terzband Mittenfrequenz der Pegel $L_{CPX,P,f,80\text{ km/h}}$ aufgetragen.

In Anhang V sind die zugrunde liegenden Daten (Tabelle 2) und alle Spektren (Abbildung 15) einzeln je KB-Klasse enthalten.

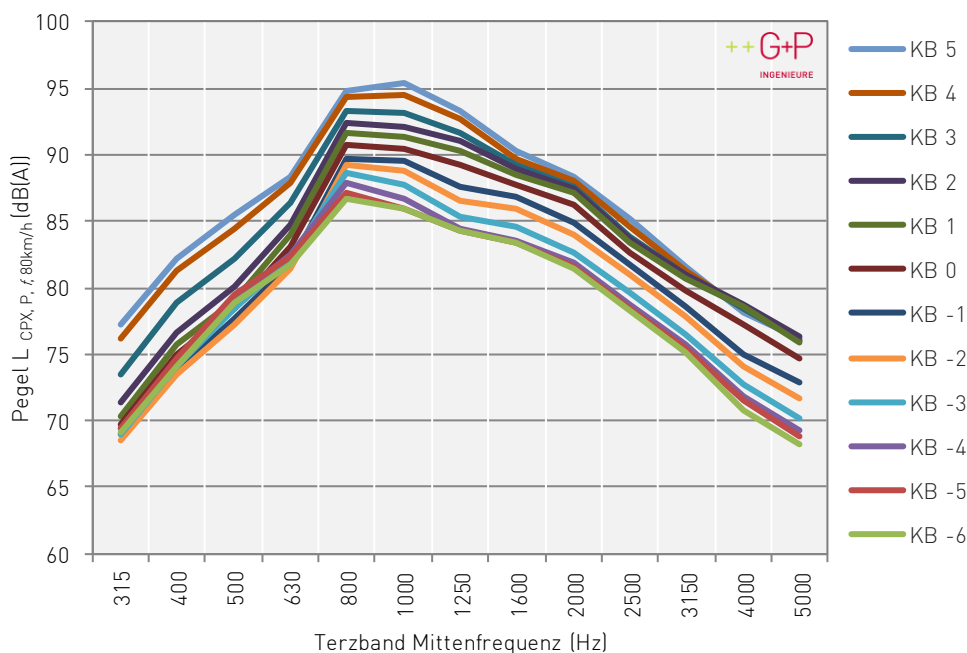


Abbildung 2: CPX-Standardspektren bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h.

Kommentar

- Die Pegel sind generell höher als bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h und nehmen im Großen mit der KB-Klasse zu.
- Wie bei 50 km/h (Abbildung 1) ist die Spreizung der Spektren bei hohen KB-Klassen im tiefen und mittleren Frequenzbereich ausgeprägt, bei tiefen KB-Klassen hingegen im mittleren und hohen Frequenzbereich.
- Bei tiefen Frequenzen ist der Effekt der Reifenvibrationen im Vergleich zu 50 km/h zwar geringer, eine Stauchung der Pegel der KB-Klassen von -6 bis 1 ist jedoch ebenfalls gut erkennbar und gibt Hinweis auf denselben Einfluss.
- Die Spektren der einzelnen KB-Klassen überschneiden sich teilweise in den Extrembereichen (tiefe/hohe KB-Klasse, tiefe/hohe Frequenzen). Dies kann mit der spezifischen Verteilung der enthaltenen Bauarten in den verschiedenen KB-Klassen erklärt werden. Wie in Abbildung 8 gezeigt sind beispielsweise die KB-Klassen -6 bis -3 stark von der Belagsklasse *Negativtextur Hohlräum* dominiert.

15. Mai 2020

2.3 Pegelverlauf über KB-Klassen

2.3.1 Referenzgeschwindigkeit 50 km/h

In Abbildung 3 sind die Pegel $L_{CPX, P, f, 50 \text{ km/h}}$ in Abhängigkeit der KB-Klasse bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h für die ausgewählten Terzband Mittenfrequenzen 400 Hz, 500 Hz, 1000 Hz und 2500 Hz dargestellt. Die Fehlerbalken zeigen die jeweilige Standardabweichung.

Bei den beiden tiefen Frequenzen dominieren Vibrationseffekte die Schallentstehung, bei 1000 Hz hingegen ist die Schallabsorption ursächlich, bei 2500 Hz Luftströmungsgeräusche.

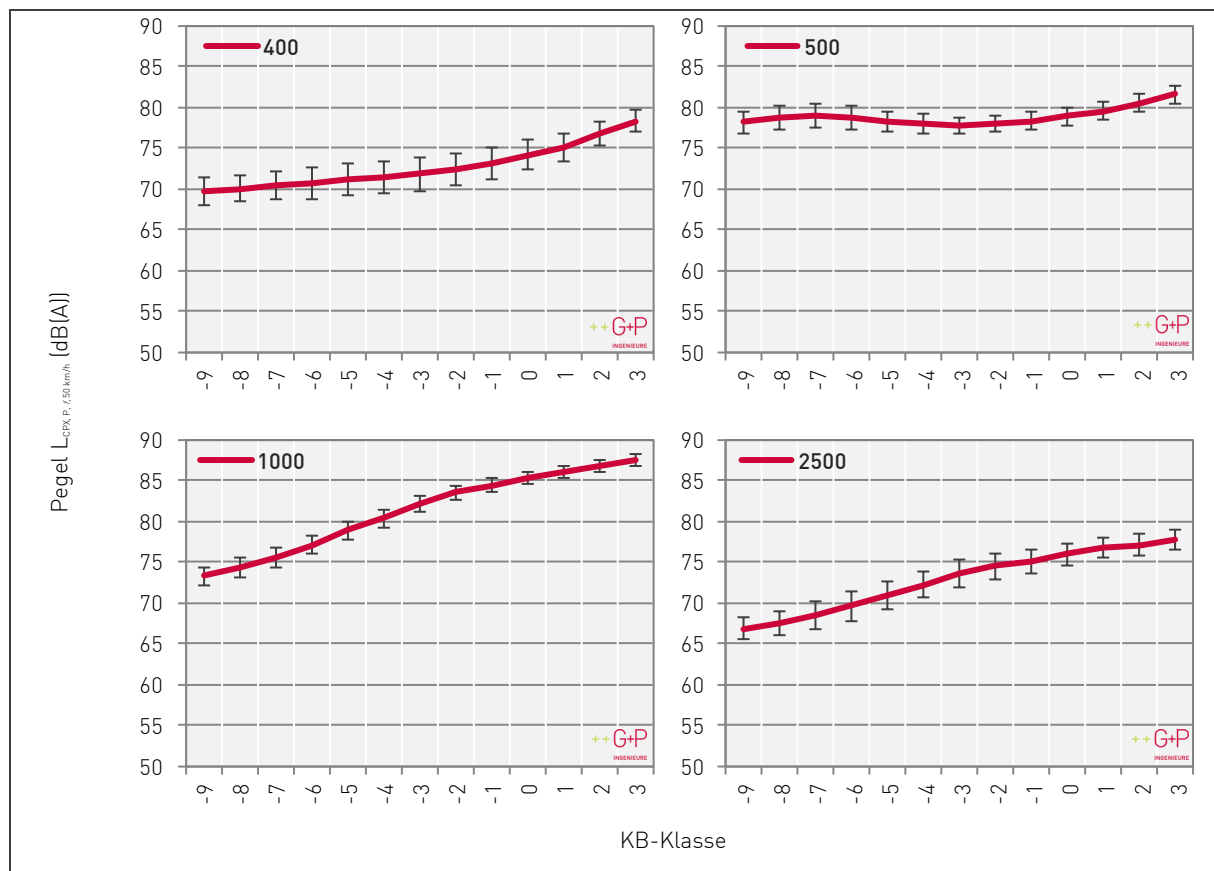


Abbildung 3: Pegelverlauf in Abhängigkeit der KB-Klasse für die Terzband Mittenfrequenzen 400 Hz, 500 Hz, 1000 Hz und 2500 Hz bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h.

Kommentar

- Es ist gut erkennbar, dass die Steigung bei tiefen Frequenzen kleiner ausfällt, respektive bei 500 Hz sogar fast verschwindet.
- Bei 1000 Hz erstrecken sich die Pegel der 13 KB-Klassen (12 dB) hingegen über mehr als 14 dB.
- Die höchsten absoluten Pegel (mit der geringsten Standardabweichung) werden bei 1000 Hz beobachtet.

15. Mai 2020

2.3.2 Referenzgeschwindigkeit 80 km/h

In Abbildung 4 sind die Pegel $L_{CPX, P, f, 80 \text{ km/h}}$ in Abhängigkeit der KB-Klasse bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h für die ausgewählten Terzband Mittenfrequenzen 400 Hz, 500 Hz, 1000 Hz und 2500 Hz dargestellt. Die Fehlerbalken zeigen die jeweilige Standardabweichung.

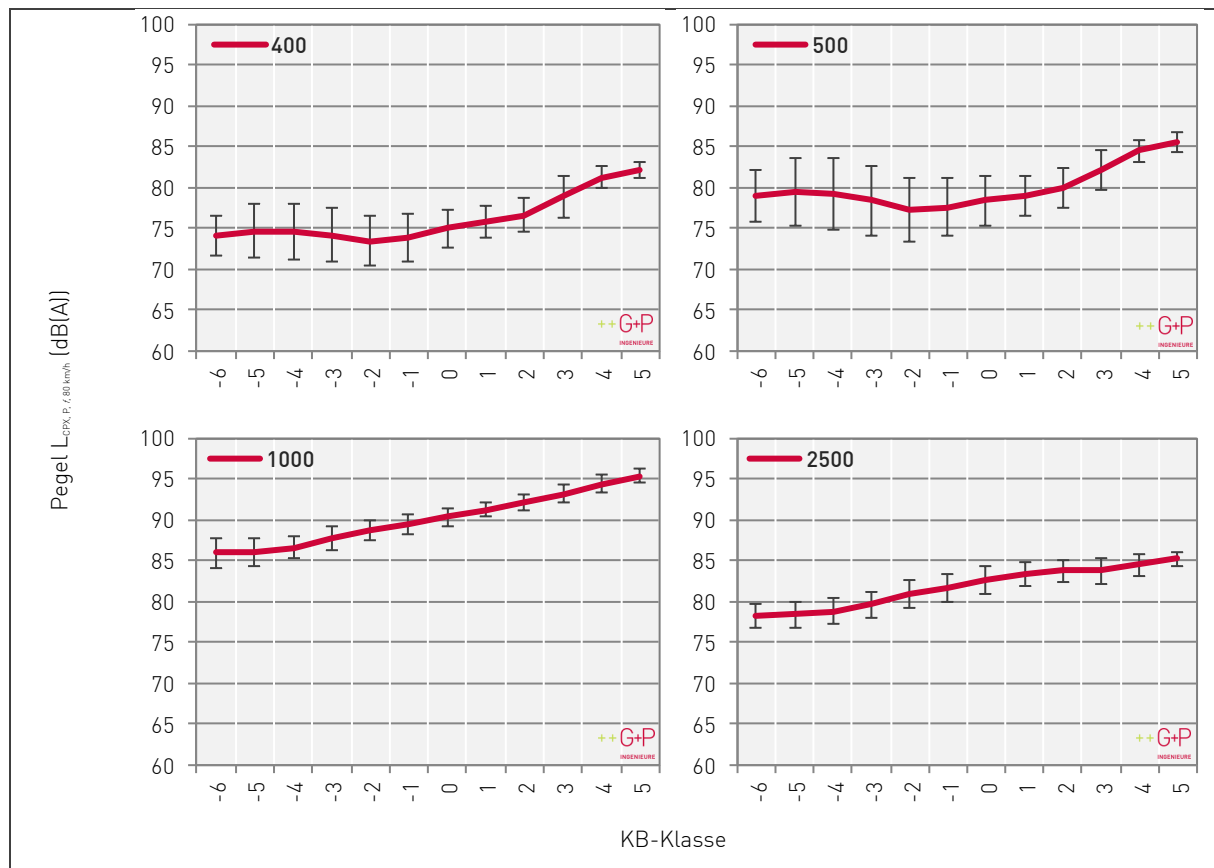


Abbildung 4: Pegelverlauf in Abhängigkeit der KB-Klasse für die Terzband Mittenfrequenzen 400 Hz, 500 Hz, 1000 Hz und 2500 Hz bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h.

Kommentar

- Auch bei 80 km/h Referenzgeschwindigkeit zeigen die tiefen Frequenzen eine geringe Steigung, ebenso sind auch bei hohen Frequenzen die Kurven im Vergleich zu 50 km/h (Abbildung 3) abgeflacht.
- Besonders auffallend sind die grossen Werte der Standardabweichung bei tiefen Frequenzen. Generell haben die tiefen Frequenzen, mit einem gegenüber den mittleren Frequenzen um 10 dB(A) niedrigerem Pegel, aber nur einen geringen Anteil am Gesamtpegel (A-Bewertung für Gesamtpegel und tiefere Schallenergien). Somit kann der Einfluss der erhöhten Standardabweichung als sehr gering angesehen werden.

2.4 Standardabweichung

2.4.1 Referenzgeschwindigkeit 50 km/h

Im Anhang VI, Abbildung 16, ist die Standardabweichung und die Datengrundlage je KB-Klasse über die Terzband Mittenfrequenzen bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Grösse der Datengrundlage keinen starken Einfluss auf die Standardabweichung hat, jedoch die mittlere Standardabweichung mit höherer KB-Klasse abnimmt.

Im Anhang VI, Abbildung 17, ist die Standardabweichung je Terzband Mittenfrequenzen und KB-Klasse bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h dargestellt. Bei den mittleren Frequenzen ist die Standardabweichung im Allgemeinen am tiefsten. Die höchsten absoluten Werte – über 2 dB(A) treten bei der niedrigsten Terzband Mittenfrequenz von 315 Hz auf.

Allgemein gilt, dass die Werte der Standardabweichung nicht primär durch die CPX-Messunsicherheit bestimmt sind, sondern von der Population der Datengrundlage (in der KB-Klasse vertretenen Bauweisen, Belagszustände oder Belagsalter) abhängen.

2.4.2 Referenzgeschwindigkeit 80 km/h

Im Anhang VII, Abbildung 18 ist die Standardabweichung und die Datengrundlage je KB-Klasse über die Terzband Mittenfrequenzen bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Grösse der Datengrundlage keinen klaren Einfluss auf die Standardabweichung hat, jedoch die mittlere Standardabweichung mit höherer KB-Klasse abnimmt.

Im Anhang VII, Abbildung 19 ist die Standardabweichung je Terzband Mittenfrequenzen und KB-Klasse bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h dargestellt. Hohe absolute Werte mit einer Standardabweichung von über 2.5 dB(A) treten fast ausschliesslich bei den tiefen Terzband Mittenfrequenzen von 315 bis 630 Hz auf (siehe auch Kapitel 2.3.2).

15. Mai 2020

2.5 Enthaltene Belagsklassen

2.5.1 Referenzgeschwindigkeit 50 km/h

Abbildung 5 zeigt den prozentualen Anteil der fünf verschiedenen Belagsklassen an der Datengrundlage bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h. Eine detaillierte Aufzählung nach Belagstyp und Belagsklasse als auch die Belags-Klassierung ist in Anhang VIII, Tabelle 3 dokumentiert.

Über die Hälfte der Belagstypen entstammen den Klassen *Negativtextur dicht* und *Negativtextur HR* (Hohlraum). Betonbeläge machen nur 1‰ der enthaltenen Messdatenlänge aus.

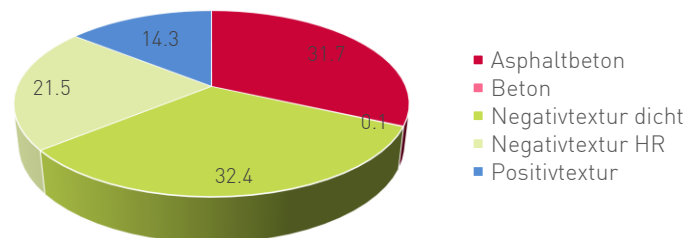


Abbildung 5: Prozentualer Anteil der verschiedenen Belagsklassen an der Datengrundlage bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h.

In Abbildung 6 sind die absoluten Längen der enthaltenen Belagsklassen an der Datengrundlage bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h gezeigt, die sich jeweils zur totalen Datengrundlage je KB-Klasse aufsummieren. Diese Darstellung gibt Aufschluss darüber, welche Bauweisen in welcher KB-Klasse dominieren. Besonders auffallend ist, dass die KB-Klassen von -9 bis -4 klar von der Belagsklasse *Negativtextur HR* dominiert sind.

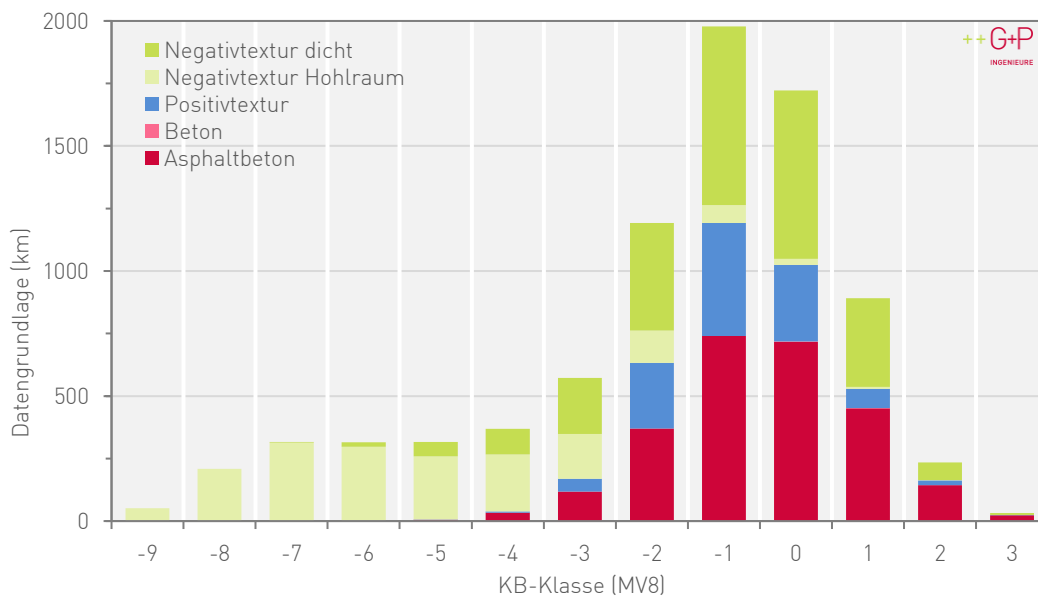


Abbildung 6: Absolute Länge der enthaltenen Belagsklassen an der Datengrundlage bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h.

15. Mai 2020

2.5.2 Referenzgeschwindigkeit 80 km/h

Abbildung 7 zeigt den prozentualen Anteil der fünf verschiedenen Belagsklassen an der Datengrundlage bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h. Eine detaillierte Aufzählung nach Belagstyp und Belagsklasse als auch die Belags-Klassierung ist in Anhang IX, Tabelle 4 dokumentiert.

Fast dreiviertel der Belagstypen entstammen den Klassen *Negativtextur dicht* und *Negativtextur HR*. Beläge der Klassen *Beton* und *Positivtextur* und haben jeweils nur wenige Prozent Anteil an der enthaltenen Messdatenlänge.

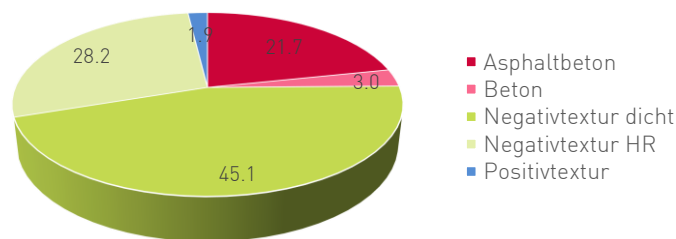


Abbildung 7: Prozentualer Anteil der verschiedenen Belagsklassen an der Datengrundlage bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h.

In Abbildung 8 sind die absoluten Längen der enthaltenen Belagsklassen an der Datengrundlage bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h gezeigt, die sich jeweils zur totalen Datengrundlage je KB-Klasse aufsummieren. Diese Darstellung gibt Aufschluss darüber welche Bauweisen in welcher KB-Klasse dominieren. Besonders auffallend ist, dass die KB-Klassen von -6 bis -3 klar von der Belagsklasse *Negativtextur HR* dominiert sind.

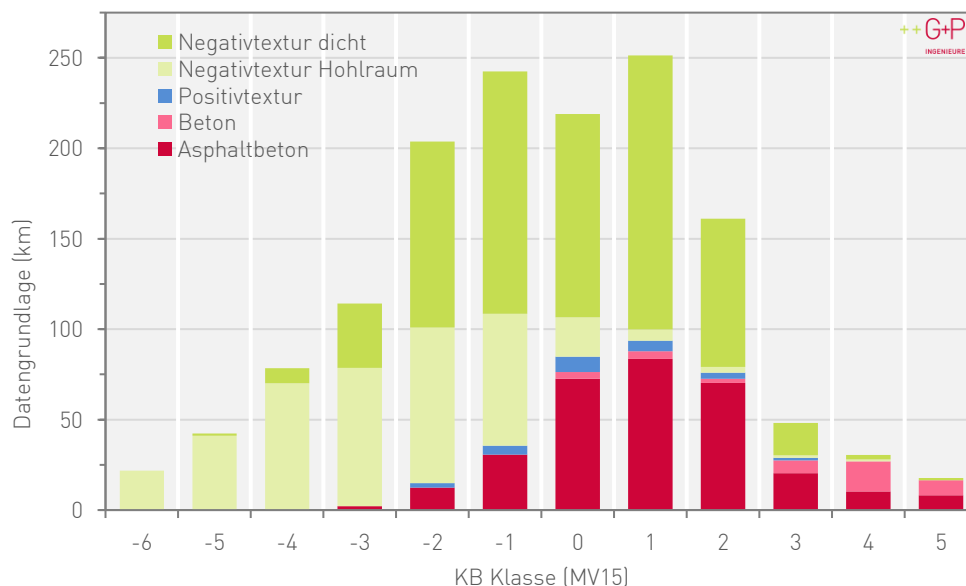


Abbildung 8: Absolute Länge der enthaltenen Belagsklassen an der Datengrundlage bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h.

15. Mai 2020

2.6 Nach Belagsklasse

2.6.1 Referenzgeschwindigkeit 50 km/h

Abbildung 9 zeigt CPX-Spektren aufgeschlüsselt nach Belagsklasse für die KB-Klassen -5, -3, -1 und 2 bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h. In schwarz ist jeweils das CPX-Standardspektrum inklusive der Standardabweichung als Fehlerbalken dargestellt, welches dem Gesamtspektrum entspricht.

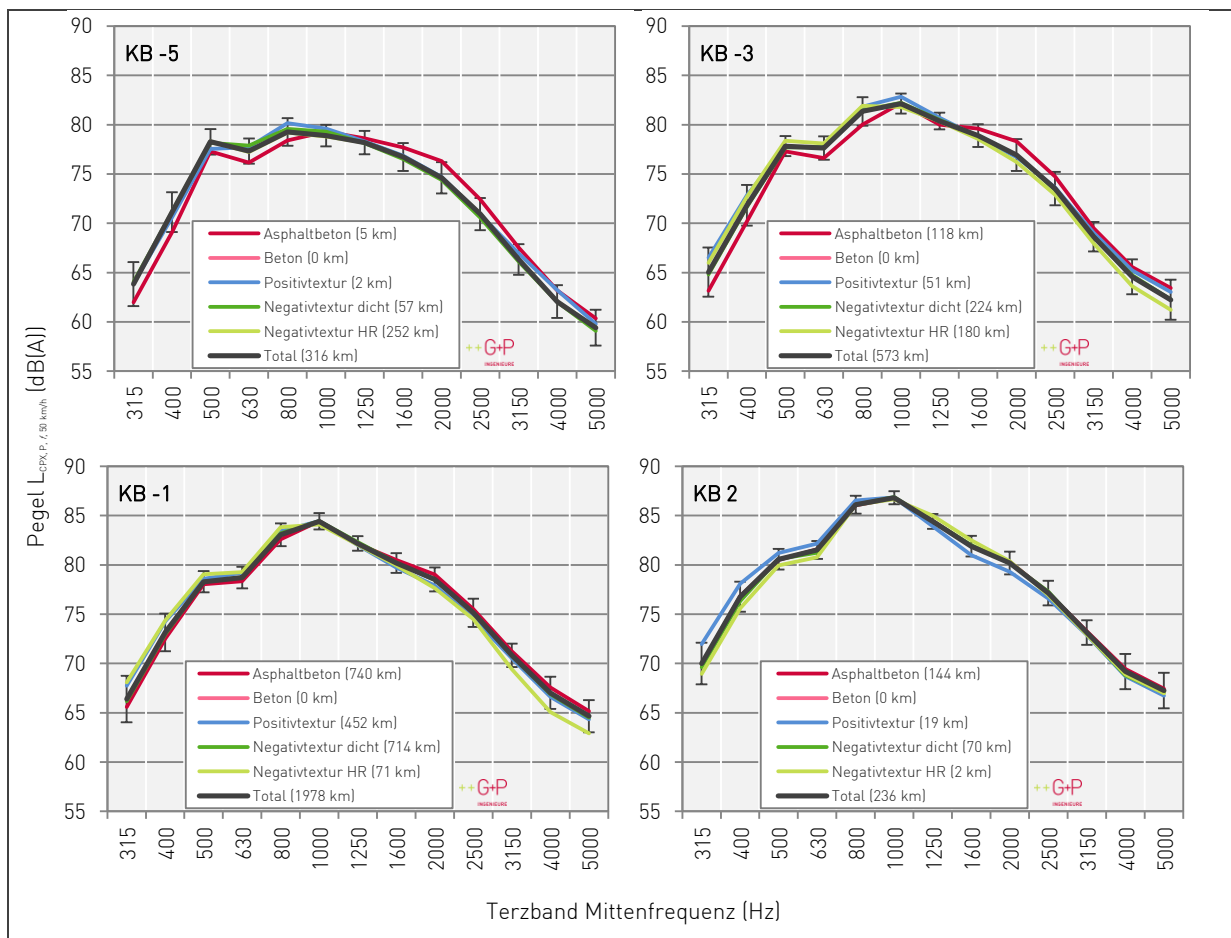


Abbildung 9: CPX-Spektren aufgeschlüsselt nach Belagsklasse für die KB-Klassen -5, -3, -1 und 2 bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h.

Kommentar

- Bei den tiefen KB-Klassen -5 und -3 fällt auf, dass sich Beläge der Klasse *Asphaltbeton* vom Gesamtspektrum abheben, auch wenn diese nicht unterrepräsentiert sind. Im tiefen Frequenzbereich sind ihre Pegel niedriger, im Luftströmungsbereich hingegen höher als die Pegel der anderen Belagsklassen.
- Bei den hohen KB-Klassen -1 und 2 liegen alle Spektren im Bereich der Standardabweichung des Gesamtspektrums.

15. Mai 2020

2.6.2 Referenzgeschwindigkeit 80 km/h

Abbildung 10 zeigt CPX-Spektren aufgeschlüsselt nach Belagsklasse für die KB-Klassen -2, 0, 3 und 5 bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h. In schwarz ist jeweils das CPX-Standardspektrum inklusive der Standardabweichung als Fehlerbalken dargestellt, welches dem Gesamtspektrum entspricht.

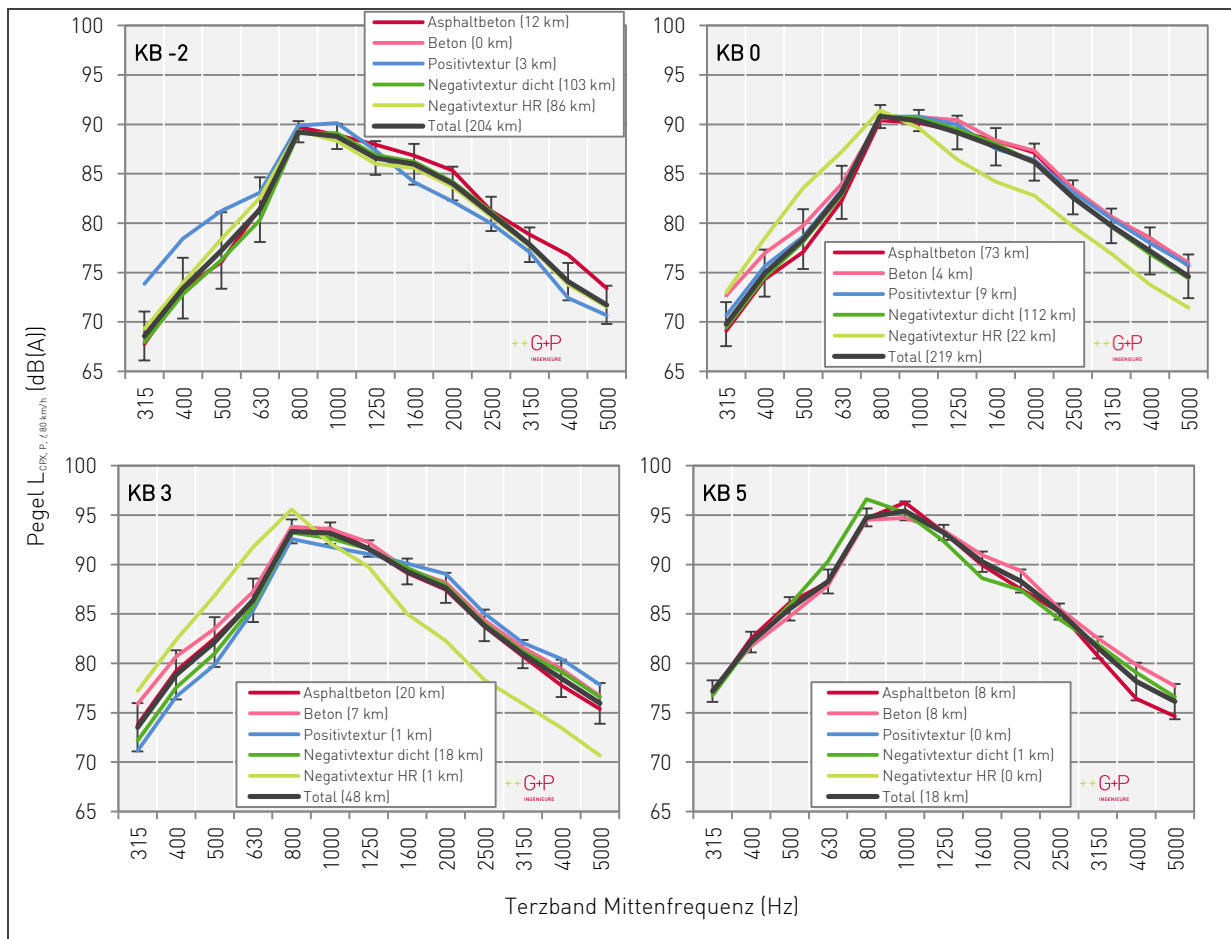


Abbildung 10: CPX-Spektren aufgeschlüsselt nach Belagsklasse für die KB-Klassen -2, 0, 3 und 5 bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h.

Kommentar

- Bei den KB-Klassen 0 und 3 ist deutlich erkennbar, dass sich die Spektren der Beläge der Klasse *Negativtextur HR* vom Gesamtspektrum abheben. Während ihr Pegel bei tieferen Frequenzen bis 800 Hz über dem Gesamtpegel liegt, haben diese Belagstypen stark reduzierte Pegel im Frequenzbereich von 1000 Hz aufwärts. Dies kann mit verstärkten Vibrationseffekten und zugleich guten Entlüftungseigenschaften erklärt werden. Zweitere sind z.B. bei der KB-Klasse -2 bei allen Belägen ausgeprägt.
- Bei der KB-Klasse -2 folgt das Spektrum der Klasse *Positivtextur* einem ähnlichen Muster, ist jedoch unterrepräsentiert und daher nur bedingt aussagekräftig.

15. Mai 2020

3. Zusammenfassung

Auf Grundlage aller CPX-Messdaten von Grolimund und Partner von 2008 bis 2019 wurden CPX-Standardspektren für die beiden Geschwindigkeitskategorien 50 und 80 km/h ermittelt. Dazu wurden die Daten gefiltert, in KB-Klassen klassiert (in Bezug auf die Mischverkehrswerte mit N2-Anteil 8% bzw. 15%) und arithmetisch gemittelt. Zu beachten ist, dass die KB-Klassierung anhand von Mischverkehrswerten vorgenommen wurde, die CPX-Standardspektren aber auf Messungen mit PW-Reifen basieren.

Die CPX-Spektren beider Geschwindigkeitskategorien liefern konsistente Werte, abgestützt auf einer umfassenden Datengrundlage. Wie an der Spreizung zwischen den einzelnen Spektren ersichtlich ist, haben bei tiefen KB-Klassen Luftströmungsgeräusche stärkeren Einfluss auf die Spektren, bei hohen KB-Klassen dominieren hingegen Vibrationsgeräusche. Der spektrale Verlauf der Belagskorrekturen ist somit abhängig von der KB-Klasse. Entsprechend wird empfohlen die KB-Klassen-spezifische Belagskorrektur gegenüber einer uniformen (spektral flachen) Korrektur in der Modellierung zu bevorzugen.

Die Standardabweichung liegt meist unter 2 bzw. 2.5 dB(A) (Referenzgeschwindigkeit 50 bzw. 80 km/h), die höchsten Werte treten im Allgemeinen bei tiefen Frequenzen und tendenziell den tiefen KB-Klassen auf. Eine Abhängigkeit der Standardabweichung von der Grösse der Datengrundlage ist nicht klar erkennbar und vermutlich durch die Population der Datengrundlage bestimmt. Trotzdem besteht weiterer Forschungsbedarf, um die erhöhten Werte der Standardabweichung bei tiefen Frequenzen weiter zu klären.

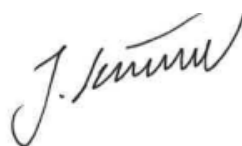
In der Datengrundlage sind Beläge der Klassen *Negativtextur dicht* und *Negativtextur Hohlraum* zu über 50% bzw. fast 75% enthalten (Referenzgeschwindigkeit 50 bzw. 80 km/h). Betrachtet man die CPX-Spektren belagsklassenspezifisch, zeigen sich bei tiefen KB-Klassen und Referenzgeschwindigkeit 50 km/h bei der Klasse *Asphaltbeton* Abweichungen vom Standardspektrum. Dasselbe gilt für die Klasse *Negativtextur Hohlraum* bei mittleren KB-Klassen und Referenzgeschwindigkeit 80 km/h. Auch wenn die Standardspektren über die verschiedenen Belagsklassen im Allgemeinen gut übertragbar sind, sollten besondere Belagstypen (z.B. Pflasterung, Beton-Bauweisen, spezifische oder neuartige Belagsentwicklungen) nach Möglichkeit spezifisch modelliert werden. Eine entsprechende spezifische, spektrale Belagskorrektur ist in sonROAD18 prinzipiell möglich.

Durch die gesamthafte Betrachtung der, schweizweit gesehen, bisher grössten Datenmenge von CPX-Messdaten von diversen Belägen, können interessante Einblicke sowohl in die Mechanismen der Reifen-Fahrbahn Geräuschenstehung als auch den Eigenschaften der CPX-Messmethode gewonnen werden. Weitere, vertiefte Analysen basierend auf diesem Ansatz sind vielversprechend.

Grolimund + Partner AG



Erik Bühlmann



Johannes Schindler



Felix Schlatter

Anhang

I Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: CPX-Standardspektren bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h.....	6
Abbildung 2: CPX-Standardspektren bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h.....	7
Abbildung 3: Pegelverlauf in Abhängigkeit der KB-Klasse für die Terzband Mittenfrequenzen 400 Hz, 500 Hz, 1000 Hz und 2500 Hz bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h.....	8
Abbildung 4: Pegelverlauf in Abhängigkeit der KB-Klasse für die Terzband Mittenfrequenzen 400 Hz, 500 Hz, 1000 Hz und 2500 Hz bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h.....	9
Abbildung 5: Prozentualer Anteil der verschiedenen Belagsklassen an der Datengrundlage bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h.....	11
Abbildung 6: Absolute Länge der enthaltenen Belagsklassen an der Datengrundlage bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h.....	11
Abbildung 7: Prozentualer Anteil der verschiedenen Belagsklassen an der Datengrundlage bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h.....	12
Abbildung 8: Absolute Länge der enthaltenen Belagsklassen an der Datengrundlage bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h.....	12
Abbildung 9: CPX-Spektren aufgeschlüsselt nach Belagsklasse für die KB-Klassen -5, -3, -1 und 2 bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h.....	13
Abbildung 10: CPX-Spektren aufgeschlüsselt nach Belagsklasse für die KB-Klassen -2, 0, 3 und 5 bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h.....	14
Abbildung 11: G+P Messsystem und CPX-Teststreifen P1 (links) und H1 (rechts) gemäss ISO TS 11819-3:2017.....	17
Abbildung 12: Schematische Übersicht des G+P Messsystems.....	18
Abbildung 13: Schema zur Datenauswertung und -korrektur.....	19
Abbildung 14: CPX Standardspektrum je KB-Klasse bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h.....	24
Abbildung 15: CPX Standardspektrum je KB-Klasse bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h.....	26
Abbildung 16: Standardabweichung und Datengrundlage je KB-Klasse und Terzband Mittenfrequenz bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h.....	28
Abbildung 17: Standardabweichung je Terzband Mittenfrequenz und KB-Klasse bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h.....	28
Abbildung 18: Standardabweichung und Datengrundlage je KB-Klasse und Terzband Mittenfrequenz bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h.....	29
Abbildung 19: Standardabweichung je Terzband Mittenfrequenz und KB-Klasse bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h.....	29

II Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Daten der CPX Standardspektren bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h.....	25
Tabelle 2: Daten der CPX Standardspektren bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h.....	27
Tabelle 3: Länge und prozentualer Anteil der in der Datengrundlage bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h enthaltene Belagstypen gruppiert nach Belagsklasse (HR: Hohlraum).....	30
Tabelle 4: Länge und prozentualer Anteil der in der Datengrundlage bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h enthaltene Belagstypen gruppiert nach Belagsklasse (HR: Hohlraum).....	31

15. Mai 2020

III CPX-Messverfahren

Die von G+P AG eingesetzte CPX-Methode richtet sich nach EN ISO 11819-2:2017. Bei dieser Methode werden die akustischen Eigenschaften von Strassenbelägen durch eine kontinuierliche und direkte Messung der Reifen-Fahrbahn Geräusche mit einem Messanhänger ermittelt.

CPX-Messsystem und Testreifen

Beim CPX-Messsystem wird der Schallpegel in zwei separaten schallgedämmten Kammern innerhalb des Messanhängers in unmittelbarer Reifennähe mit je zwei Mikrofonen gemessen. Der eingesetzte G+P Anhänger erfüllt die in der EN ISO 11819-2:2017 festgelegten Kriterien betreffend Beeinflussung der Messergebnisse durch geräteeigene Schallreflexionen sowie durch interne und externe Schallgeräusche (siehe Testergebnisse in Anhang 3).

Die verwendeten Testreifensätze sind in Abbildung 11 (rechts) dargestellt und entsprechen der Empfehlung der ISO TS 11819-3:2017: Uniroyal Tigerpaw (SRTT) 225/60-R16 (Testreifen P1 für Personenwagen/Cars) und Avon AV4 195-R14C (Testreifen H1 für Lastwagen/Trucks).



Abbildung 11: G+P Messsystem und CPX-Testreifen P1 (links) und H1 (rechts) gemäss ISO TS 11819-3:2017.

15. Mai 2020

Eine schematische Übersicht über das G+P Messsystem ist in Abbildung 12 dargestellt.

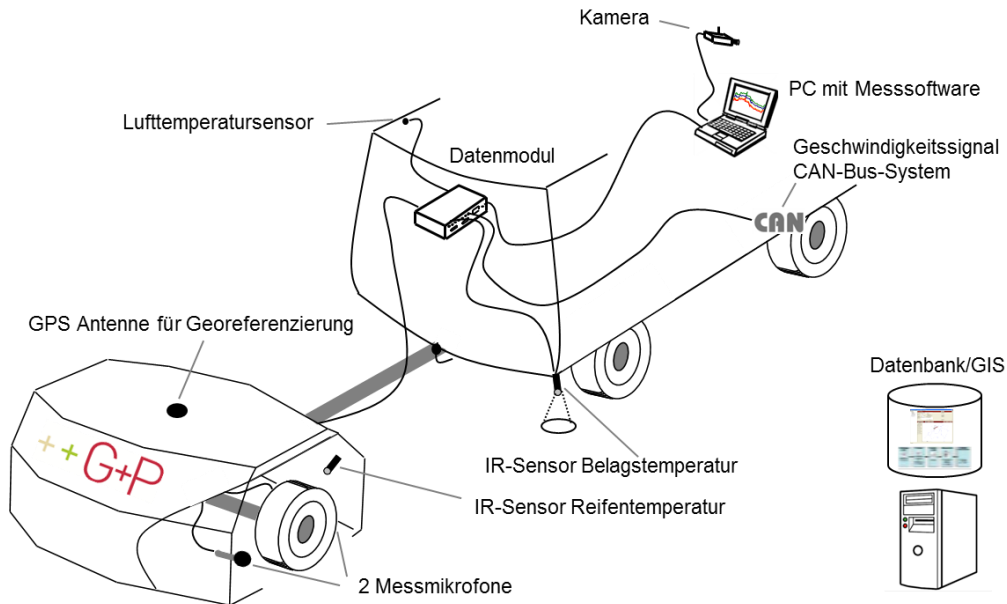


Abbildung 12: Schematische Übersicht des G+P Messsystems.

Die Signale der 4 Messmikrofone (2 Messmikrofone je Seite), das Geschwindigkeitssignal aus dem CAN-Bus-System des Zugfahrzeuges, das GPS-Signal für die Georeferenzierung der Messdaten, sowie die Signale der Temperatursensoren werden im zentralen Datenmodul verarbeitet und von der Messsoftware aufgezeichnet. Die unmittelbare grafische Anzeige der Messsignale ermöglicht die ständige Überwachung des gesamten Messvorgangs während der Fahrt. Eine Kamera auf der Vorderseite des Fahrzeugs fotografiert zu Interpretations- und Kontrollzwecken fortlaufend die Strassenoberfläche. Alle Messdaten werden vom Datenmodul mit Ort/Zeit-Angaben versehen und zur Auswertung in einer eigens entwickelten Datenbankapplikation abgelegt.

Messmethode

Pro Reifen werden die A-bewerteten Schallpegel kontinuierlich auf der gesamten Messstrecke erfasst. Dabei werden die Mikrofonsignale mit einer Frequenz von 8 Hz aufgezeichnet und pro Messsegment (Länge 20 m) energetisch gemittelt. Die Messfahrt erfolgt bei möglichst konstanter Geschwindigkeit (Referenzgeschwindigkeit von 50 km/h oder 80 km/h).

Datenauswertung und Datenkorrektur

Die Datenanalyse und -auswertung erfolgt nach den Vorgaben in der EN ISO 11819-2:2017, ISO TS 11819-3:2017 und ISO/DTS 13471-1:2016 geschilderten Vorgehensweise. Die Messresultate werden entsprechend der Messgeschwindigkeit sowie bezüglich geräteeigener Schallreflexionen, der in-situ gemessenen Lufttemperatur auf 1.5 m Höhe über dem Boden und der spezifischen Reifenhärte korrigiert. Eine schematische Darstellung des Vorgehens bei der Datenauswertung und -korrektur ist in Abbildung 13 gezeigt.

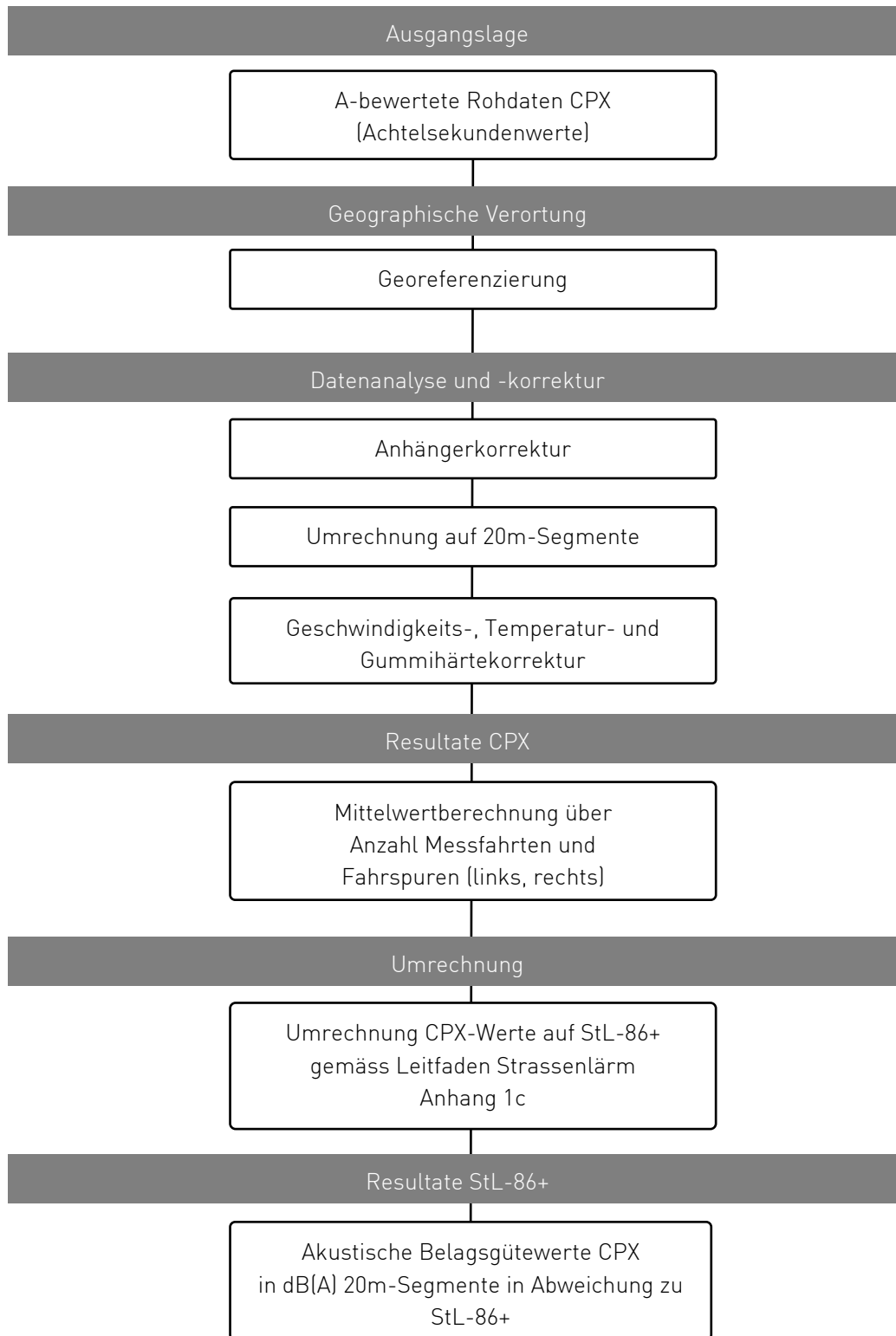


Abbildung 13: Schema zur Datenauswertung und -korrektur.

15. Mai 2020

Als erster Schritt werden die spektralen CPX-Daten der Mikrofonpositionen $m=1$ und $m=2$ für die linke und die rechte Messkammer energetisch gemittelt:

$$L'_{CPX:t,w,r,i,f} = 10 \cdot \lg \left[0.5 \cdot (10^{0.1 \cdot L_{CPX:t,w,r,i,f,1}}) + 0.5 \cdot (10^{0.1 \cdot L_{CPX:t,w,r,i,f,2}}) \right] \text{ dB} \quad (1)$$

$L_{CPX:t,w,r,i,f}$	CPX-Indexwert pro Mikrofon
$L'_{CPX:t,w,r,i,f}$	CPX-Indexwert pro Messkammer
t	CPX-Testreifen (P1, H1)
w	Reifenspur (links, rechts)
r	Indexnummer der Messfahrt
i	Indexnummer des 20 m-Messegments
f	Terzbandmittenfrequenz [Hz] (315 bis 5000 Hz)
$m=\{1,2\}$	Mikrofonpositionen 1 und 2 in der jeweiligen Messkammer

Anschließend erfolgt eine Korrektur bezüglich der geräteeigenen Schallreflexionen, der Geschwindigkeit, der Temperatur sowie der Reifengummihärte:

$$L_{CPX:t,w,r,i,f,v_{ref}} = 10 \cdot \lg \left[\sum_{f=315}^{5000} 10^{0.1 \cdot (L'_{CPX:t,w,r,i,f} + C_{d,t,f})} \right] \text{ dB} - C_{v,t,v_{ref}} - C_{T,t} - C_{H_{A,t}} \quad (2)$$

$L_{CPX:t,w,r,i,v_{ref}}$	korrigierter CPX-Indexwert pro Messreifen
$L'_{CPX:t,w,r,i}$	unkorrigierter CPX-Indexwert pro Messreifen
$C_{d,t,f}$	terzbandbasierte Anhängerkorrektur [dB] pro Messreifen
$C_{v,t,v_{ref}}$	reifen- und referenzgeschwindigkeitsspezifische Geschwindigkeitskorrektur [dB]
$C_{T,t}$	reifenspezifische Temperaturkorrektur [dB]
$C_{H_{A,t}}$	reifenspezifische Gummihärtekorrektur [dB]
t	CPX-Testreifen (P1, H1)
w	Reifenspur (links, rechts)
r	Indexnummer der Messfahrt
i	Indexnummer des 20 m-Messegments
f	Terzbandmittenfrequenz [Hz] (315 bis 5000 Hz)
v_{ref}	CPX Referenzgeschwindigkeit [km/h] (50 km/h, 80 km/h)

Anhängerkorrektur $C_{d,t,f}$

Die Anhängerkorrektur adressiert geräteeigene Schallreflexionen und wird terzbandspezifisch zum unkorrigierten CPX-Indexwert addiert (siehe Formel 2).

Geschwindigkeitskorrektur $C_{v,t,v_{ref}}$

Die Geschwindigkeitskorrektur gegenüber einer Referenzgeschwindigkeit von 50 km/h auf Messstrecken im Innerortsbereich oder 80 km/h auf Messstrecken auf Nationalstrassen berechnet sich wie folgt:

$$C_{v,t,v_{ref}} = B \cdot \lg \left(\frac{v_{t,w,r,i}}{v_{ref}} \right) \text{ dB} \quad (3)$$

$C_{v,t,v_{ref}}$	reifen- und referenzgeschwindigkeitsspezifische Geschwindigkeitskorrektur [dB]
B	Geschwindigkeitskonstante
$v_{t,w,r,i}$	reifenspezifische Messgeschwindigkeit pro Reifenspur, Messfahrt und 20 m-Messegment [km/h]
v_{ref}	CPX Referenzgeschwindigkeit [km/h] (50 km/h, 80 km/h)

15. Mai 2020

Temperaturkorrektur $C_{T,t}$

Die CPX-Indexwerte werden, entsprechend der Anforderungen des Projekts, mit einem der beiden folgenden Verfahren temperaturkorrigiert:

1. Norm, d.h. gemäss ISO/DTS 13471-1:2016

$$C_{T,t} = \gamma_{p,t} \cdot (T_{Luft150} - T_{ref}) \quad (4)$$

$$\gamma_{p,t} = \gamma_{P1} = \gamma_{H1} = -\omega_p + \varphi_p \cdot v_{ref} \quad (5)$$

$C_{T,t}$	reifenspezifische Temperaturkorrektur [dB]
$\gamma_{p,t}$	Belagstyp- und reifenspezifischer Temperaturkorrekturfaktor [dB/°C]
$T_{Luft150}$	in-situ, auf 1.5 m Höhe über dem Boden aufgezeichnete Lufttemperatur [°C]
T_{ref}	Referenzlufttemperatur von 20°C
ω_p	Belagstypabhängige Konstante [dB/°C] $\omega_p = -0.14$ für dichte Asphaltbeläge (z.B. AC, SMA, MR) $\omega_p = -0.10$ für Betonbeläge $\omega_p = -0.08$ für poröse Asphaltbeläge (z.B. SDA, Nanosoft 4)
φ_p	Belagstypabhängiger Korrekturfaktor [dB/(°C · km/h)] $\varphi_p = 0.0006$ für dichte Asphaltbeläge (z.B. AC, SMA, MR) $\varphi_p = 0.0004$ für Betonbeläge $\varphi_p = 0.0004$ für poröse Asphaltbeläge (z.B. SDA 4, Nanosoft 4)
v_{ref}	CPX Referenzgeschwindigkeit [km/h] (50 km/h, 80 km/h)

2. Detailliert, d.h. gemäss Bühlmann und Ziegler ("Temperature effects on tyre/road noise measurements", Proc. of InterNoise, Osaka (2011)):

$$C_{T,t} = \gamma_{T,t,p,f} \cdot (T_{Luft150} - 20^\circ C) \quad (6)$$

$C_{T,t}$	reifenspezifische Temperaturkorrektur [dB]
$\gamma_{T,t,p,f}$	belags- und reifenabhängiger spektraler Korrekturfaktor [dB(A) / °C]
$T_{Luft150}$	in-situ aufgezeichnete Lufttemperatur auf 1.5 m Höhe [°C]

Die detaillierte Temperaturkorrektur kommt teilweise bei Belagsmonitorings mit erhöhten Anforderungen an die spektrale Korrektur der gemessenen Beläge zur Anwendung.

Gummihärtekorrektur $C_{H_A,t}$

Gummihärtekorrekturen werden in Abhängigkeit des Reifentyps wie folgt berechnet:

$$C_{H_A,t} = \beta_t \cdot (H_{A,t} - H_{A,ref}) \quad (7)$$

$C_{H_A,t}$	reifenspezifische Gummihärtekorrektur [dB]
β_t	reifenspezifischer Gummihärte-Korrekturfaktor, wobei $\beta_{p1} = 0.12$ [dB/Shore A] und $\beta_{H1} = 0.20$ [dB/Shore A]
$H_{A,t}$	reifenspezifische Gummihärte bei 20 °C [Shore A]
$H_{A,ref}$	reifenspezifische Gummihärte-Referenzwert [Shore A], wobei $H_{A,p1,ref} = H_{A,H1,ref} = 66$ Shore A

15. Mai 2020

CPX Gesamtpegel

Für die Berechnung der CPX-Gesamtpegel werden korrigierten CPX-Rollgeräuschpegel über die Reifenspuren, die Messfahrten sowie die 20m-Segmente arithmetisch gemittelt.

$$L_{CPX:t,v_{ref}} = \frac{1}{n_w} \sum_{w=1}^{n_w} \left[\frac{1}{n_r} \sum_{r=1}^{n_r} \left(\frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^{n_i} L_{CPX:t,w,r,i,v_{ref}} \right) \right] \quad (8)$$

Umrechnung auf StL-86+ bei 50 km/h

CPX-Indexwerte repräsentieren die absoluten Schallpegel in 20 cm Distanz zum Reifen. Für die Interpretation der Resultate interessiert aber die Abweichung vom in der Schweiz gültigen Emissionsmodell StL-86+. Dazu wurden die CPX-Indexwerte an 67 Standorten mit SPB Messungen (Statistical Pass-By-Vorbeifahrtsmessungen) korreliert. Die zur Korrelation verwendeten SPB-Messungen wurden gemäss dem *Technischen Merkblatt für akustische Belagsgütemessungen an Strassen* (ASTRA/BAFU, 2006, Dokument UV-0637, Anhang 1c) durchgeführt.

Die Genauigkeit dieser Umrechnungsmodelle wurde anhand von Korrelations- und Regressionsanalysen überprüft. Die Bestimmtheitsmasse (R^2) für die verwendeten Umrechnungsmodelle betragen 94% für $L_{CPX:P}$ und SPB N1 (Vorbeifahrtsmessungen von Personenwagen und leichten Fahrzeugen) und 64% für $L_{CPX:H}$ und SPB N2 (Vorbeifahrtsmessungen von Lastwagen und schweren Fahrzeugen).

Für das Umrechnungsmodell $L_{CPX:P}$ - SPB N1 liegt das 95% Vertrauensintervall zwischen ± 0.2 bis ± 0.8 dB(A). Für das Umrechnungsmodell $L_{CPX:H}$ - SPB N2 bewegt sich das 95% Vertrauensintervall zwischen ± 0.3 bis ± 1.4 dB(A).

Berechnung Mischverkehrswert

Ausgehend von der Quellenfunktion des StL-86+⁶ kann der Mischverkehrswert, gewichtet nach dem Schwerverkehrsanteil (N_2 -Anteil) berechnet werden. Hierzu wird

$$L = A + 10 \log \left(\left(1 + \left(\frac{v}{50} \right)^3 \right) \left(1 + B N_{2p} \left(1 - \frac{v}{150} \right) \right) \right) + 10 \log (N_1 + N_2)$$

$$= A + 10 \log \left(\left(1 + \left(\frac{v}{50} \right)^3 \right) N_1 + \left(1 + \left(\frac{v}{50} \right)^3 \right) N_2 \left(1 + B \left(1 - \frac{v}{150} \right) \right) \right)$$

mit A ... empirische Konstante = 43

B ... empirische Konstante = 20

v ... Geschwindigkeit (hier 50 oder 80 km/h)

N_{2p} ... Schwerverkehrsanteil (hier 0.08 oder 0.15), $N_{2p} = (N_1 + N_2)/N_2$

N_1, N_2 ... absolute stündliche Anzahl Fahrzeuge der Kategorie 1 oder 2

für beide Fahrzeugkategorien einzeln berechnet. Der Summenpegel $L(1) \oplus L(2)$ beider Fahrzeugkategorien ergibt sich nach Umstellen durch die energetische Addition:

⁶ In: *Computermodell zur Berechnung von Strassenlärm, Teil I: Bedienungsanleitung zum Computerprogramm StL-86*, Kapitel 6.2.2

15. Mai 2020

$$L(1) \oplus L(2) = \left(A + 10 \log \left(\left(1 + \left(\frac{v}{50} \right)^3 \right) N_1 \right) \right) \oplus \left(A + 10 \log \left(\left(1 + \left(\frac{v}{50} \right)^3 \right) N_2 \left(1 + B \left(1 - \frac{v}{150} \right) \right) \right) \right)$$

wobei \oplus der energetischen Summe entspricht:

$$x \oplus y = 10 \log (10^{0.1x} + 10^{0.1y})$$

Der Mischverkehrswert ΔL ergibt sich schliesslich als die Differenz aus dem Summenpegel $L_{pav}(1) \oplus L_{pav}(2)$, der die gemessene Belagskorrektur K_{pav} enthält und $L(1) \oplus L(2)$:

$$\Delta L = [L_{pav}(1) \oplus L_{pav}(2)] - [L(1) \oplus L(2)]$$

$$\Delta L = \left[\left(K_{pav,1} + A + 10 \log \left(\left(1 + \left(\frac{v}{50} \right)^3 \right) N_1 \right) \right) \oplus \left(K_{pav,2} + A + 10 \log \left(\left(1 + \left(\frac{v}{50} \right)^3 \right) N_2 \left(1 + B \left(1 - \frac{v}{150} \right) \right) \right) \right) \right] - \left[\left(A + 10 \log \left(\left(1 + \left(\frac{v}{50} \right)^3 \right) N_1 \right) \right) \oplus \left(A + 10 \log \left(\left(1 + \left(\frac{v}{50} \right)^3 \right) N_2 \left(1 + B \left(1 - \frac{v}{150} \right) \right) \right) \right) \right]$$

$$\Delta L = \left[\left(K_{pav,1} + 10 \log \left(\left(1 + \left(\frac{v}{50} \right)^3 \right) (1 - N_{2p}) \right) \right) \oplus \left(K_{pav,2} + 10 \log \left(\left(1 + \left(\frac{v}{50} \right)^3 \right) N_{2p} \left(1 + B \left(1 - \frac{v}{150} \right) \right) \right) \right) \right] - \left[\left(10 \log \left(\left(1 + \left(\frac{v}{50} \right)^3 \right) (1 - N_{2p}) \right) \right) \oplus \left(10 \log \left(\left(1 + \left(\frac{v}{50} \right)^3 \right) N_{2p} \left(1 + B \left(1 - \frac{v}{150} \right) \right) \right) \right) \right]$$

$$\Delta L = \left[\left(K_{pav,1} + 10 \log (1 - N_{2p}) \right) \oplus \left(K_{pav,2} + 10 \log \left(N_{2p} \left(1 + B \left(1 - \frac{v}{150} \right) \right) \right) \right) \right] - \left[\left(10 \log (1 - N_{2p}) \right) \oplus \left(10 \log \left(N_{2p} \left(1 + B \left(1 - \frac{v}{150} \right) \right) \right) \right) \right]$$

15. Mai 2020

IV CPX-Standardspektren: 50 km/h

Abbildung 14 zeigt die CPX Standardspektren bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h für alle KB-Klassen mit Datengrundlage grösser als 10 km. Auf der x-Achse ist jeweils die Terzband Mittenfrequenz in Herz dargestellt, auf der y-Achse der Pegel $L_{CPX, P, f, 50km/h}$ in dB(A). Die gezeigten Datenpunkte entsprechen den arithmetischen Mittelwerten der entsprechenden CPX PW Messungen, die Fehlerbalken sind deren empirische Standardabweichung. Die KB-Klassen wurden anhand des Mischverkehrswertes mit einem N2-Anteil von 8% gebildet.

Die entsprechenden Daten sind in Tabelle 1 aufgelistet.

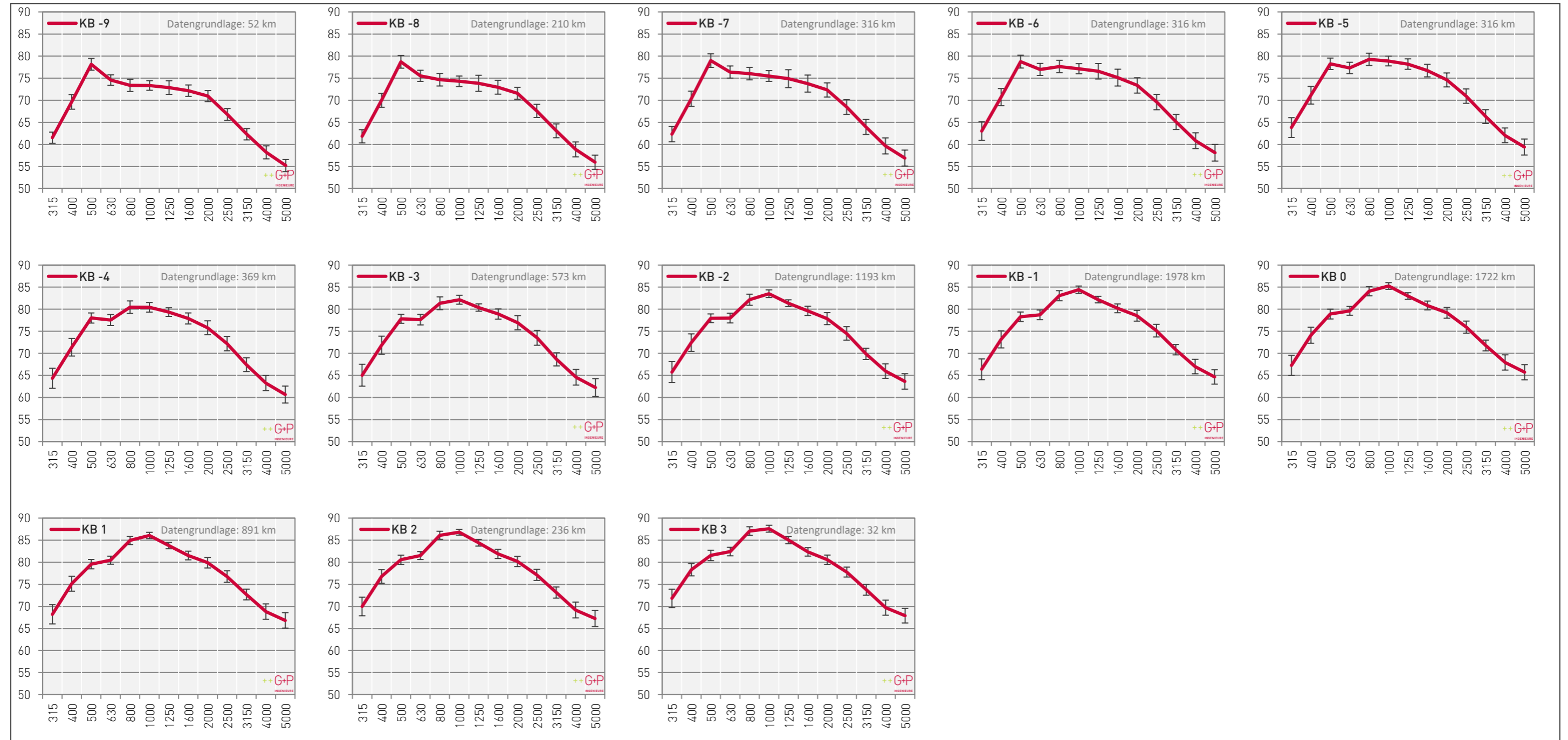


Abbildung 14: CPX Standardspektrum je KB-Klasse bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h.

15. Mai 2020

Tabelle 1: Daten der CPX Standardspektren bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h.

KB-Klasse (MV8)	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
Terzband Mittenfrequenz f[Hz]	Pegel L_{CPX,P, f,50km/h} [dB(A)]														
315	61.5	61.8	62.3	63.0	63.8	64.3	65.0	65.7	66.4	67.3	68.2	70.0	71.8		
400	69.6	70.0	70.3	70.7	71.1	71.4	71.8	72.4	73.1	74.1	75.1	76.8	78.3		
500	78.2	78.7	79.0	78.8	78.3	78.0	77.8	77.9	78.3	78.9	79.6	80.6	81.5		
630	74.6	75.5	76.4	77.0	77.3	77.5	77.6	78.0	78.7	79.6	80.5	81.5	82.4		
800	73.4	74.7	76.0	77.6	79.3	80.5	81.3	82.1	83.0	84.1	84.9	86.1	87.1		
1000	73.3	74.3	75.5	77.1	78.9	80.4	82.1	83.5	84.4	85.3	86.1	86.8	87.6		
1250	72.9	73.8	74.9	76.6	78.2	79.3	80.4	81.4	82.2	83.0	83.8	84.4	85.0		
1600	72.2	73.0	73.8	75.1	76.7	77.9	78.9	79.6	80.2	80.8	81.5	81.9	82.3		
2000	70.9	71.6	72.3	73.4	74.6	75.8	76.9	77.9	78.5	79.2	79.9	80.2	80.6		
2500	66.8	67.6	68.5	69.6	70.9	72.2	73.5	74.5	75.1	75.9	76.8	77.1	77.8		
3150	62.3	63.1	63.9	65.1	66.3	67.4	68.6	69.9	70.8	71.8	72.7	73.1	73.8		
4000	58.2	58.9	59.7	60.8	62.1	63.2	64.6	66.0	67.0	67.9	68.8	69.2	69.7		
5000	55.2	56.0	56.9	58.1	59.4	60.7	62.2	63.6	64.6	65.7	66.8	67.2	67.9		
	Standardabweichung [dB(A)]														
315	1.3	1.5	1.7	2.1	2.2	2.3	2.5	2.4	2.3	2.3	2.2	2.1	2.1		
400	1.7	1.6	1.7	1.9	2.0	2.0	2.1	2.0	1.9	1.8	1.7	1.5	1.4		
500	1.3	1.4	1.5	1.4	1.3	1.1	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.0	1.2		
630	1.2	1.3	1.4	1.4	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	1.0	0.9	0.9	1.0		
800	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.5	1.3	1.1	1.0	0.9	0.9	1.0		
1000	1.1	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7	0.8		
1250	1.5	1.8	2.0	1.7	1.2	1.0	0.8	0.8	0.7	0.8	0.7	0.8	0.8		
1600	1.3	1.6	1.9	1.9	1.4	1.3	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		
2000	1.2	1.4	1.6	1.7	1.6	1.6	1.6	1.4	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1		
2500	1.4	1.5	1.7	1.7	1.6	1.6	1.7	1.5	1.4	1.4	1.3	1.2	1.1		
3150	1.3	1.6	1.7	1.7	1.6	1.5	1.5	1.3	1.2	1.2	1.2	1.3	1.2		
4000	1.5	1.7	1.8	1.8	1.7	1.7	1.8	1.6	1.6	1.7	1.7	1.8	1.7		
5000	1.4	1.6	1.8	1.9	1.8	1.9	2.0	1.8	1.6	1.7	1.7	1.8	1.7		
Datengrundlage [km]	51.6	210.2	316.4	316.3	316.1	369.3	573.5	1193.0	1978.3	1721.6	890.8	235.8	32.2		

15. Mai 2020

V CPX-Standardspektren: 80 km/h

Abbildung 15 zeigt die CPX Standardspektren bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h für alle KB-Klassen mit Datengrundlage grösser als 10 km. Auf der x-Achse ist jeweils die Terzband Mittenfrequenz in Herz dargestellt, auf der y-Achse der Pegel $L_{CPX,P, f, 80km/h}$ in dB(A). Die gezeigten Datenpunkte entsprechen den arithmetischen Mittelwerten der entsprechenden CPX PW Messungen, die Fehlerbalken sind deren empirische Standardabweichung. Die KB-Klassen wurden anhand des Mischverkehrswertes mit einem N2-Anteil von 15% gebildet.

Die entsprechenden Daten sind in Tabelle 2 aufgelistet.

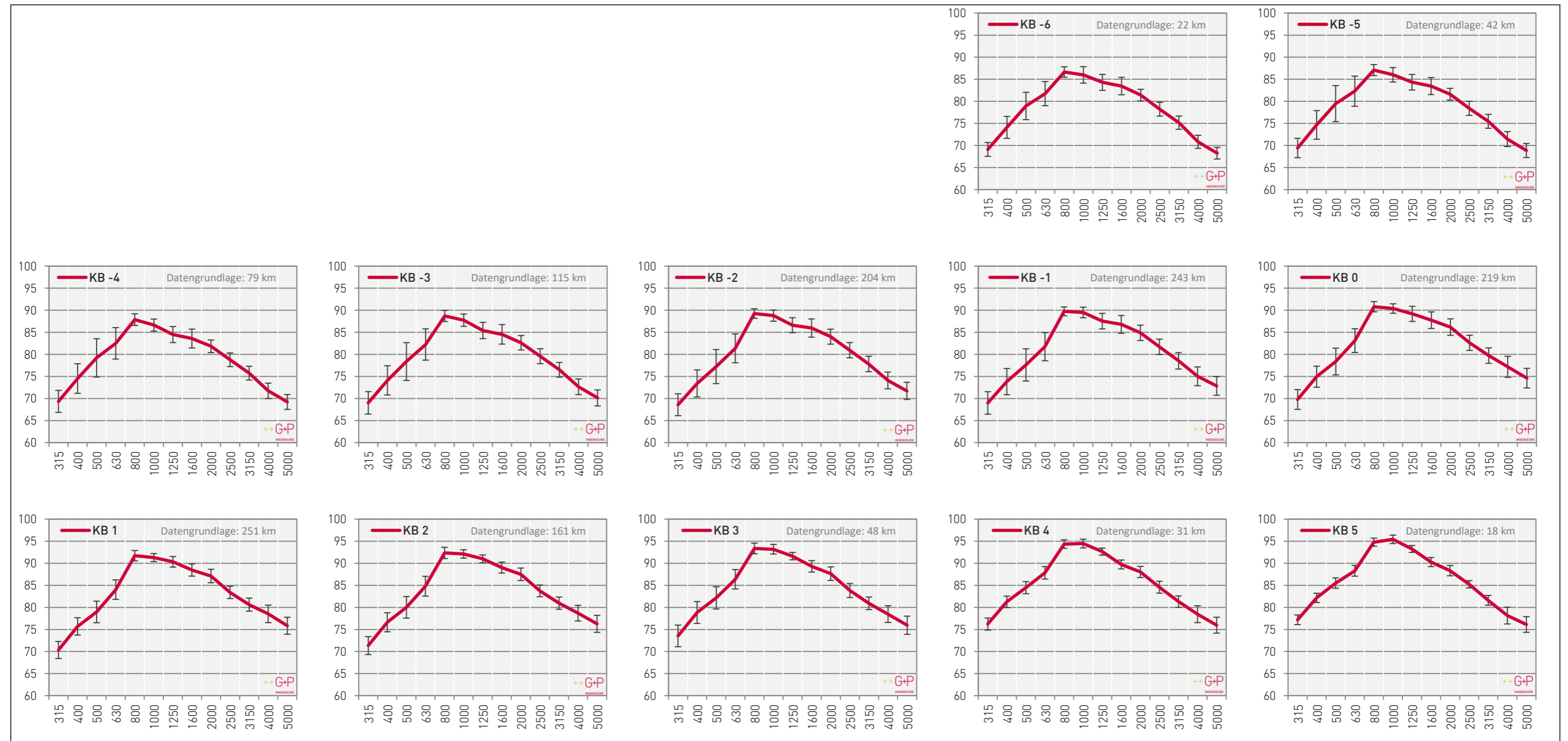


Abbildung 15: CPX Standardspektrum je KB-Klasse bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h.

15. Mai 2020

Tabelle 2: Daten der CPX Standardspektren bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h.

KB-Klasse (MV15)	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
Terzband Mittenfrequenz f[Hz]	Pegel L_{CPX,P, f,80km/h} [dB(A)]														
315				69.1	69.4	69.3	69.0	68.6	69.0	69.8	70.3	71.4	73.5	76.2	77.2
400				74.1	74.7	74.5	74.1	73.4	73.8	74.9	75.7	76.6	78.8	81.3	82.2
500				78.9	79.5	79.2	78.4	77.2	77.6	78.4	79.0	80.0	82.2	84.5	85.5
630				81.7	82.3	82.5	82.2	81.4	81.7	83.1	84.0	84.8	86.4	87.8	88.3
800				86.6	87.1	87.9	88.7	89.2	89.8	90.8	91.7	92.3	93.4	94.3	94.8
1000				86.0	86.0	86.6	87.8	88.8	89.5	90.4	91.3	92.1	93.2	94.5	95.4
1250				84.3	84.3	84.5	85.4	86.6	87.5	89.2	90.3	91.0	91.6	92.6	93.2
1600				83.5	83.5	83.6	84.5	86.0	86.8	87.7	88.5	89.0	89.3	89.7	90.3
2000				81.4	81.6	81.8	82.6	84.0	84.9	86.2	87.1	87.5	87.6	88.0	88.3
2500				78.2	78.4	78.8	79.6	80.9	81.7	82.6	83.4	83.7	83.8	84.6	85.2
3150				75.2	75.5	75.7	76.5	77.8	78.5	79.7	80.6	81.0	80.9	81.3	81.6
4000				70.8	71.4	71.7	72.7	74.1	75.0	77.2	78.5	78.7	78.5	78.5	78.2
5000				68.3	68.9	69.2	70.1	71.7	72.8	74.6	75.8	76.3	76.0	76.0	76.1
	Standardabweichung [dB(A)]														
315				1.6	2.2	2.5	2.5	2.5	2.6	2.2	1.9	2.0	2.5	1.4	1.1
400				2.5	3.2	3.3	3.3	3.1	3.0	2.4	2.0	2.2	2.5	1.3	1.1
500				3.1	4.1	4.3	4.3	3.9	3.7	3.0	2.4	2.4	2.5	1.4	1.2
630				2.7	3.4	3.6	3.5	3.3	3.2	2.7	2.2	2.2	2.2	1.4	1.2
800				1.2	1.2	1.3	1.3	1.1	1.0	1.2	1.2	1.3	1.2	1.0	0.9
1000				1.9	1.6	1.4	1.4	1.3	1.2	1.1	0.9	1.0	1.1	1.0	1.0
1250				1.8	1.8	1.8	1.8	1.7	1.8	1.7	1.2	0.9	0.8	0.8	0.8
1600				2.0	1.9	2.1	2.2	2.1	2.0	1.9	1.4	1.2	1.3	1.0	1.0
2000				1.3	1.3	1.4	1.6	1.7	1.7	1.9	1.5	1.4	1.5	1.3	1.2
2500				1.6	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7	1.7	1.4	1.3	1.6	1.3	0.8
3150				1.5	1.6	1.6	1.7	1.7	1.9	1.8	1.5	1.4	1.4	1.3	1.1
4000				1.5	1.7	1.7	1.8	1.9	2.1	2.4	2.0	1.8	1.9	1.9	1.9
5000				1.3	1.6	1.7	1.8	1.9	2.1	2.2	1.9	1.9	2.1	1.8	1.8
Datengrundlage [km]				22.2	42.5	79.1	114.8	203.8	242.8	218.9	251.3	161.0	48.1	30.5	18.0

VI Standardabweichung 50 km/h

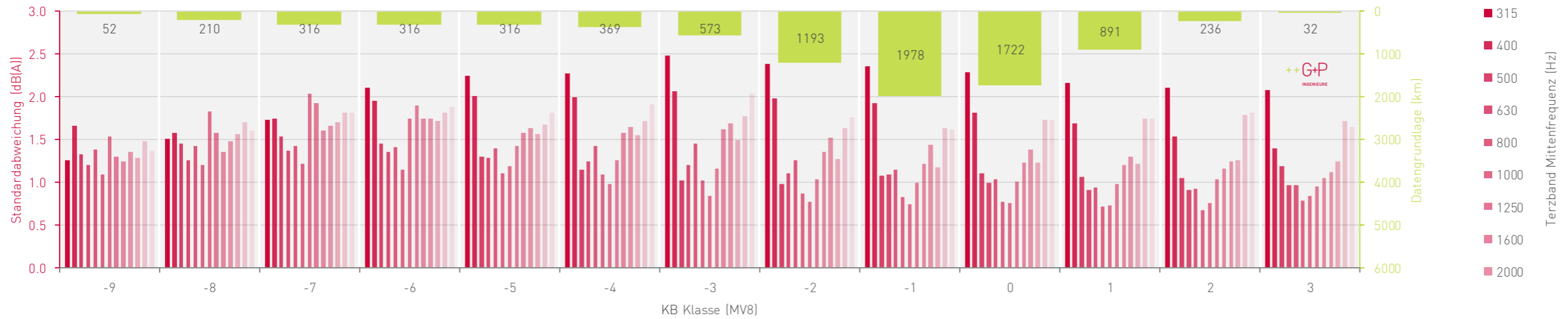


Abbildung 16: Standardabweichung und Datengrundlage je KB-Klasse und Terzband Mittenfrequenz bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h.

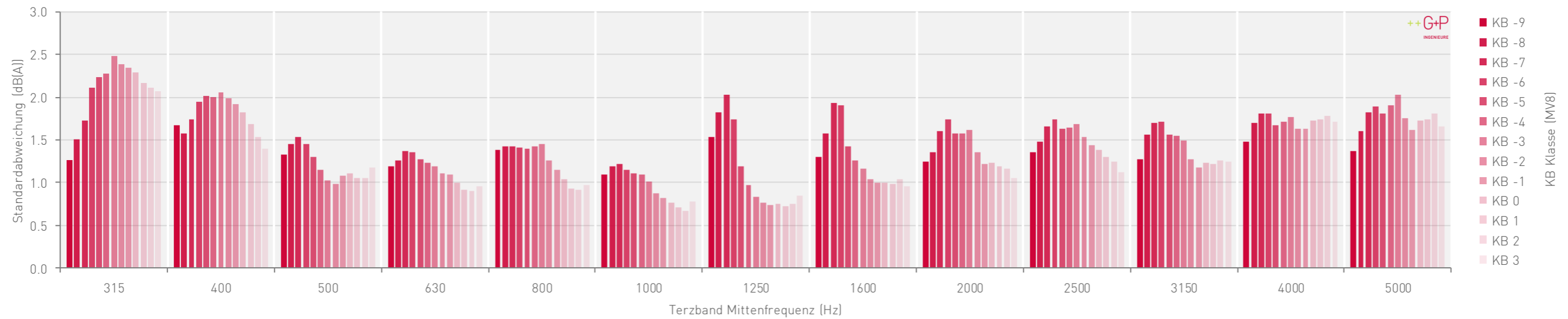


Abbildung 17: Standardabweichung je Terzband Mittenfrequenz und KB-Klasse bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h.

VII Standardabweichung 80 km/h

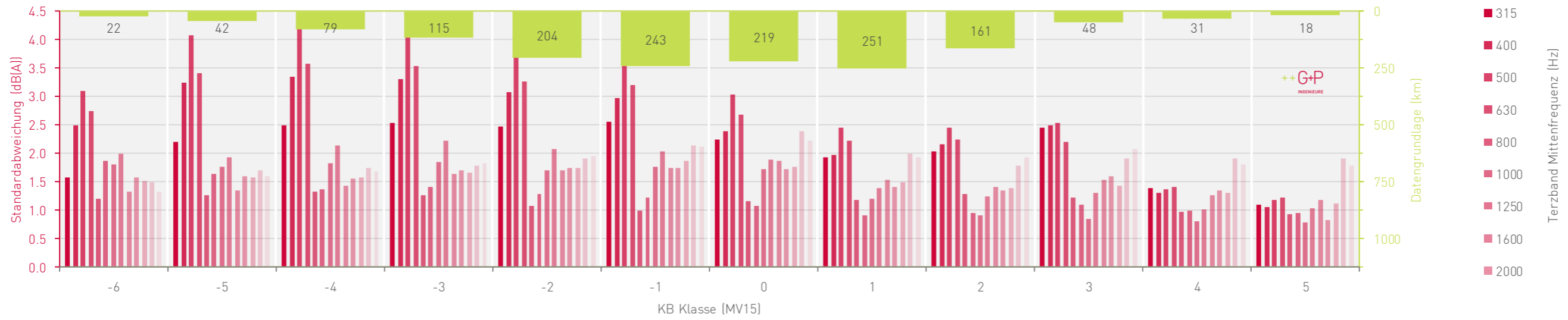


Abbildung 18: Standardabweichung und Datengrundlage je KB-Klasse und Terzband Mittenfrequenz bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h.

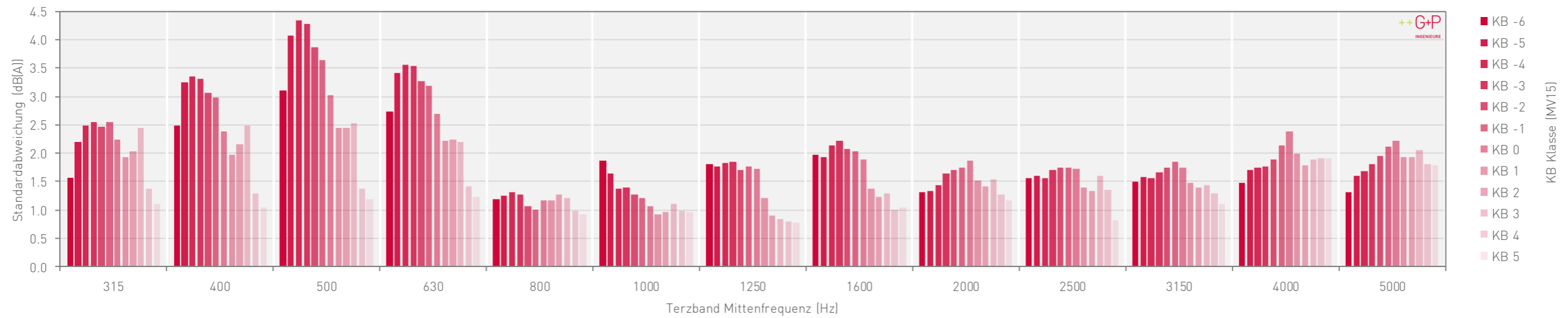


Abbildung 19: Standardabweichung je Terzband Mittenfrequenz und KB-Klasse bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h.

VIII Enthaltene Beläge 50 km/h

Tabelle 3: Länge und prozentualer Anteil der in der Datengrundlage bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h enthaltene Belagstypen gruppiert nach Belagsklasse (HR: Hohlraum).

Belagsklasse	Belagstyp	Länge (km)	Anteil (%)
Asphaltbeton		2605.0	31.7
	AC10	3.4	0.0
	AC11	1045.8	12.7
	AC16	110.7	1.3
	AC6	15.0	0.2
	AC8	164.6	2.0
	ACB22	1.0	0.0
	ACT22	19.3	0.2
	TA	391.8	4.8
	TA10	605.7	7.4
	TA16	245.3	3.0
	TA25	0.6	0.0
	TA6	1.7	0.0
Beton		5.6	0.1
Negativtextur dicht		2659.2	32.4
	ACMR11	39.2	0.5
	ACMR16	1.5	0.0
	ACMR4	14.2	0.2
	ACMR6	1.3	0.0
	ACMR8	849.3	10.3
	DASK4	9.4	0.1
	DSAH11	0.9	0.0
	DSAH6	1.7	0.0
	DSAK	173.9	2.1
	DSAK11	2.4	0.0
	DSAK3	4.2	0.1
	DSAK6	160.4	2.0
	DSAK8	15.2	0.2
	HRA	2.2	0.0
	HRA16	0.8	0.0
	SDA4A	7.3	0.1
	SDA8A	12.1	0.1
	SMA11	920.7	11.2
	SMA16	2.1	0.0
	SMA6	42.5	0.5

Belagsklasse	Belagstyp	Länge (km)	Anteil (%)
	SMA8	393.9	4.8
	SPA11	1.4	0.0
	SPA4	2.1	0.0
	SPA8	0.4	0.0
Negativtextur HR		1766.3	21.5
	Altiphone6	1.6	0.0
	Camaphone4	13.9	0.2
	Colaphone	0.6	0.0
	Colsoft8	2.8	0.0
	Famsi	231.6	2.8
	Griphone4	0.7	0.0
	MOA-leise4	0.8	0.0
	MoaMikro5	6.3	0.1
	Mobiphone4	11.2	0.1
	Nano4dicht	0.7	0.0
	Nanosoft4	304.0	3.7
	Nanosoft6	1.5	0.0
	PA4	1.7	0.0
	PA8	0.4	0.0
	Perrphone4	19.3	0.2
	Phono4	1.3	0.0
	Rugosoft4	0.7	0.0
	Rugosoft6	0.7	0.0
	Sapa4dicht	3.3	0.0
	Sapaphone4	231.8	2.8
	SDA4	138.6	1.7
	SDA4-12	273.2	3.3
	SDA4-16	127.6	1.6
	SDA4-20	8.9	0.1
	SDA6	4.0	0.0
	SDA6B	4.1	0.0
	SDA6C	2.6	0.0
	SDA8	89.0	1.1
	SDA8-12	245.1	3.0
	SDA8-16	12.9	0.2
	SDAB	3.1	0.0
	Tanaphone4	16.4	0.2
	Wecophone6	6.0	0.1

Belagsklasse	Belagstyp	Länge (km)	Anteil (%)
Positivtextur		1176.4	14.3
	MA11	12.7	0.2
	MA16	1.7	0.0
	MA22	0.6	0.0
	MA6	1.2	0.0
	MA8	1.8	0.0
	MA8 2/4	0.5	0.0
	MA8 3/6	0.6	0.0
	OB	1051.3	12.8
	OB11	26.5	0.3
	OB6	51.9	0.6
	OB8	27.6	0.3
Summe		8212.5	100.0

15. Mai 2020

IX Enthaltene Beläge 80 km/h

Tabelle 4: Länge und prozentualer Anteil der in der Datengrundlage bei Referenzgeschwindigkeit 80 km/h enthaltene Belagstypen gruppiert nach Belagsklasse (HR: Hohlraum).

Belagsklasse	Belagstyp	Länge (km)	Anteil (%)
Asphaltbeton		312.6	21.7
	AC11	109.8	7.6
	AC16	105.5	7.3
	AC8	0.6	0.0
	ACT22	1.7	0.1
	TA	27.7	1.9
	TA16	67.2	4.7
Beton		43.8	3.0
Negativtextur dicht		649.6	45.1
	ACMR11	158.3	11.0
	ACMR6	1.3	0.1
	ACMR8	129.8	9.0
	DSAK	3.5	0.2
	DSAK11	2.0	0.1
	DSAK6	7.8	0.5
	HRA	0.1	0.0
	HRA16	6.1	0.4
	SDA8A	166.3	11.6
	SMA11	154.1	10.7
	SMA16	1.7	0.1
	SMA8	18.8	1.3
Negativtextur HR		406.1	28.2
	PA11	122.5	8.5
	PA8	80.0	5.6
	SDA4-12	0.0	0.0
	SDA8	128.4	8.9
	SDA8-12	68.8	4.8
	SDA8-16	6.5	0.4
Positivtextur		27.8	1.9
	MA11	6.9	0.5
	MA16	14.7	1.0
	MA8	2.3	0.2
	MA8 2/4	2.7	0.2
	OB	1.2	0.1
Summe		1439.8	100.0