



Monitoring lärmarmen Strassenbeläge auf Nationalstrassen

Standbericht 2024

Dokumentnummer: ASTRA-D-62B33401/1643



Impressum

Erstelldatum / Revisionsdatum:	29.09.2023
Ersteller/in:	Grolimund + Partner AG
Verzeichnis / Dateiname:	20240618_Bericht_TP_Monitoring lärmarme Beläge.docx
Anzahl Seiten:	49
Genehmigt am:	18.06.2024
Genehmigt von:	FG Lärm, ASTRA



Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	6
1.1	Rechtliche Grundlagen	6
1.2	Projekthintergrund & Ziele	7
1.3	Lärmarme Beläge des ASTRA	7
1.3.1	SDA 8-12 und ACMR 8	8
1.3.2	PA 8 / PA 11	9
1.3.3	Weitere lärmarme Beläge des ASTRA	9
2	Methodik	10
2.1	Messmethoden	10
2.1.1	CPX-Messung	10
2.1.2	SPB-Messung	11
2.2	Datengrundlage & Datenaufbereitung	12
2.2.1	CPX-Messdaten	12
2.2.2	SPB-Messdaten	14
2.2.3	Bohrkern- und Mischgutuntersuchungen	15
2.2.4	Verkehrsdaten	17
2.3	Datenauswertung	18
2.3.1	Alterungsmodell	18
2.3.2	Verkehrseinfluss / Spureinfluss	20
2.3.3	Bauparameter	20
3	Resultate & Diskussion	21
3.1	Alterungskurven lärmarme Beläge	21
3.1.1	Alterungskurve SDA 8-12	21
3.1.2	Alterungskurve ACMR 8	22
3.1.3	Alterungskurve PA 11 / PA 8	23
3.2	Belagskennwerte	25
3.3	Belagswirkung - Einfluss Verkehr	26
3.3.1	Normalspur vs. Überholspur	26
3.3.2	Einfluss Verkehrsbelastung und Belagsalter	28
3.4	Belagswirkung – Einfluss Bauparameter	29
3.4.1	Hohlraumgehalt (volumetrisch)	29
3.4.2	Siebkurven der Mischgüter	31
3.4.3	Einflussreiche Bauparameter	32
4	Schlussfolgerung	33
5	Anhang	35
	Anhang 1: Literaturverzeichnis	35
	Anhang 2: Glossar	36
	Anhang 3: Übersichtskarten der CPX-Datengrundlage	37
	Anhang 4: Liste mit SPB-Standorten	40
	Anhang 5: Alterungskurven	41
	Anhang 6: Lineare Modelle	49

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Aktuelle Strategie des ASTRA beim Einbau von lärmarmen Belägen.....	7
Abbildung 2:	Nahaufnahme eines SDA 8-Belags.	8
Abbildung 3:	Nahaufnahme eines ACMR 8-Belags.	8
Abbildung 4:	Aufnahme eines PA-Belags.	9
Abbildung 5:	Bild des von Grolimund + Partner AG verwendeten CPX-Messanhängers....	10
Abbildung 6:	Schematische Darstellung des CPX-Messprinzips.	10
Abbildung 7:	Mikrofonpositionen bei einer SPB-Messung.	11
Abbildung 8:	Pegelverlauf einer einzelnen Vorbeifahrtmessung.....	11
Abbildung 9:	Übersicht der CPX-Messdaten von G+P AG auf Nationalstrassen.	13
Abbildung 10:	Übersicht der berücksichtigten CPX-Messdaten nach der Filterung.	13
Abbildung 11:	Übersicht der berücksichtigten SPB-Messdaten.....	14
Abbildung 12:	Übersicht der digitalisierten Bohrkerne.	16
Abbildung 13:	Übersicht der digitalisierten Mischgutuntersuchungen.	16
Abbildung 14:	Beispiel von digitalisierten Mischgut- (braune Polygone) und Bohrkerntuntersuchungen (grüne Punkte).	17
Abbildung 15:	Darstellung der berechneten Alterungskurven aus dem technischen Bericht von 2017 für N1 (PW) und N2 (LKW).....	18
Abbildung 16:	Exemplarische Darstellung der berechneten Alterungskurven für den Mischverkehrswert MV15 im vorliegenden Bericht.	19
Abbildung 17:	Exemplarische Darstellung der geschätzten Belagswirkung (Mittelwert) bei Belägen mit wenig Messdaten.	19
Abbildung 18:	Alterungskurve des SDA 8-12-Belags basierend auf den CPX-Messdaten. ..	21
Abbildung 19:	Alterungskurven des ACMR 8-Belags basierend auf den CPX-Messdaten (rote Boxplots und dunkelgraue Kurven) und den SPB-Messdaten (grüne Sterne und grüne Kurven).....	22
Abbildung 20:	CPX-Messdaten der ACMR 8-Beläge, aufgeschlüsselt nach den zwei Belagsrezepturen «vor Januar 2013» (= 8 % Hohlraumgehalt) und «nach Januar 2013» (= 6 % Hohlraumgehalt).	23
Abbildung 21:	Alterungskurven des PA 11-Belags basierend auf den CPX-Messdaten (rote Boxplots und dunkelgraue Kurven) und den SPB-Messdaten (grüne Sterne und grüne Kurven).....	24
Abbildung 22:	Alterungskurve des PA 8-Belags basierend auf den CPX-Messdaten.	24
Abbildung 23:	CPX-Messdaten der SDA 8-Beläge, aufgeschlüsselt nach der Wirkung pro Belagsalter und Fahrspur.	26
Abbildung 24:	CPX-Messdaten der ACMR 8-Beläge, aufgeschlüsselt nach der Wirkung pro Belagsalter und Fahrspur.	27
Abbildung 25:	Zusammenhang zwischen MV15 Hohlraumgehalt für neue und alte Beläge. 29	
Abbildung 26:	Zusammenhang zwischen Marshall-Hohlraumgehalt, Bohrkern-Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad.....	30
Abbildung 27:	Siebkurven aller digitalisierten Mischgüter, aufgeschlüsselt nach den drei Belagstypen SDA 8-12, ACMR 8 und PA 8.	31
Abbildung 28:	Lineares Regressionsmodell der Belagswirkung mit den Variablen <i>Belagsalter</i> , <i>DTV leichte Fahrzeuge</i> und <i>DTV schwere Fahrzeuge</i>	49
Abbildung 29:	Lineares Regressionsmodell der Belagswirkung nach unterschiedlichen Bauparametern.....	49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Chronologischer Überblick der ACMR 8- und SDA 8-Belagsbezeichnung inkl. der Angabe des Hohlraumgehalts am Marshallprüfkörper [Vol-%]. Quelle: ASTRA, <i>FUG Trasse 06/13 27.06.2013 - Referat Beh Lärmarme Beläge</i>8
Tabelle 2:	Abschätzung der Verkehrsaufteilung bei einer 4- und 6-spurigen Autobahn. 20
Tabelle 3:	Belagskennwerte basierend auf den neu berechneten Alterungskurven. 25

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht zielt darauf ab, den Bericht "Teilprogramm Akustische Auswertung der lärmarmen Strassenbeläge - Zwischenbilanz 2015" aus dem Jahr 2017 zu aktualisieren und zu erweitern. Bei dieser Überarbeitung lag der Schwerpunkt auf der Überprüfung und Aktualisierung der Belagskennwerte, die im Rahmen des Lärmvollzugs rechtlich bindend sind.

Es wurden sämtliche zur Verfügung stehende akustische wie auch bautechnische Belagsdaten zusammengetragen, homogenisiert, digitalisiert und ausgewertet. Bei der Datenaufbereitung wurden die akustischen Daten von CPX- und SPB-Messungen mit bekanntem Einbaujahr und Belagstyp bis Ende 2022 berücksichtigt, was im Vergleich zum Bericht von 2017 zusätzliche Messdaten von sieben Jahren miteinschliesst.

Mithilfe der aktualisierten akustischen Datensätze wurden die Alterungskurven für jeden Belagstyp neu berechnet. Zusätzlich zur Betrachtung der lärmarmen Beläge wurden auch alle weiteren, dichten Belagstypen auf ihre akustische Alterung hin untersucht.

Es zeigt sich, dass die Belagskennwerte des Leitfadens Strassenlärm nach wie vor gültig sind.

Im Rahmen dieses Projektes wurden erstmalig auch bautechnische Belagsdaten systematisch zusammengetragen, digitalisiert und analysiert. Hierbei wurden rund 590 Bohrkernuntersuchungen und über 500 Mischgutuntersuchungen digitalisiert.

Die durchgeführten statistischen Analysen verdeutlichen, dass neben der Alterung des Belags auch die Verkehrsbelastung, die Fahrspur (Normalspur vs. Überholspur) sowie die Belagsparameter einen massgeblichen Einfluss auf die Belagsakustik haben. Für eine detaillierte Analyse der Bauparameter mit dem Ziel der Belagsrezeptur-Optimierung sind jedoch grössere Stichproben mit mehr Belagsmessdaten notwendig.

Résumé

Le présent rapport a pour objectif d'actualiser et d'élargir le rapport "Sous-programme d'évaluation acoustique des revêtements routiers peu bruyants - Bilan intermédiaire 2015" datant de 2017. Lors de cette révision, l'objectif était de vérifier et de mettre à jour les valeurs caractéristiques de revêtements, qui sont obligatoires dans le cadre de la législation sur le bruit.

Toutes les données acoustiques et techniques disponibles sur les revêtements ont été rassemblées, homogénéisées, numérisées et évaluées. Lors de la mise à jour des données, les données acoustiques des mesures CPX et SPB dont l'année de pose et le type de revêtement sont connus ont été prises en compte jusqu'à fin 2022, ce qui, en comparaison au rapport de 2017, inclut des données de mesure supplémentaires sur plus de sept ans.

Les courbes de vieillissement ont été recalculées pour chaque type de revêtement à l'aide des données acoustiques actualisées. En plus de l'examen des revêtements peu bruyants, le vieillissement acoustique de tous les autres types de revêtements denses a également été analysé.

Il s'avère que les valeurs caractéristiques des revêtements du guide du bruit routier sont toujours valables.

Dans le cadre de ce projet, les données techniques des revêtements ont été pour la première fois systématiquement rassemblées, numérisées et analysées. Environ 590 analyses de carottes et plus de 500 analyses d'enrobés ont été numérisées.

Les analyses statistiques effectuées montrent que le vieillissement du revêtement, la charge de trafic, la voie de circulation (voie normale vs voie de dépassement) ainsi que les dimensions du revêtement exercent une influence déterminante sur l'acoustique du revêtement. Pour une analyse détaillée des paramètres de construction dans le but d'optimiser la formulation du revêtement, il est toutefois nécessaire de disposer d'échantillons plus importants avec davantage de données de mesure du revêtement.

1 Einführung

1.1 Rechtliche Grundlagen

Die Verwendung von lärmarmen Belägen als Lärmschutzmassnahme auf den Nationalstrassen basiert auf den folgenden rechtlichen Grundlagen:

- Bundesgesetz über den Umweltschutz vom 7. Oktober 1983 (USG)
- Bundesgesetz über die Nationalstrassen vom 8. März 1960 (NSG)
- Bundesgesetz über die Verwendung der zweckgebundenen Mineralölsteuer vom 22. März 1985 (MinVG)
- Lärmschutz-Verordnung vom 15. Dezember 1986 (LSV)
- Nationaler Massnahmenplan zur Verringerung der Lärmbelastung, 2015
- Verordnung über die Nationalstrassen vom 18. Dezember 1995 (NSV)
- Leitfaden Strassenlärm, Umwelt-Vollzug Nr. 0637, Bundesamt für Umwelt, 47 S.
- Schweizer Normen SNR 640 425 Lärmindernde Decken, 2013
Neu: VSS 40 425:2019 Lärmindernde Decken – Grundlagen
- Schweizer Normen SNR 640 436 Semidichtes Mischgut – Festlegungen und Anforderungen, 2013
Neu: VSS 40 436:2021 Semidichtes Mischgut; Festlegungen und Anforderungen

Gemäss USG und LSV werden Lärmschutzmassnahmen an der Quelle priorisiert, um die Entstehung des Lärms zu verhindern. Lärmarme Beläge sind hierfür eine effiziente Massnahme.

Im Jahr 2006 haben das Bundesamt für Umwelt (BAFU) und das Bundesamt für Strassen (ASTRA) im Rahmen des Leitfaden Strassenlärm [1] die Belagskennwerte (KB), die in der Berechnung von Emissionen für Strassenlärmprojekte verwendet werden müssen, definiert. Diese Belagskennwerte haben somit im Lärmvollzug rechtlich bindenden Charakter. Der Leitfaden legt zudem fest, dass Belagsmassnahmen mit einem schalltechnischen Monitoring überprüft werden müssen, um deren Wirkung sicher zu stellen und um die periodische Aktualisierung der Belagskennwerte zu ermöglichen.

Die SPB- und CPX-Messungen wurden bisher gemäss dem "Technischen Merkblatt für akustische Belagsgütemessungen an Strassen", Anhang 1c Leitfaden Strassenlärm, nach dem folgenden Zeitplan erfolgen:

- Beim Belagseinbau (vor dem ersten Winter, zwischen 3 Wochen und 6 Monaten nach dem Belagseinbau)
- Nach 1 Winter
- Nach 5 und 10 Jahren

Die Daten der Mischgut- und Bohrkernuntersuchungen müssen beim Einbau erhoben, gesammelt und eingetragen werden.

Diese periodische Aktualisierung der Belagskennwerte basiert auf sämtlichen verfügbaren Messungen und ist im technischen Merkblatt Akustische Beurteilung von lärmarmen Strassenbelägen [2] vorgegeben. Das schalltechnische Monitoring muss mit der Erhebung von belagstechnischen Kennwerten (Hohlraumgehalt, Verdichtungsgrad, Dicke des Deckbelages) ergänzt werden, um die Zusammenhänge zwischen den akustischen- und belagstechnischen Eigenschaften besser nachvollziehen zu können.

1.2 Projekthintergrund & Ziele

Im März 2017 wurde der Bericht *Teilprogramm "Akustische Auswertung der lärmarmen Strassenbeläge" - Zwischenbilanz 2015* [3] erstellt. Ziel dieses Berichtes war, die akustische Entwicklung der lärmarmen Strassenbeläge auf den schweizerischen Nationalstrassen hinsichtlich der akustischen Alterung zu charakterisieren. Hierfür wurden alle verfügbaren akustischen Messungen bis 31.12.2015 berücksichtigt.

Ziel des vorliegenden Berichtes ist die Aktualisierung und Ergänzung des Berichtes *Teilprogramm "Akustische Auswertung der lärmarmen Strassenbeläge" - Zwischenbilanz 2015* [3] vom März 2017 anhand der akustischen Messdaten bis zum 31.12.2022. Es fliessen somit sieben Jahre an zusätzlichen Messdaten in diese Analyse mit ein.

Die für dieses Projekt zur Verfügung stehende Datengrundlage beinhaltet sämtliche Daten der akustischen Belagsuntersuchungen des ASTRA, die mit unterschiedlichem Projektfokus durchgeführt wurden:

- Nachweis der Belagswirkungen im Lärmvollzug: Es ermöglicht die Überprüfung, ob die verwendeten lärmarmen Beläge die erforderlichen Anforderungen erfüllen
- Datensammlung für neue Erkenntnisse: Mit gezielten akustischen Untersuchungen werden neue Testbeläge bezüglich ihrer akustischen Wirkungen im Detail untersucht, um Erkenntnisse für die weitere Optimierung zu sammeln
- Messungen zur akustischen Zustandserfassung von Strassenbelägen bei der Lärmmodellierung (im Rahmen des Lärmvollzuges)

1.3 Lärmarme Beläge des ASTRA

Ein Belag gilt gemäss Definition als «lärmarm», wenn die Lärmreduktion mit dem Modellansatz StL86+ im Vergleich zu einem neutralen Referenzbelag, am Ende der Nutzungsdauer mindestens 1 Dezibel beträgt. Aktuell verwendet das ASTRA drei Typen von lärmarmen Belägen mit der folgenden Strategie:

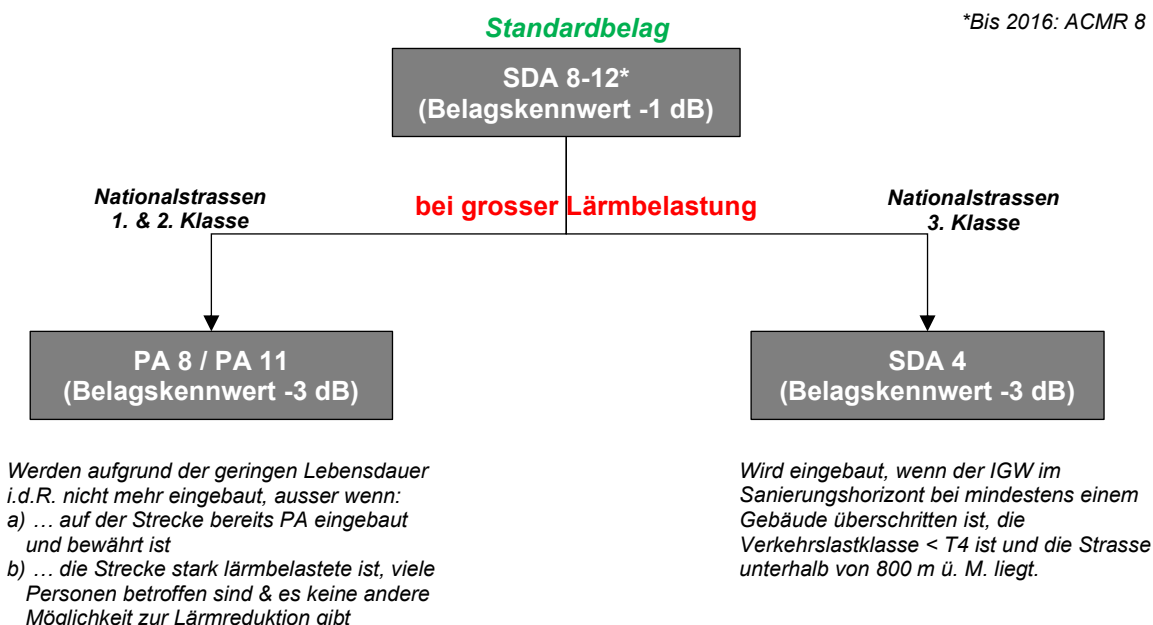


Abbildung 1: Aktuelle Strategie des ASTRA beim Einbau von lärmarmen Belägen.

1.3.1 SDA 8-12 und ACMR 8



Abbildung 2: Nahaufnahme eines SDA 8-Belags.

Abbildung 3: Nahaufnahme eines ACMR 8-Belags.

Seit dem Inkrafttreten der schweizerischen Normen *SNR 640 425* [4] und *SNR 640 436* [5] im Jahr 2013 wird zwischen SDA 8- (semi dense asphalt) und ACMR 8-Belägen (asphalt concrete macro rough) unterschieden. Die akustischen Eigenschaften der SDA 8-Beläge liegen zwischen den konventionellen dichten Belägen und dem Drainasphalt. Die SDA 8-Beläge verfügen jedoch nicht über die bautechnischen Nachteile der PA-Beläge.

Die Belagsbezeichnung und auch die Rezeptur des ACMR 8-Belags hat sich im Laufe der Zeit geändert. In der Tabelle 1 ist die Chronologie der Rezeptur wie auch die verschiedenen Belagsbezeichnungen ersichtlich.

Tabelle 1: Chronologischer Überblick der ACMR 8- und SDA 8-Belagsbezeichnung inkl. der Angabe des Hohlraumgehalts am Marshallprüfkörper [Vol-%].

Quelle: ASTRA, *FUG Trasse 06/13 27.06.2013 - Referat Beh Lärmarme Beläge*

	VSS	ASTRA
Bis 2006	MR 8 (6 %)	-
2006	MR 8 (6 %)	MR 8 Typ ASTRA (8 %)
01.02.2008	MR 8 (8 %) = MR 8 Typ ASTRA	MR 8 Typ ASTRA (8 %)
01.02.2013*	SDA 8 Klasse A = MR 8 Typ ASTRA	MR 8 Typ ASTRA (8 %)
Ende 2013	MR 8 (6 %) = ACMR 8	-
Ab 2013	SDA 8 (12 %), ACMR 8 (6 %)	-

* Inkrafttreten der neuen VSS-Norm für SDA-Beläge (*SNR 640 436 / VSS 40 436:2021*).

Auf dem Nationalstrassennetz wurden seit 2006 lärmarme Beläge des Typs ACMR 8 und SDA 8 eingebaut, deren Hohlraumgehalt laufend zugenommen hat, um die akustischen Eigenschaften zu verbessern. Ursprünglich wurde dieser Belag mit MR 8 Typ ASTRA beziehungsweise ACMR 8 Typ ASTRA bezeichnet. Mit Inkrafttreten der Norm *SNR 640 436* [5] änderte die Bezeichnung auf SDA 8A, seit 2015 wird der Belag mit SDA 8-12 bezeichnet. Der SDA 8-12 hat einen durchschnittlichen Hohlraumgehalt am Marshall-Prüfkörper von 12 %. Ab 2016 wird beim ASTRA der SDA 8-12 als Standardbelag eingebaut.

Es ist wichtig zu beachten, dass sich die Belagsrezepturen vom ACMR 8-6 und ACMR 8-8 beziehungsweise vom ACMR 8-8 und SDA 8-12 überlappen und dass folglich eine strikte Abgrenzung der Beläge nicht möglich ist.

1.3.2 PA 8 / PA 11



Abbildung 4: Aufnahme eines PA-Belags.

Beim PA-Belag (porous asphalt) handelt es sich um einen porösen und wasserdurchlässigen Asphalt (sog. Drainasphalt), welcher eine wasserdichte Schicht unterhalb der Deckschicht benötigt. Durch die poröse Oberfläche kann ein PA-Belag sehr viel Schallenergie absorbieren. Die Lebensdauer eines PA-Belags ist mit rund 10 Jahren kürzer als die Lebensdauer von Standard-Belagstechnologien. Beim PA 8-Belag ist das grösste Korn des Mischguts 8 mm gross, beim PA 11-Belag entsprechend 11 mm.

1.3.3 Weitere lärmarme Beläge des ASTRA

Der SDA 4-Belag ist ein sehr feiner semi-dichter Asphaltbelag mit einem Grösstkorn von nur 4 mm. Dies ist der lärmarme Standardbelag für Kantonsstrassen innerorts und wird auf Nationalstrassen höchstens auf Strassen der Klasse 3 eingebaut. Der SDA 4-Belag wird auf Hochgeschwindigkeitsstrassen aufgrund der ungenügenden Belastbarkeit nicht eingebaut. Folglich wird dieser Belagstyp in diesem Bericht nicht weiter thematisiert.

Zurzeit befinden sich noch weitere lärmoptimierte Beläge in der Testphase, wie z. B. Gussasphalte. Diese Beläge sind jedoch aufgrund der geringen oder noch nicht vorhandenen Datenlage nicht Gegenstand dieses Berichtes.

2 Methodik

In diesem Kapitel werden die verwendeten Daten wie auch die durchgeführte Auswertungsmethodik beschrieben.

2.1 Messmethoden

Für die akustische Messung von Strassenbelägen gibt es gemäss der internationalen Standardisierungsorganisation ISO grundsätzlich zwei direkte Methoden, welche in den Standards ISO EN SN 11819-1 [6] respektive 11819-2 [7] beschrieben werden. Diese beiden Methoden fassen sich als *Close-Proximity-Methode (CPX)* und *Statistical-Pass-By-Methode (SPB)* zusammen und charakterisieren sich durch die folgenden Eigenschaften.

2.1.1 CPX-Messung

Mit der Close-Proximity-Methode (CPX) gemäss der ISO EN SN 11819-2/3 [7] & [8] kann die akustische Qualität von Belägen direkt und über eine grössere räumliche Distanz erfasst werden. Die CPX-Methode erlaubt die akustische Charakterisierung von Strassenbelägen im gesamten Streckenverlauf sowie separat für jede Fahrspur. Eine Beurteilung ist somit für ganze Strassenabschnitte möglich. Die Messung erfolgt dabei in einem schallabsorbierend ausgekleideten Anhänger im unmittelbaren Nahfeld der Räder an je zwei Mikrofonpositionen und bei konstanter Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h (siehe Abbildung 5 & Abbildung 6). Diese Mikrofone sind in einem Winkel von 45° vorne und hinten am Rad angeordnet. Die Messung erfolgt mit zwei verschiedenen Reifentypen (P1 (PKW) und H1 (LKW)). Weitere Anforderungen an die Messmethode können den entsprechenden Dokumenten (ISO EN SN 11819-2/3 [7] & [8] und Leitfaden Strassenlärm – Anhang 1c) [1] entnommen werden.



Abbildung 5: Bild des von Grolimund + Partner AG verwendeten CPX-Messanhängers.

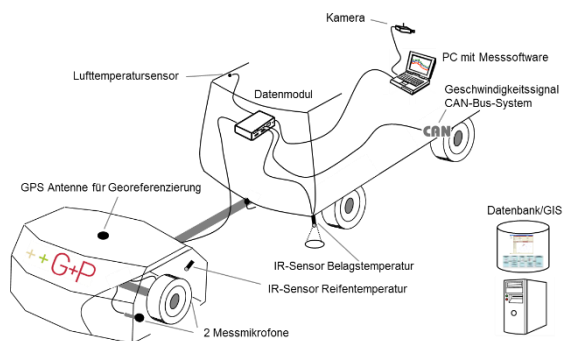


Abbildung 6: Schematische Darstellung des CPX-Messprinzips.

2.1.2 SPB-Messung

Bei der Statistical-Pass-By-Method (SPB) werden gemäss *Leitfaden Strassenlärm - Anhang 1c* [1] in einem definierten Abstand (5 und 7.5 m Entfernung von der Fahrspurmitte und auf einer Höhe von 1.5 m respektive 1.2 m) einzelne Vorbeifahrten mit zwei Mikrofonen erfasst (siehe Abbildung 7). Die beschriebene Methodik basiert auf der ISO EN 11819-1:1997 [6] und gibt zusätzlich die Aufzeichnung von Vorbeifahrtsenergien (L_{Aeq}) vor. Mit dieser Methode lässt sich die Belagsgüte direkt als Abweichung zum Referenzmodell StL86+ ermitteln. Die Messdauer der einzelnen Vorbeifahrtmessung umfasst den Zeitabschnitt bis 10 dB(A) unter den maximalen Pegelwert (siehe Abbildung 8). Der gemessene Zeitabschnitt darf keine Fremdgeräusche/Störgeräusche enthalten. Bezüglich der Standortwahl gibt es einige Einschränkungen. So sollte der Belag auf mindestens 40 m um den Messpunkt homogen ausfallen. Ebenso muss im Abstand von ≥ 3.75 m vom Mikrofon der Belag mit ähnlicher Schallabsorptionseigenschaft liegen. Weitere Anforderungen können den entsprechenden Dokumenten (*Leitfaden Strassenlärm – Anhang 1c* [1] und ISO EN 11819-1:1997 [6]) entnommen werden.

Bei einer SPB-Messung werden hauptsächlich zwei Messgrössen bestimmt: Der Gesamtpegel für leichte Fahrzeuge und für schwere Fahrzeuge bezüglich dem Strassenlärmmodell StL86+. Bei der SPB-Messung werden die Belagseigenschaften am Erhebungsquerschnitt über eine Abschnittslänge von ca. 40-60 m auf der Normalspur charakterisiert. Bei einer SPB-Messung können nur die akustischen Eigenschaften der Normalspur erhoben werden; die Überholspur kann bei diesem Messsystem nicht erfasst werden. Zu bemerken ist hierbei, dass die Normalspuren grösseren Verkehrslasten ausgesetzt sind und folglich auch schlechtere akustische Werte aufweisen (siehe Kapitel 3.3.1).



Abbildung 7: Mikrofonpositionen bei einer SPB-Messung.

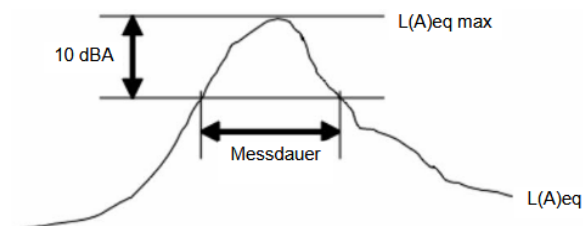


Abbildung 8: Pegelverlauf einer einzelnen Vorbeifahrtmessung

2.2 Datengrundlage & Datenaufbereitung

Als Datengrundlage für diesen Bericht wurden sämtliche verfügbaren CPX- und SPB-Messdaten verwendet. Dies beinhaltet alle Messdaten, welche im technischen Bericht von 2017 [3] bereits vorhanden waren, alle Messdaten von G+P der entsprechenden Datenbanken (CPX-DB & SPB-DB) wie auch sämtliche an G+P zugestellten akustischen Messdaten des ASTRA (alle fünf Filialen), welche von diversen Ingenieurbüros stammten.

Zusätzlich zu den SPB- und CPX-Daten wurden auch SEM-Daten zugestellt. Eine Stichproben-Emissionsmessung (SEM) ist eine vereinfachte Ermittlung der Belagsgüte. Sie eignet sich zur Ermittlung von immissionsseitigen Belagswirkungen an einem spezifischen Strassenabschnitt. Während mindestens 30 Minuten wird strassennah der zeitgemittelte Schalldruckpegel (LAeq) für die Gesamtheit, der auf allen Fahrstreifen verkehrenden Fahrzeuge ermittelt, bei gleichzeitiger Verkehrszählung. Der gemessene Immissionspegel wird mit dem nach Modell StL-86+ berechneten Immissionspegel verglichen. Mit dem SEM-Verfahren werden neben der akustischen Belagswirkung unter Berücksichtigung quellennaher Schallausbreitungseffekte für die momentane Situation auch die Gesamtlärmemissionen erhoben. Insgesamt wird der gesamte Wagenpark erfasst. Eine Unterteilung in PW und LKW ist aber nicht möglich (nur Mischverkehr über alle Fahrstreifen). Die Messungen sind abhängig von der Menge lauter Fahrzeuge und der gefahrenen Geschwindigkeiten und beinhalten immer auch Standorteinflüsse (Schallausbreitungseffekte). Deswegen ist diese Art von Lärmessung für die Bestimmung von Belagsgütewerten (Monitoring) respektive für die allgemeine Charakterisierung von Belägen ungeeignet und wird folglich in diesem Bericht nicht weiter behandelt.

Neben den akustischen Messdaten wurden auch die im Rahmen dieses Projektes zusammengetragenen und digitalisierten bautechnischen Daten wie Bohrkern- und Mischgutuntersuchungen verwendet. Des Weiteren wurden Verkehrsdaten für die Analysen der Belagswirkung nach Verkehrsbelastung herangezogen.

2.2.1 CPX-Messdaten

Für die Analyse wurden sämtliche vorhandenen und zugestellten CPX-Messdaten gesichtet, homogenisiert und daraus ein Gesamtdatensatz bis 31.12.2022 erstellt (siehe Abbildung 9).

Diese Messdaten (Abbildung 9) wurden für die Auswertung weiter gefiltert, da nicht alle Datenpunkte die notwendigen Informationen wie beispielsweise Belagstyp oder Einbaujahr aufwiesen oder die geforderte Datenqualität erfüllten (siehe Abbildung 10). Nach der Datenaufbereitung/Filtrierung stehen rund 2'900 Strassenkilometer an CPX-Messdaten zur Verfügung.

CPX-Messdaten werden auf 20 m Fahrsegmente aggregiert. Bei einer gemessenen Strecke von beispielsweise 2 km resultieren somit 100 Datenpunkte. Bei der Erhebung dieser Messdaten fallen pro Messpunkt (20 m Segment) sehr viele verschiedene Daten und Informationen an, wie z. B. die gemessenen Schalldruckpegel pro Terzband (315 Hz bis 5000 Hz) und Reifen, Gesamtpegel N1-Reifen, Gesamtpegel N2-Reifen, Spurangabe, Lufttemperatur, etc. Aufgrund dieser grossen Datenmenge werden CPX-Messdaten – im Gegensatz zu SPB-Messdaten – hauptsächlich mit Datenbanken verwaltet.

Im Anhang 3 ist für jeden Belag eine Übersichtskarte mit der entsprechenden CPX-Datengrundlage ersichtlich.

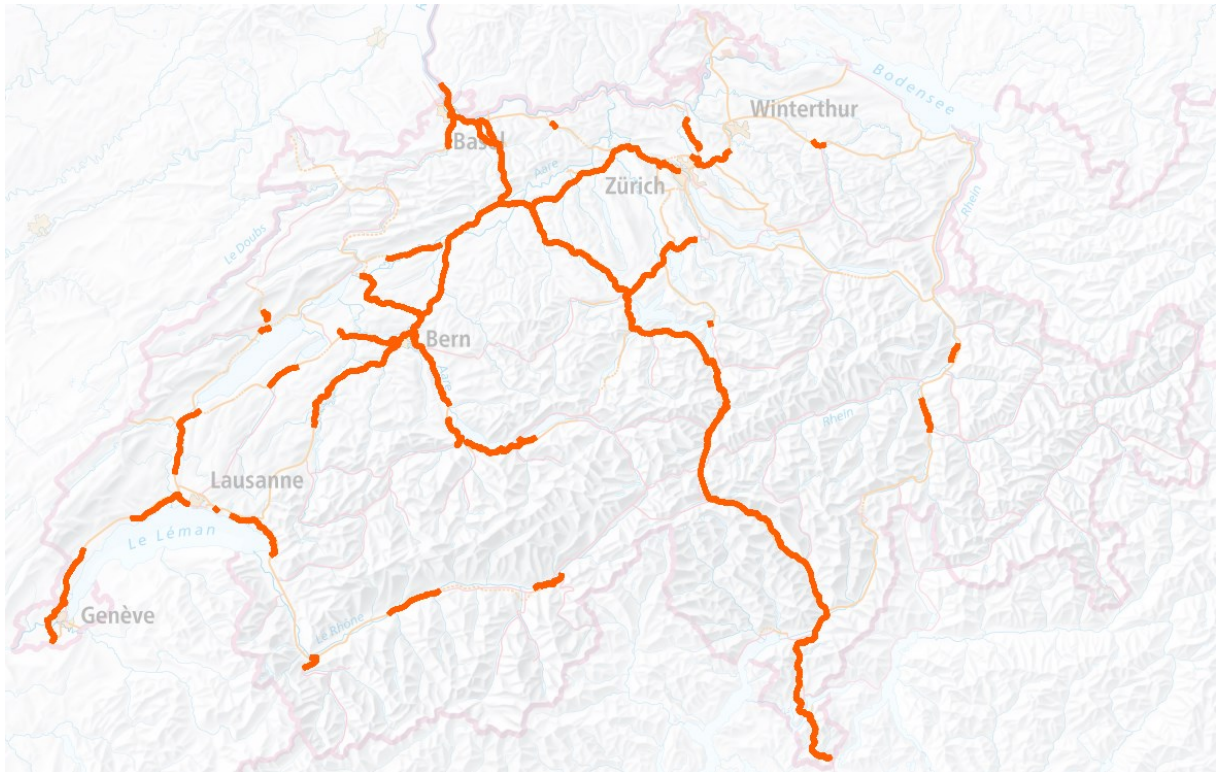


Abbildung 9: Übersicht der CPX-Messdaten von G+P AG auf Nationalstrassen.

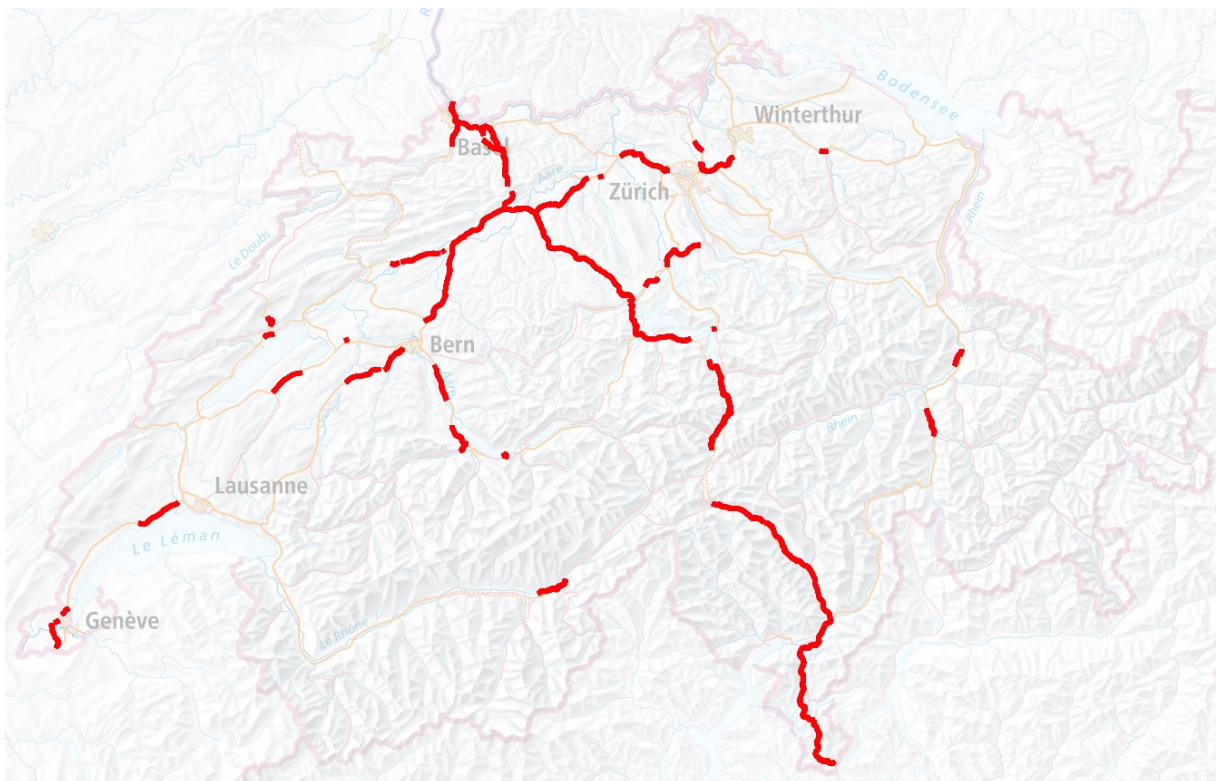


Abbildung 10: Übersicht der berücksichtigten CPX-Messdaten nach der Filterung.

2.2.2 SPB-Messdaten

Für die Datenanalyse wurden sämtliche zur Verfügung stehenden SPB-Messdaten verwendet. Hierfür wurden die Messdaten aus dem technischen Bericht von 2017 mit den an G+P zugestellten Messdaten kombiniert. Im Rahmen dieses Projektes wurden viele SPB-Messdaten digitalisiert, welche bis anhin nur in Form eines PDF-Dokumentes vorhanden waren. Anhand der Standort-Koordinaten konnten die digitalisierten Daten (Excel-Tabelle) wiederum in einen GIS-Layer (GeoPackage) umgewandelt werden. Der entsprechende GIS-Layer ist in Abbildung 11 dargestellt, welcher einen Überblick über die verschiedenen SPB-Standorte gibt. Die entsprechende Liste inklusive den Belagstypen ist im Anhang 4 zu finden. Es stehen bis zum 31.12.2022 insgesamt über 250 SPB-Messdaten von etwa 90 verschiedenen Standorten zur Verfügung.

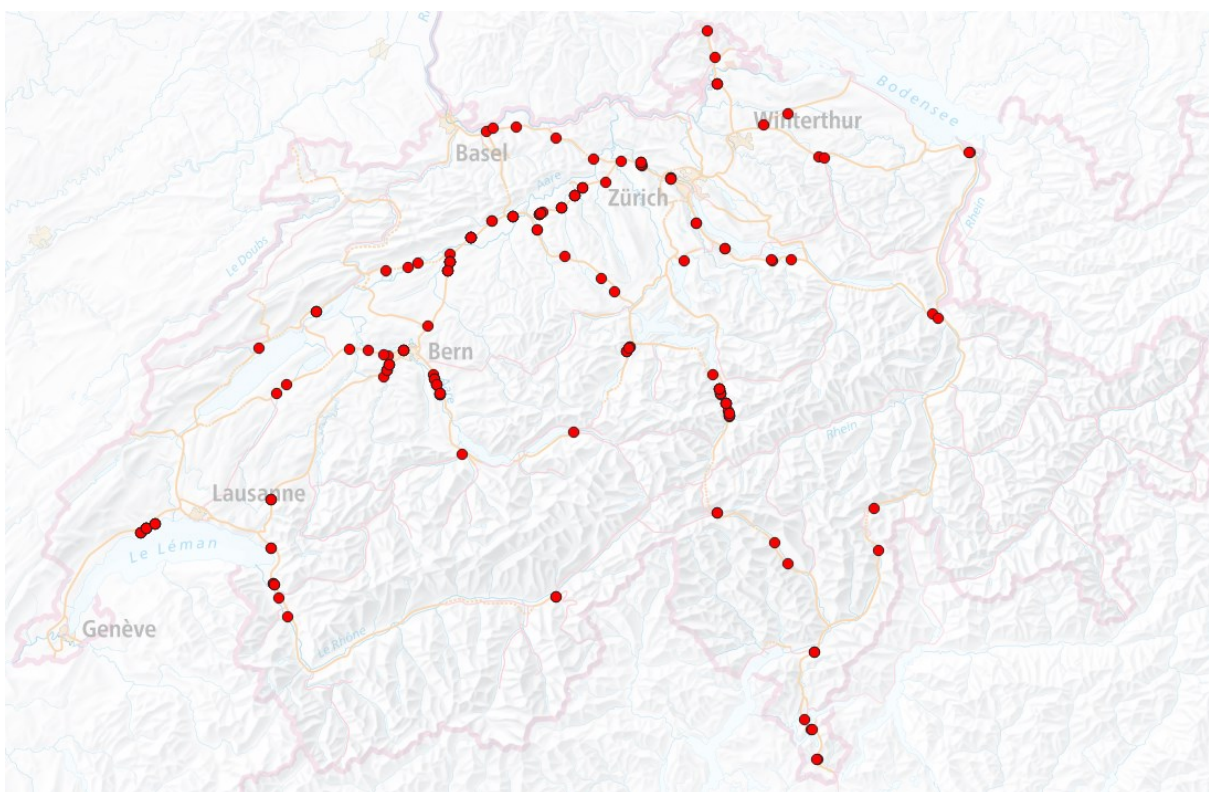


Abbildung 11: Übersicht der berücksichtigten SPB-Messdaten

2.2.3 Bohrkern- und Mischgutuntersuchungen

Im Rahmen dieses Projektes wurden erstmalig auch bautechnische Belagsdaten systematisch zusammengetragen, digitalisiert und analysiert. Dies beinhaltet einerseits Einbauprotokolle/Laborberichte von Mischgutuntersuchungen (MG) und andererseits Einbauprotokolle/Laborberichte von Bohrkernuntersuchungen (BK).

Das Ziel der Berücksichtigung von Bauparameter-Daten ist einerseits die Schaffung eines besseren Verständnisses über die Zusammenhänge zwischen Belagsrezepturen und Belagsakustik und folglich auch die nachgelagerte Optimierung der Belagsrezepturen. Die Optimierung der Belagsrezepturen anhand von Bauparameter-Daten konnten im Innerortsbereich bereits erfolgreich demonstriert werden.

Das Zusammentragen und die Digitalisierung der verschiedenen Protokolle ist ein ressourcenintensiver Prozess. Leider war die Dokumentation der Einbauprotokolle nicht immer nachvollziehbar, insbesondere die genaue Lokalisierung der Probeentnahme stellte oft eine Herausforderung dar.

Die Bohrkern- und Mischgutuntersuchungen wurden digitalisiert. Als Beispiel sind in Abbildung 14 das Limmattaler-Kreuz mit den entsprechend erstellten Polygonen und Punkten zu sehen. Es wurden rund 590 Bohrkernuntersuchungen und über 500 Mischgutuntersuchungen digitalisiert (siehe Abbildung 12 und Abbildung 13). Sämtliche Hohlraumwerte, welche mittels Tauchwiegeverfahren ermittelt wurden, wurden mittels linearer Regression in volumetrische Hohlraumwerte umgerechnet. Für die weitere Analyse wurden die digitalisierten Bohrkern- und Mischgutuntersuchungen wie auch mit den CPX-Messdaten zusammengeführt (spatial join). Hierbei konnten nur diejenigen Daten verwendet werden, für welche gleichenorts Bohrkern-, Mischgutinformationen wie auch CPX-Messdaten vorhanden waren.

Bei der Digitalisierung der bautechnischen Untersuchungen wurden die folgenden Parameter erfasst (sofern verfügbar):

Bohrkerne (BK):

- BK-Datum
- Belagstyp
- Koordinaten (Punkt)
- Schichtdicke
- Hohlraumgehalt
- Raumdichte
- Rohdichte
- Verdichtungsgrad

Mischgut (MG):

- MG-Datum
- Belagstyp
- Umfang/Bereich (Polygon)
- Siebdurchgang/Korngrößenverteilung (0.063 – 8 mm)
- Rohdichte
- Raumdichte Marshall
- Hohlraumgehalt TW (Bestimmung des Volumens mittels Tauchwägung)
- Hohlraumgehalt Vol (Bestimmung des Volumens mittels Ausmessung)
- Bindemittel
- Stabilität
- Fliessen
- Erweichungspunkt
- Penetration
- Elastische Rückstellung

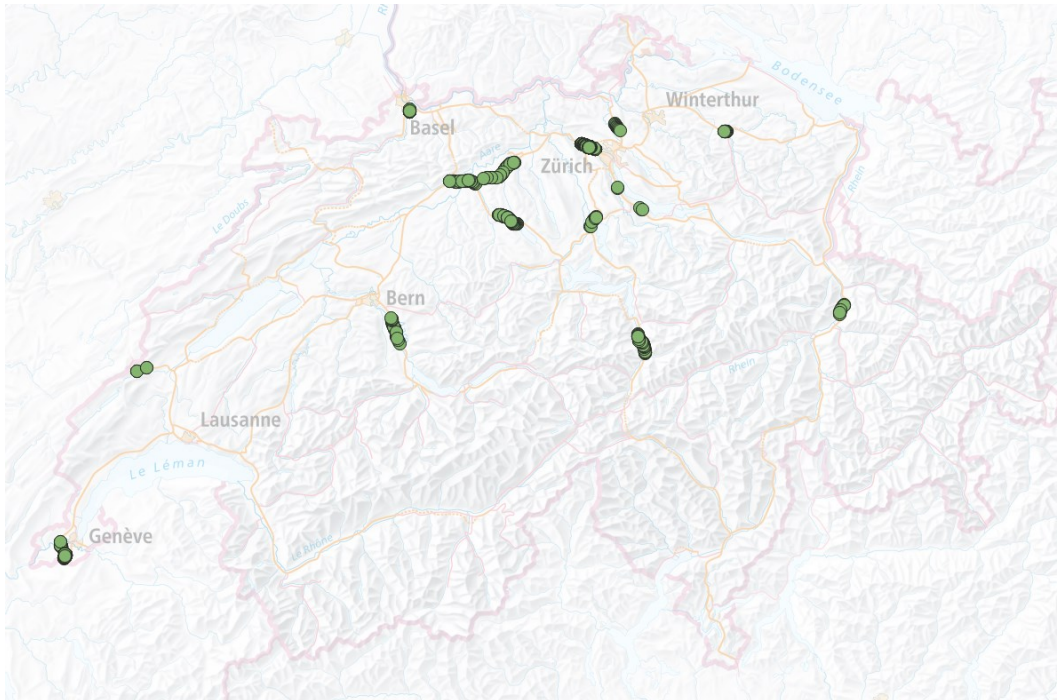


Abbildung 12: Übersicht der digitalisierten Bohrkerne.

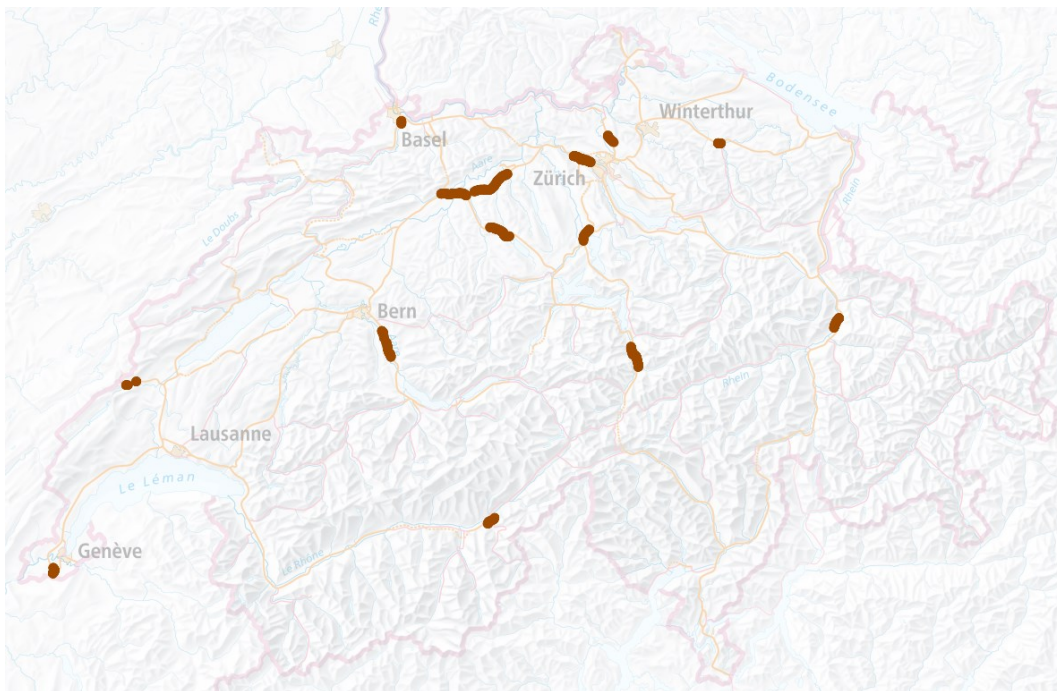


Abbildung 13: Übersicht der digitalisierten Mischgutuntersuchungen.

2.3 Datenauswertung

Strassenbeläge sind unterschiedlich laut, wobei der Belagstyp, die eingebaute Rezeptur wie auch diverse Beanspruchungen durch den Verkehr und die Umwelt eine wichtige Rolle spielen. Dieser Fakt zeigt sich durch die grosse Varianz (Streuung der Messdaten) bei akustischen Belagsmessungen. Neben dem wichtigsten und allgemein bekannten Faktor «Belagsalter» (→ Kapitel 2.3.1 Alterungsmodell) gibt es aber noch diverse weitere Faktoren, welche je einen bestimmten Einfluss auf die Belagsakustik und somit den Strassenlärm haben. Weitere Faktoren sind z. B. die Verkehrsbelastung (→ Kapitel 2.3.2 Verkehrseinfluss/Spureinfluss), die klimatischen Bedingungen, das Wetter bei Belagseinbau oder auch Belagsparameter (→ Kapitel 2.3.3 Bauparameter) wie der Hohlraumgehalt, die Gesteinszusammensetzung, das verwendete Bitumen, etc. Gewisse dieser Faktoren sind bekannt oder messbar, andere wiederum sind schwierig zu erfassen. Ziel dieses Projektes ist nun, die verschiedenen Beläge hinsichtlich ihrer Belagsakustik möglichst genau zu charakterisieren und die Varianz in den akustischen Messdaten möglichst gut anhand der bekannten oder gemessenen Faktoren erklären zu können.

2.3.1 Alterungsmodell

Im Rahmen der Ausarbeitung des Leitfadens Strassenlärm wurde die Alterung der akustischen Eigenschaften mit der unten angegebenen exponentiellen Funktion beschrieben [1]. Dieses Modell ist dasselbe Alterungsmodell, welches im technischen Bericht von 2017 [3] bereits verwendet wurde (siehe Abbildung 15). Im Unterschied zum Bericht von 2017 wurden in der vorliegenden Berichtsüberarbeitung die Alterungskurven direkt auf dem Mischverkehrswert mit 15 % Schwerverkehrsanteil (MV15) berechnet, anstelle zweier separater Berechnungen für je N1 (Personenwagen) und N2 (Lastwagen). Diese neue Auswertung hat den Vorteil, dass der MV15-Wert derjenige Wert ist, welcher im Lärmvollzug auch effektiv verwendet wird. Es können somit anhand der hier berechneten Alterungskurven die Belagskennwerte direkt abgeleitet werden.

$$y(t) = a + b \cdot e^{(-k \cdot t)}$$

a: akustischer Endwert

b: Differenz zwischen akustischem End – und Anfangswert

e: Basis des natürlichen Logarithmus (2.718)

k: Krümmung der Kurve (0.35)

t: Belagsalter

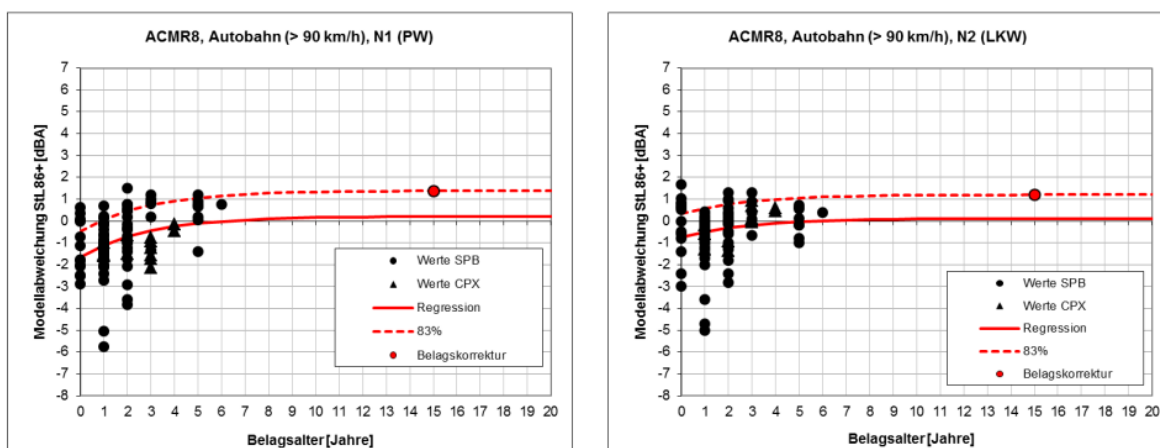


Abbildung 15: Darstellung der berechneten Alterungskurven aus dem technischen Bericht von 2017 für N1 (PW) und N2 (LKW).

In der nachfolgenden Abbildung 16 ist die berechnete Alterungskurve als 50 und 83 % Quantil (graue Linien) für einen Beispiel-Belag exemplarisch dargestellt. Die Kurve nähert sich mit zunehmendem Alter einer horizontalen Asymptote an und zeigt auf, dass die akustischen Eigenschaften zu Beginn stärker nachlassen als gegen Ende der Lebensdauer.

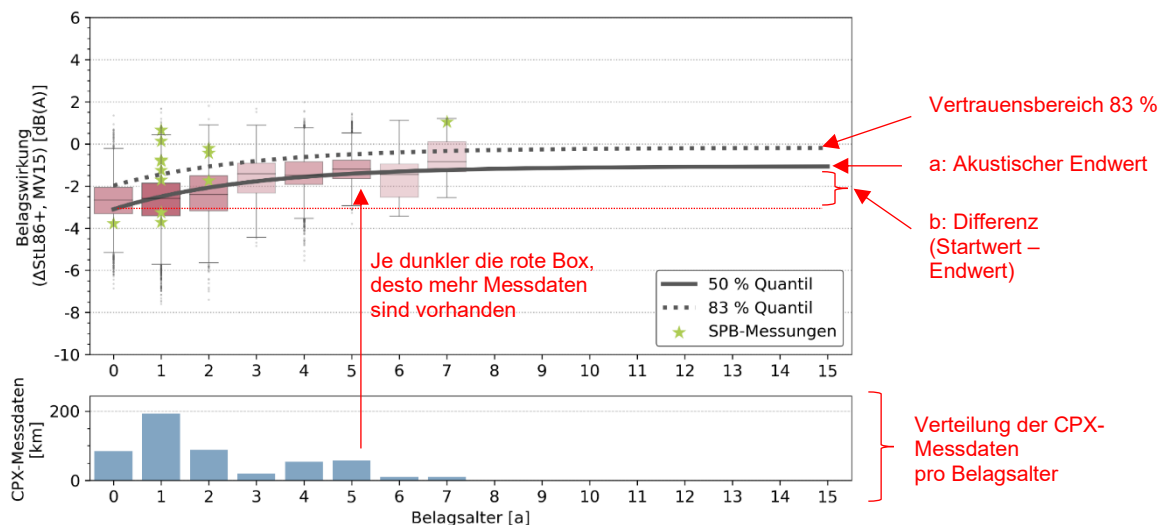


Abbildung 16: Exemplarische Darstellung der berechneten Alterungskurven für den Mischverkehrswert MV15 im vorliegenden Bericht.

Die obige Funktion (Alterungskurve) ist gültig für Beläge mit genügend Messdaten. Bei Belägen mit wenig Messdaten konnte keine Belagswirkung in Funktion des Belagsalters berechnet werden (siehe Abbildung 17). Bei solchen Belägen wurde als beste Schätzung des Belagskennwerts der Mittelwert respektive das entsprechende 83 % Quantil berechnet (horizontale Linien).

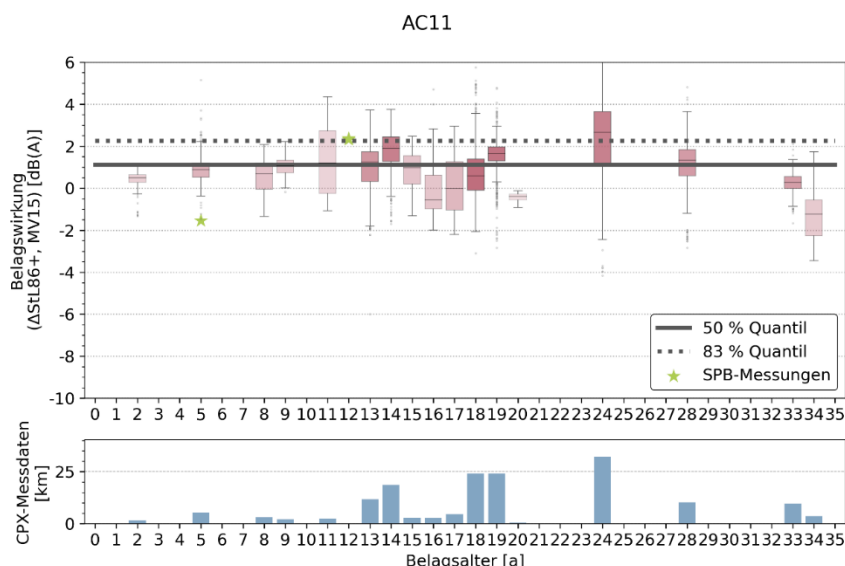


Abbildung 17: Exemplarische Darstellung der geschätzten Belagswirkung (Mittelwert) bei Belägen mit wenig Messdaten.

Die neu berechneten Alterungskurven basieren auf der CPX-Datengrundlage. Die SPB-Messdaten konnten bei der Berechnung nicht berücksichtigt werden, da diese nicht direkt mit den CPX-Messdaten kombinierbar sind. Wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, ist die Datengrundlage des CPX-Messdaten (hunderte Datenpunkte entlang eines Liniensegments/Autobahnabschnitts) deutlich umfangreicher als die SPB-Messdaten (lediglich ein Datenpunkt pro Standort auf der Normalspur). Dafür aber wurden die einzelnen SPB-Datenpunkte als grüne Sterne für den visuellen Vergleich mit den CPX-Daten

dargestellt. Einzig beim PA 11- und ACMR 8-Belag sind genügend SPB-Messdaten für die Berechnung einer entsprechenden Alterungskurve vorhanden.

Die Rohdaten der Alterungskurven sind in Form von roten Boxplots pro Belagsalter aufgeführt. Die Länge einer solchen Box widerspiegelt die Streuung der Messdaten, wobei der horizontale Querstrich den Median-Wert angibt. Die Helligkeit eines roten Boxplots gibt Auskunft über die Anzahl Datenpunkte, welche pro Belag und Alter vorhanden sind. Je dunkler die Box, desto mehr Datenpunkte wurden bei der Berechnung der Box verwendet und desto vertrauenswürdiger sind die Kennwerte der Box. Des Weiteren ist die berücksichtigte Datengrundlage in Anzahl CPX-Messkilometer immer in Form eines Balkendiagramms unterhalb der Alterungsabbildung angegeben.

2.3.2 Verkehrseinfluss / Spureinfluss

Bei den CPX-Messdaten ist in den meisten Fällen pro Datenpunkt jeweils noch die Spurinformatio**n** *Normalspur (NS)*, *Überholspur 1 (ÜS1)* oder *Überholspur 2 (ÜS2)* vorhanden. Dank dieser Spurinformatio**n** können die CPX-Messdaten systematisch nach der Verkehrsbelastung ausgewertet werden. Hierzu wurden die folgenden zwei Analysen durchgeführt:

- Auswertung der Belagswirkung (MV15-Wert) je nach Fahrspur (NS, ÜS1, ÜS2)
- Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Belagswirkung (MV15-Wert) und Verkehrsbelastung mittels linearer Regression.

Die Verkehrsbelastung einer Fahrspur wurde unter Verwendung des Durchschnittlich Täglichen Verkehrs (DTV), des Schwerverkehrsanteils (N2) und über die Verkehrsaufteilung des Verkehrs auf die Normal- und Überholspuren abgeschätzt.

Die DTV- und N2-Angaben wurden durch räumliche Verknüpfung (spatial join) der CPX-Messdaten mit dem Nationalen Personenverkehrsmodells (NPVM) des Bundesamtes für Raumentwicklung (ARE) [9] gewonnen.

Für die Aufteilung des DTV auf die Normal- und Überholspuren wurde die Verkehrstabelle 11.1 von sonROAD18 [10] verwendet. Hierbei wurden die folgenden Parameter pro SWISS10-Fahrzeugklasse berücksichtigt: *HLS-4-N-100*, *HLS-4-U-100*, *HLS-4-N-120* & *HLS-4-U-120*.

Anhand der sonROAD18 Verkehrsangaben wurden die in Tabelle 2 aufgeführten Verkehrsverteilungen geschätzt. Diese Verteilungen wurden mit dem DTV wie auch dem Schwerverkehrsanteil weiter verrechnet. Dadurch lassen sich die absoluten Fahrzeug-Überrollungen pro Fahrspur und pro Fahrzeugkategorie (PW & LKW) abschätzen.

Tabelle 2: Abschätzung der Verkehrsaufteilung bei einer 4- und 6-spurigen Autobahn.

		Personenwagen (leichte Fz)	Lastwagen (schwere Fz)
4-spurige Autobahn	Normalspur	64%	91%
	Überholspur	36%	9%
	Total	100%	100%
6-spurige Autobahn	Normalspur	64%	91%
	Überholspur 1	24%	9%
	Überholspur 2	12%	0%
	Total	100%	100%

2.3.3 Bauparameter

Anhand der digitalisierten Mischgut- und Bohrkernparameter und durch die Kombination dieser Daten mit den CPX-Messdaten kann der Einfluss der unterschiedlichen Bauparameter auf die Belagsakustik untersucht werden. Hierzu wurden mittels linearer Regression die Einbauparameter mit den MV15-Messwerten der CPX-Daten untersucht. Aufgrund der geringen Stichprobengrösse/Datenmenge, konnten diese Untersuchungen lediglich für den SDA 8- und ACMR 8-Belag durchgeführt werden.

3 Resultate & Diskussion

In diesem Kapitel werden sämtliche Resultate dieses technischen Berichtes vorgestellt. Dies umfasst die Alterungskurven der lärmarmen Beläge des ASTRA, die Belagskennwerte wie auch der Einfluss der Verkehrsbelastung und der Bauparameter auf die Belagswirkung.

3.1 Alterungskurven lärmarme Beläge

Nachfolgend werden die neu berechneten Alterungskurven der lärmarmen Beläge des ASTRA (SDA 8-12, ACMR 8, PA 11 und PA 8,) dargestellt und diskutiert. Die berechneten Alterungskurven der weiteren Belagstypen wie z. B. SMA, AC, MA, etc. sind in Anhang 5 zu finden. Ein detaillierter Beschrieb der Abbildungen findet sich in Kapitel 2.3.1. Die angegebenen Belagswirkungen beziehen sich hierbei immer auf den Mischverkehrswert mit 15 % Schwerververkehrsanteil (MV15) des Modells StL86+ und sind somit gleichbedeutend wie die KB-Werte (Korrektur Belageeinfluss).

3.1.1 Alterungskurve SDA 8-12

Die Alterungskurve des SDA 8-12-Belags ist in der nachfolgenden Abbildung 18 dargestellt. Aufgrund der noch relativ neuen Belagstechnologie liegen lediglich Messdaten mit einer Zeitreihe von sieben Jahren vor. Beim SDA 8-12 Belag zeigt sich eine mittlere Anfangswirkung von -3 dB(A) und eine erwartete Endwirkung von -1 dB(A). Die Wirkungen der entsprechenden 83 % Quantile sind um rund 1 Dezibel lauter. Die unten gezeigte Datendarstellung ist mit einer gewissen Vorsicht zu betrachten, insbesondere die Belagswirkungen für die Belagsalter sechs und sieben Jahre. Bei diesen Belagsjahren waren jeweils lediglich Daten von einem Messstandort vorhanden.

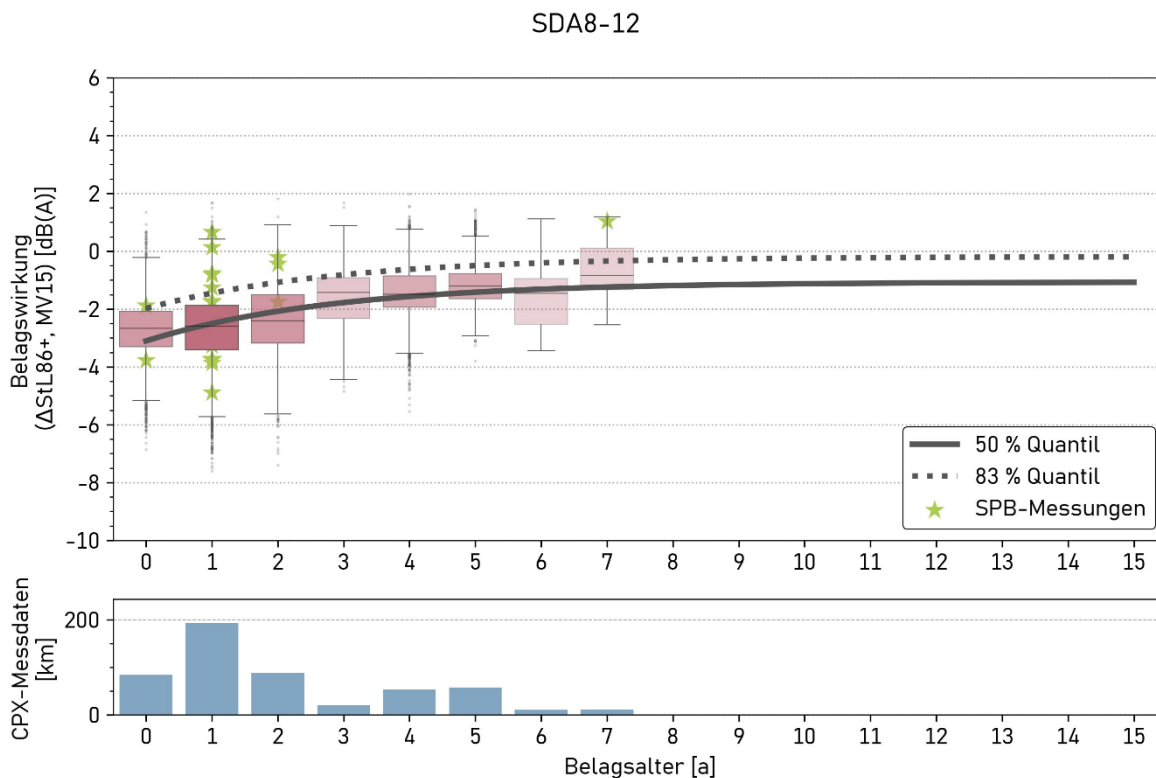


Abbildung 18: Alterungskurve des SDA 8-12-Belags basierend auf den CPX-Messdaten.

3.1.2 Alterungskurve ACMR 8

Beim ACMR 8-Belag sind genügend SPB-Messdaten vorhanden, um neben der CPX-Alterungskurve auch eine genügend robuste SPB-Alterungskurve zu berechnen. Die entsprechenden Alterungskurven sind in Abbildung 19 dargestellt. Die SPB- und CPX-Messdaten weisen ähnliche Ergebnisse auf, wobei die SPB-Messdaten eine geringfügig schlechtere Wirkung um etwa 0.5 bis 1.0 Dezibel im Vergleich zu den CPX-Messdaten zeigen. Bei SPB-Messungen kann nur die Normalspur gemessen, im Gegensatz zu CPX-Messungen. Da die Normalspur lauter als die Überholspuren ist (siehe Kapitel 3.3.1), ist es nachvollziehbar, dass die SPB-Messdaten etwas lauter als die CPX-Messdaten sind. Basierend auf den vorliegenden Messdaten ist mit einer Anfangswirkung von ca. -2 dB(A) und einer geschätzten Endwirkung nach 15 Jahren von ca. -1 bis 0 dB(A) zu rechnen.

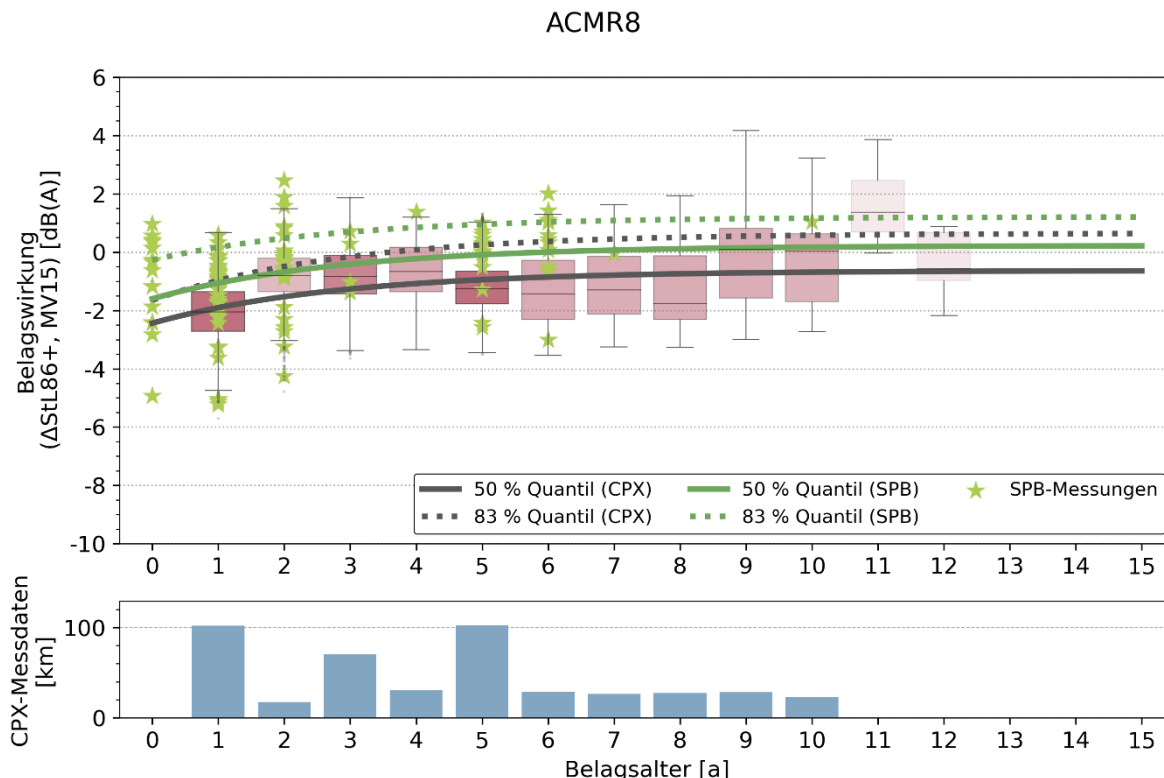


Abbildung 19: Alterungskurven des ACMR 8-Belags basierend auf den CPX-Messdaten (rote Boxplots und dunkelgraue Kurven) und den SPB-Messdaten (grüne Sterne und grüne Kurven).

Da die Belagsrezeptur des ACMR 8-Belags Anfangs 2013 von 8 % auf 6 % Hohlraumgehalt gesenkt wurde (siehe Tabelle 1 in Kapitel 1.3.1), ist nachfolgend noch eine Auswertung der Belagswirkung entsprechend dieser zwei leicht verschiedenen Rezepturen zu finden (siehe Abbildung 20).

Aus der Abbildung 20 ist ersichtlich, dass sich die Anpassung des Hohlraumgehalts nicht signifikant in den Messdaten widerspiegelt. Die dargestellten Mittelwerts-Linien zeigen teilweise unterschiedliche Werte auf, jedoch sind diese in Anbetracht der grossen Streuung und der standortspezifischen Messeffekte zu vernachlässigen. Des Weiteren ist zu bemerken, dass die Einteilung in die zwei Gruppen (ACMR 8 vor / nach 2013) mit einer gewissen Skepsis zu betrachten ist; dies insbesondere zum Zeitpunkt der Rezepturanpassung. Aus diesen Gründen erfolgt im Nachfolgenden keine weitere Unterscheidung der zwei Belagsrezepturen.

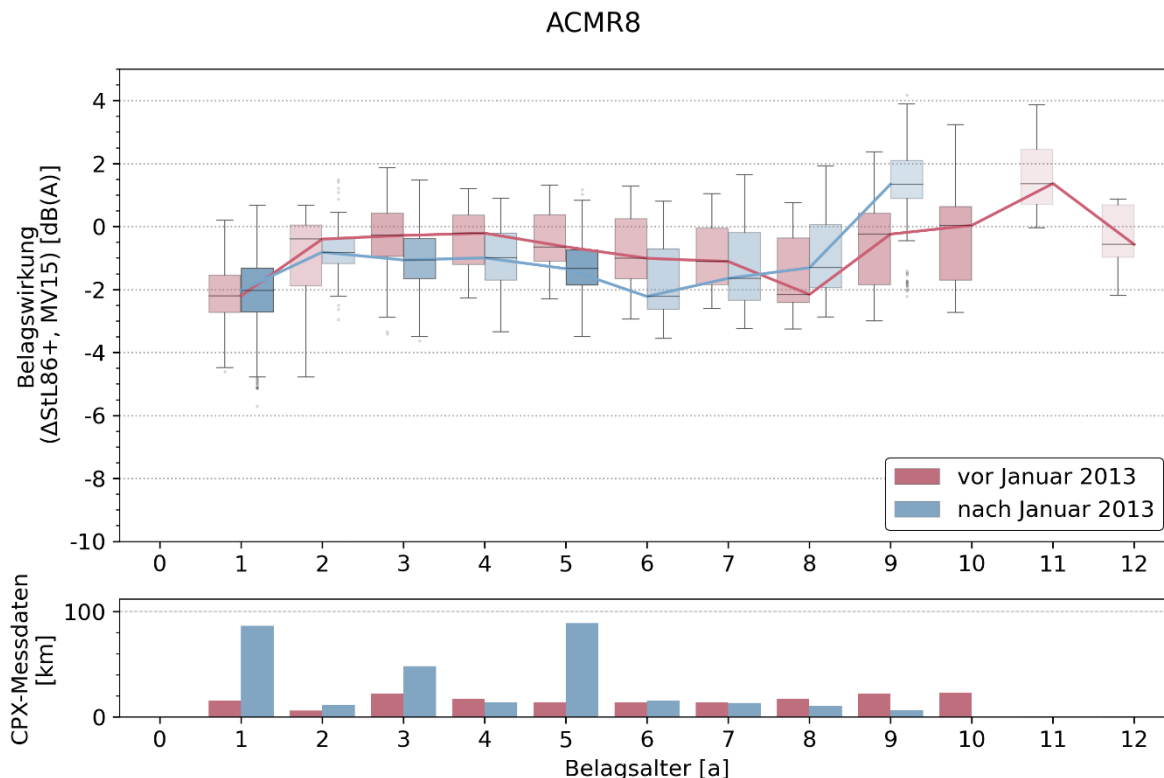


Abbildung 20: CPX-Messdaten der ACMR 8-Beläge, aufgeschlüsselt nach den zwei Belagsrezepturen «vor Januar 2013» (= 8 % Hohlraumgehalt) und «nach Januar 2013» (= 6 % Hohlraumgehalt).

3.1.3 Alterungskurve PA 11 / PA 8

Die Lebensdauer eines PA-Belags ist gemäss *Leitfaden Strassenlärm* auf 10 Jahre beschränkt. Die Alterungskurven der zwei PA-Beläge sind in Abbildung 21 und Abbildung 22 dargestellt.

Beim PA 11-Belag sind — ähnlich wie beim ACMR 8 — genügend SPB-Messdaten vorhanden, um neben der CPX-Alterungskurve auch eine genügend robuste SPB-Alterungskurve zu berechnen. Es ist allerdings zu beachten, dass diese Messdaten von nur einigen, wenigen Standorten stammen und dementsprechend ein verzerrtes Bild entstehen kann. Es zeigt sich, dass sich die Messdaten der zwei Messverfahren «CPX» und «SPB» deutlich voneinander unterscheiden. Dieser Unterschied kann durch die Wirkung des PA-Belags als grossflächiger Schallabsorber sowie dem Betrachtungsunterschied der zwei Messverfahren erklärt werden. Bei einer CPX-Messung sind die Messmikrofone direkt neben den Reifen angebracht. Dadurch lassen sich die Emissionen sehr nahe an der Lärmquelle (Reifen-Rollgeräusch) messen (daher auch der Name «Close-Proximity»). Bei diesem Messverfahren wird der schallabsorbierenden, flächigen Wirkung eines PA-Belags jedoch nicht genügend Rechnung getragen. Diverse parallele Immissionsmessungen zeigen, dass emissionsnahe Messverfahren CPX die beim Immissionspunkt gemessene Wirkung nicht ausreichend abzubilden vermögen. Dies ist weiter zu untersuchen. Dementsprechend sind die CPX-Messdaten bei PA-Belägen als zu konservativ einzustufen. Die auf den SPB-Messdaten basierende Alterungskurve zeigt eine mittlere Anfangswirkung von -6 bis -4 dB(A) und eine erwartete Endwirkung nach 10 Jahren von ca. -4 bis -3 dB(A). Die entsprechenden 83 % Quantile sind um rund 1 bis 2 Dezibel lauter.

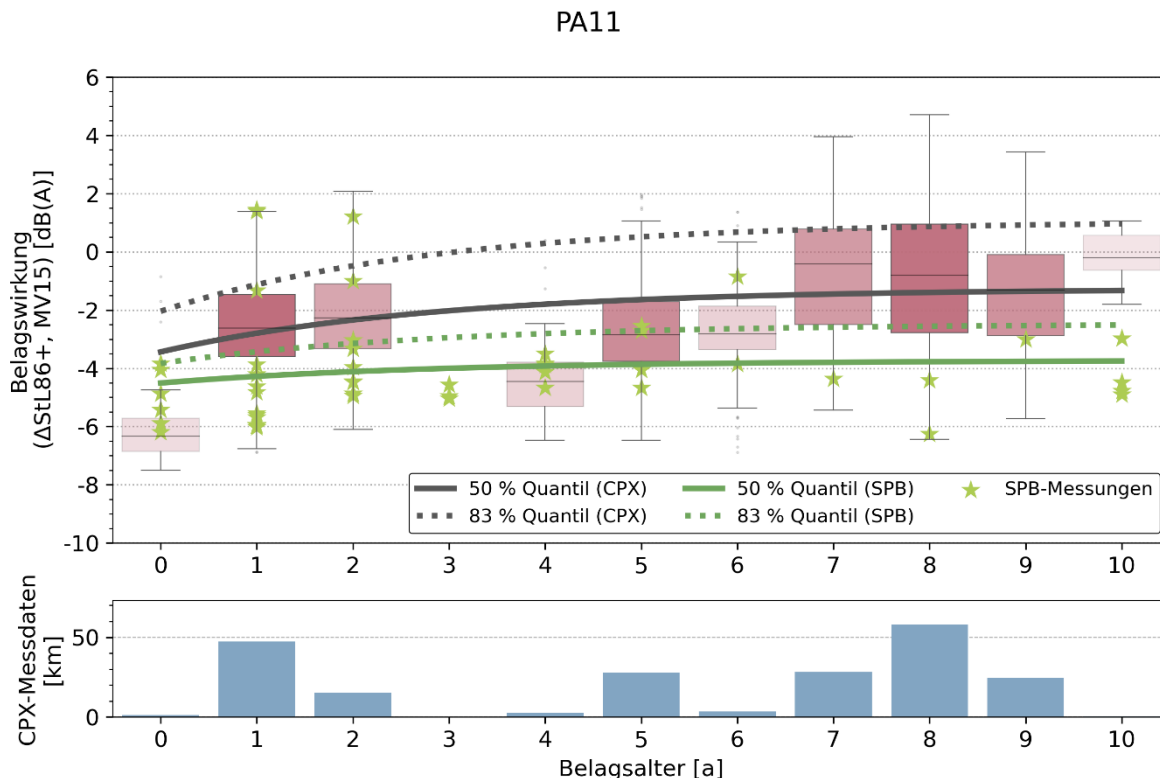


Abbildung 21: Alterungskurven des PA 11-Belags basierend auf den CPX-Messdaten (rote Boxplots und dunkelgraue Kurven) und den SPB-Messdaten (grüne Sterne und grüne Kurven).

Beim PA 8-Belag ist die Datengrundlage der CPX- wie auch SPB-Messdaten sehr gering und dementsprechend ist die Unsicherheit der berechneten Alterungskurve gross. Es zeigt sich ein mittlere Anfangswirkung von rund -6 bis -4 $dB(A)$ und eine erwartete mittlere Endwirkung von ca. -3 $dB(A)$. Bei Betrachtung des 83 % Quantils (dies bedeutet, dass 83 % der Beläge leiser als der angegebene Wert sind) liegen die Start- und Endwerte bei ca. -3 $dB(A)$ respektive 0 $dB(A)$.

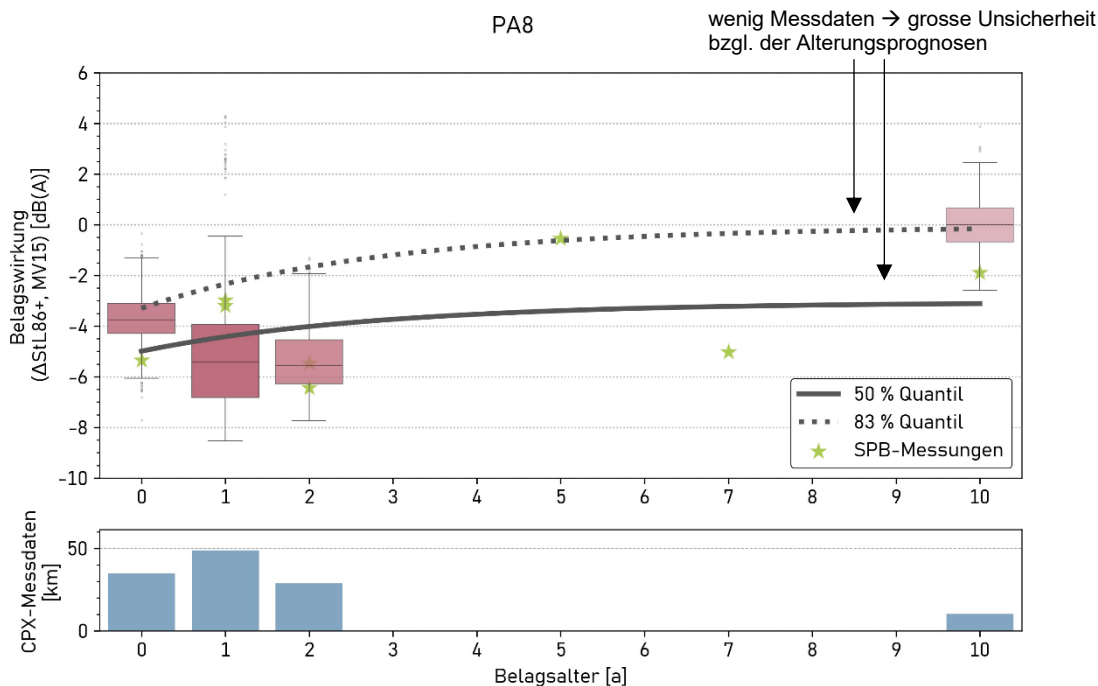


Abbildung 22: Alterungskurve des PA 8-Belags basierend auf den CPX-Messdaten.

3.2 Belagskennwerte

In Tabelle 3 sind die neu bestimmten Belagskennwerte dargestellt. Diese Resultate wurden aus den neu berechneten Alterungskurven (siehe Kapitel 3.1) abgeleitet. Die Kennwerte haben bei Emissionsberechnungen im Lärmvollzug rechtlich bindenden Charakter.

In Tabelle 3 sind neben den zurzeit gültigen Belagskennwerten (Spalte *Leitfaden Strassenlärm*) die aus den Alterungskurven entnommenen 50 und 83 % Quantile nach 15 Jahren Lebensdauer, die daraus abgeleiteten Vorschläge für die neuen Belagskennwerte wie auch die Stichprobengrösse der entsprechenden Datengrundlage dargestellt. Die lärmarmen Beläge sind in der Tabelle hellgrün markiert.

Wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben, unterschätzen die CPX-Messdaten die tatsächliche immissionsseitige Wirkung von PA-Belägen. Aus diesem Grund sind neben den 50 und 83 % Quantilen der CPX-Daten auch die entsprechenden SPB-Daten für den PA 11 in der Tabelle 3 aufgeführt.

Gemäss *Leitfaden Strassenlärm – Anhang 1a* [11] werden die Belagskennwerte mit dem 83 % Quantil bestimmt. Dies entspricht dem Mittelwert plus einer Standardabweichung. Damit befinden sich 5/6 der gemessenen Beläge innerhalb des Vertrauensbereichs, 1/6 der Beläge befinden sich ausserhalb des Vertrauensbereichs. Die Erfahrung zeigt, dass insbesondere lärmarme Belägen nicht immer unter Idealbedingungen eingebaut respektive hergestellt werden. Dies äussert sich auch durch Ausreisser mit schlechten akustischen Belagswirkungen. Diese Definition ist jedoch sehr konservativ und unterschätzt die tatsächliche Wirkung der meisten lärmarmen Beläge. Bei der Definition der Belagskennwerte im Jahr 2006 [11] wurden die Daten vor der Analyse von Ausreissern mit speziell schlechten Belagswirkungen bereinigt. In der vorliegenden Analyse wurden solche Ausreisser nicht entfernt. Folglich werden Beläge mit unterschiedlicher Einbauqualität in dieser Studie berücksichtigt. Es wird deshalb vorgeschlagen, bei lärmarmen Belägen anstelle des 83 % Quantils die Verwendung des 50 % Quantils bei der Festlegung des Kennwerts zu berücksichtigen. Die aktuelle Analyse zeigt, dass die vorliegenden Messauswertungen weitestgehend ähnlich mit den Erkenntnissen des Berichtes von 2017 [3] sind.

Tabelle 3: Belagskennwerte basierend auf den neu berechneten Alterungskurven.

Belagstyp	Leitfaden Strassenlärm	50 % Quantil (2022)	83 % Quantil (2022)	Vorgeschlagener KB-Wert (2022)	Stichprobengrösse CPX (2022) [km]
PA 8*	-3	-3.1	-0.2	-3	120
PA 11* (CPX-Daten)	-3	-1.3	+1.0	-3	210
PA 11* (SPB-Daten)	-3	-3.9	-2.5	-3	54 SPB-Messpunkte
SDA 8	-1	-1.1	-0.2	-1	520
ACMR 8	0	-0.7	+0.6	0	460
AC 11	+2	+1.1	+2.3	+2	160
AC 16	+2	+0.8	+2.3	+2	180
ACMR 11	+2	+1.3	+2.7	+2	390
MA11	+2	+0.5	+2.0	+2	25
MA16	+2	+1.2	+2.8	+2	50
SMA 8	+2	+0.2	+1.3	+2	25
SMA 11	+2	+1.3	+2.3	+2	370
Beton**	+5	-	-	+5	-

*Bei PA-Belägen wird gemäss Leitfaden Strassenlärm eine Lebensdauer von 10 Jahren erwartet

**Der Wert von +5 dB gilt für die alte Bauweise. Neuere Bauweisen wirken deutlich leiser.

3.3 Belagswirkung - Einfluss Verkehr

In der nachfolgenden Analyse wurde die Belagswirkung hinsichtlich des Verkehrseinflusses untersucht. Aufgrund der teilweise geringen Datenmenge kann diese Auswertung lediglich für den SDA 8 und ACMR 8 Belag durchgeführt werden. Bei diesen beiden Belägen liegen genügend kontinuierliche Messdaten für die Normalspuren wie auch die Überholspuren vor.

3.3.1 Normalspur vs. Überholspur

Wie den Abbildung 23 und Abbildung 24 zu entnehmen ist, gibt es einen deutlichen Wirkungsunterschied hinsichtlich der Fahrspuren. Die Normalspuren, welche im Strassenverkehr generell und insbesondere durch den Schwerverkehr am stärksten beansprucht wird, weist eine um ca. 1 bis 2 Dezibel schlechtere Belagswirkung als die Überholspuren 1 und 2 auf. Es ist anzunehmen, dass die Überholspuren 2 wiederum etwas leiser sind als die Überholspuren 1. Aufgrund der geringen Datenmenge zu den Überholspuren 2 kann dies jedoch nicht bestätigt werden.

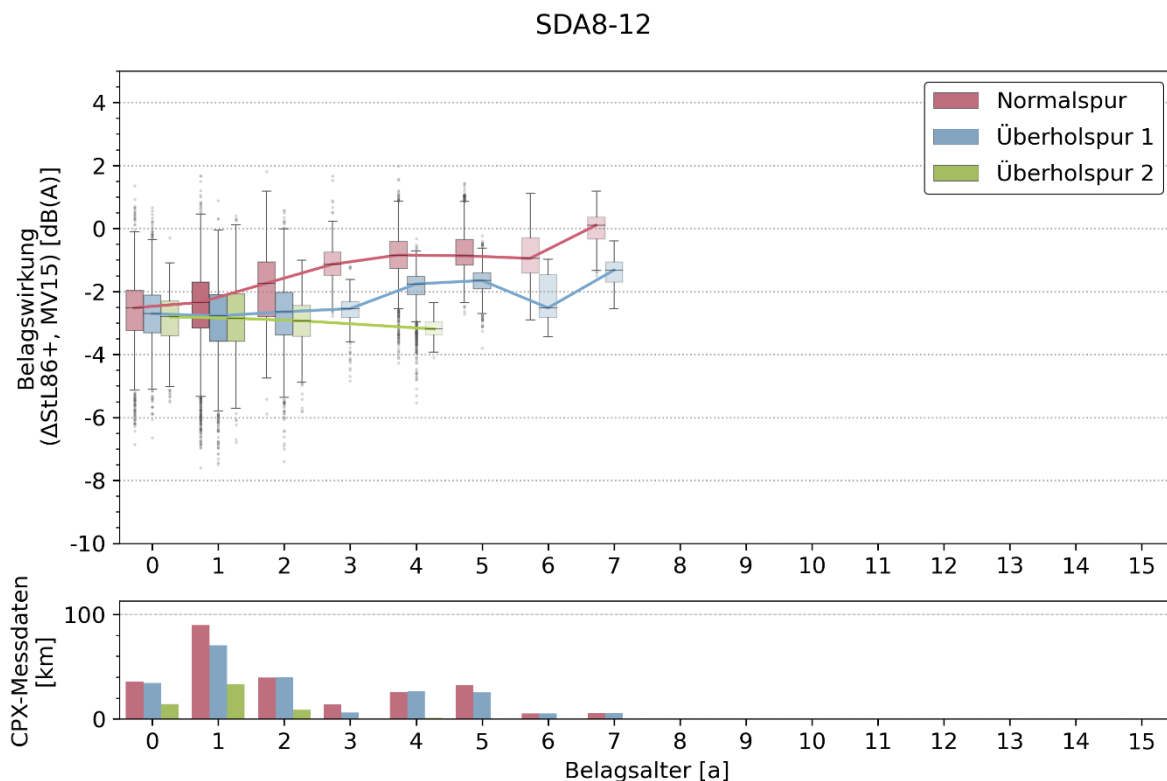


Abbildung 23: CPX-Messdaten der SDA 8-Beläge, aufgeschlüsselt nach der Wirkung pro Belagsalter und Fahrspur.

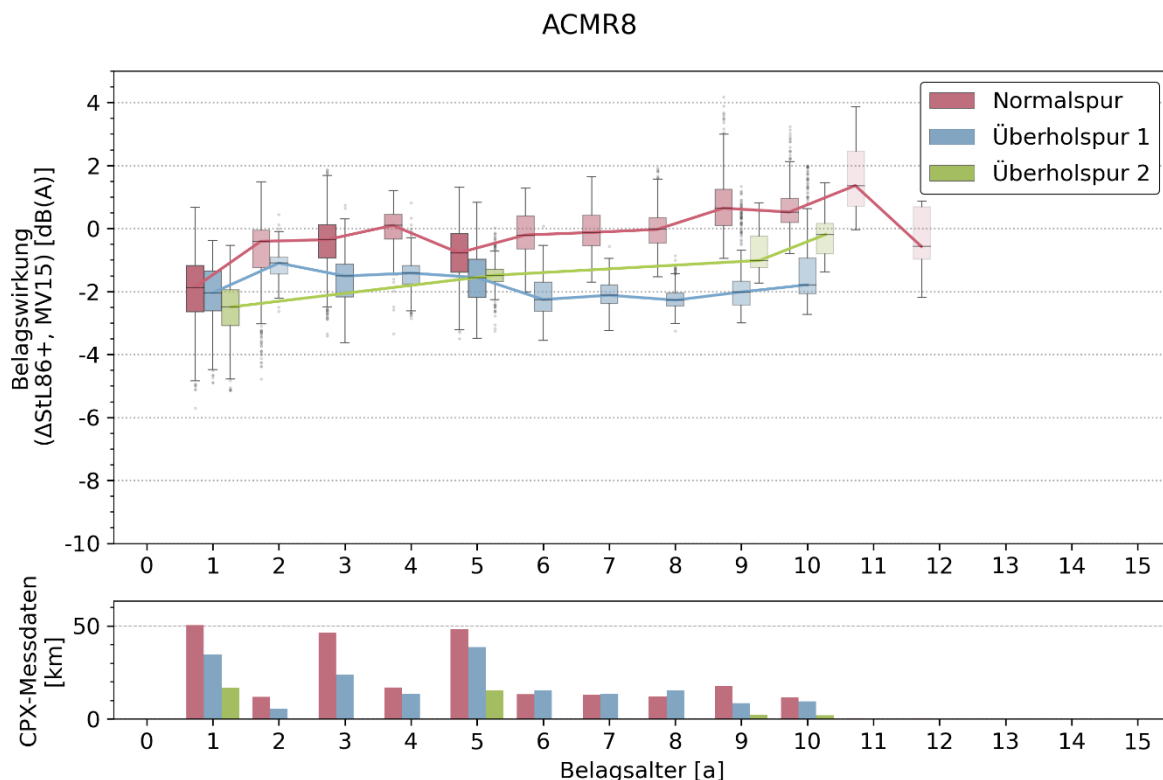


Abbildung 24: CPX-Messdaten der ACMR 8-Beläge, aufgeschlüsselt nach der Wirkung pro Belagsalter und Fahrspur.

Diese Analyse zeigt, dass bei einer Beurteilung der akustischen Belageigenschaften im Rahmen des Lärmvollzugs und Belagsmonitoring sämtliche Fahrspuren berücksichtigt werden müssen. Eine solche Beurteilung kann nur mittels CPX-Messdaten erfolgen, denn bei SPB-Messungen kann lediglich die Normalspur gemessen werden.

3.3.2 Einfluss Verkehrsbelastung und Belagsalter

Es wurde weiter untersucht, inwiefern sich der Schwerverkehr im Vergleich zu gewöhnlichen Personenwagen (leichte Fahrzeuge) auf die Belagswirkung auswirkt. Hierzu wurde die Belagswirkung in einem linearen Regressionsmodell mit den unabhängigen und standardisierten Variablen «Belagsalter», «DTV_leichte_Fz» und «DTV_schwere_Fz» regressiert. Die Berechnungsgrundlagen für die letztgenannten Variablen sind in Kapitel 2.3.2 zu finden. Der Output des in Python berechneten Modells ist in Abbildung 28 im Anhang 6 dargestellt. Aus dem Modell-Output ist ersichtlich, dass die drei unabhängigen Variablen 24.1 % der Varianz der MV15-Messwerte erklären. Das Modell beschreibt die Varianz der MV15-Messdaten somit nur teilweise, es können jedoch Tendenzen abgeleitet werden. Das Belagsalter hat den grössten Einfluss auf den MV15-Wert, was allgemein bekannt ist und mit dem grossen Gewicht der Umweltfaktoren beziehungsweise den chemischen Prozessen über die Zeit hinweg zu erklären ist. Weiter ist anhand der Koeffizienten der standardisierten Variablen wie auch der t-Werte ersichtlich, dass die schweren Fahrzeuge einen deutlich grösseren Einfluss auf die Belagswirkung haben als die normalen beziehungsweise leichten Fahrzeuge.

3.4 Belagswirkung – Einfluss Bauparameter

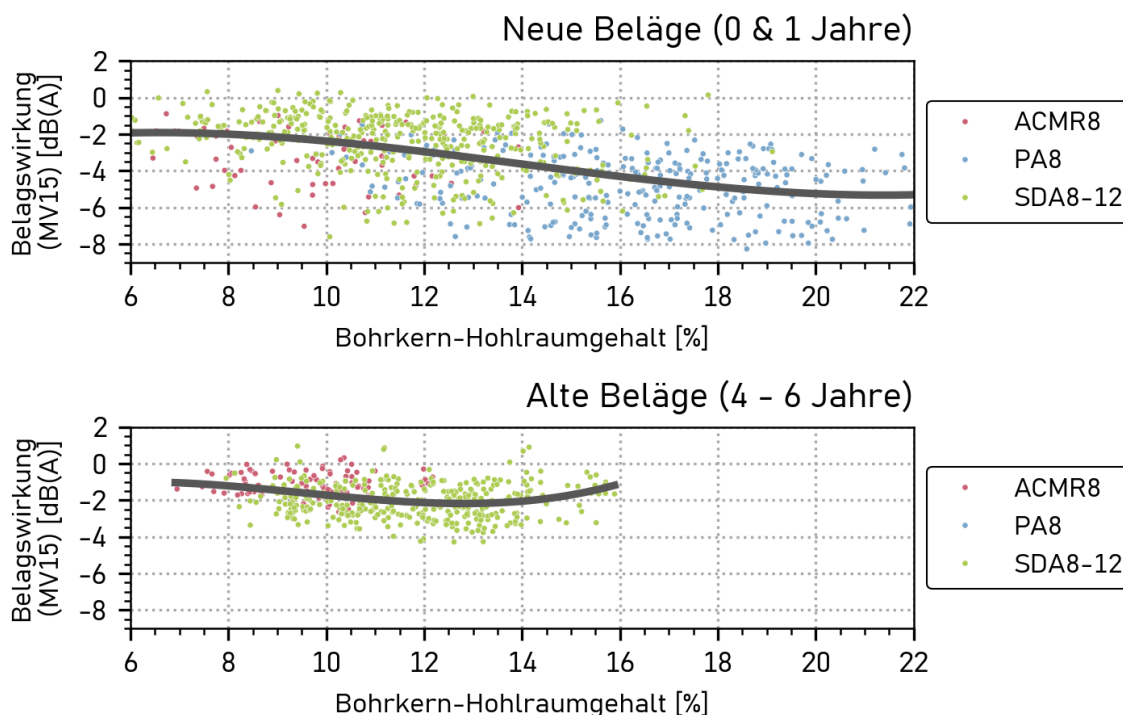
Anhand der digitalisierten Mischgut- und Bohrkernparameter und durch die Kombination dieser Daten mit den CPX-Messdaten kann der Einfluss der unterschiedlichen Bauparameter auf die Belagsakustik untersucht werden. Hierzu wurden mittels linearer Regression die Einbauparameter mit den MV15-Messwerten der CPX-Daten untersucht. Aufgrund der geringen Stichprobengrösse/Datenmenge, konnten diese Untersuchungen lediglich für den SDA 8 und ACMR 8 Belag durchgeführt werden.

Nachfolgend wird spezifisch auf den Hohlraumgehalt, die Siebkurven der Mischgüter und auf den generellen Einfluss der verschiedenen Bauparameter eingegangen.

3.4.1 Hohlraumgehalt (volumetrisch)

In Abbildung 25 ist der Zusammenhang zwischen der Belagswirkung und dem Bohrkern-Hohlraumgehalt für neue (0 und 1 Jahre) und alte (4-6 Jahre) Beläge dargestellt. Die dunkelgraue Kurve ist hierbei ein durch die Datenpunkte gefittetes Polynom dritten Grades. Hierbei wird der volumetrische Hohlraumgehalt (=Ausmessverfahren) betrachtet. Der ermittelnde Hohlraumgehalt mittels Ausmessverfahren ist etwas höher als der Hohlraumgehalt mittels Tauchwiegeverfahren. Sämtliche Hohlraumwerte, welche ursprünglich mittels Tauchwiegeverfahren ermittelt wurden, wurden vor der Analyse mittels linearer Regression in volumetrische Hohlraumwerte umgerechnet.

Anhand dieser Darstellung ist ersichtlich, dass bei höheren Hohlraumgehalten tendenziell bessere Anfangs- aber auch Langzeitwirkungen erzielt werden können. Dies gilt zumindest für den semi-dichten Bereich mit 8-14 % Hohlraumgehalt. Für höhere Hohlraum-Werte ist die Datenlage noch unklar.



Grenzwerte:

- ACMR 8: 2.5-8 % (VSS 40 430)
- PA 8: 16-22 % (VSS 40 430)
- SDA 8-12: 10-16 % (VSS 40 436)

Abbildung 25: Zusammenhang zwischen MV15 Hohlraumgehalt für neue und alte Beläge.

In Abbildung 26 ist der Zusammenhang zwischen dem Marshall-Hohlraumgehalt, Bohrkern-Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad illustriert. Der Marshall-Hohlraumgehalt wird anhand des Mischgutes und mittels definiertem Marshall-Prüfkörper bestimmt. Dieser Wert allein gibt jedoch noch nicht Auskunft über den effektiv resultierenden Hohlraumgehalt des Deckbelags. Denn der Bohrkern-Hohlraumgehalt ist abhängig von dem Verdichtungsgrad und dem Marshall-Hohlraumgehalt.

Anhand der Daten lässt sich die folgende lineare Beziehung ableiten:

$$\text{Marshall-Hohlraumgehalt} \approx -78.7 + (0.98 * \text{Bohrkern-Hohlraumgehalt}) + (0.79 * \text{Verdichtungsgrad})$$

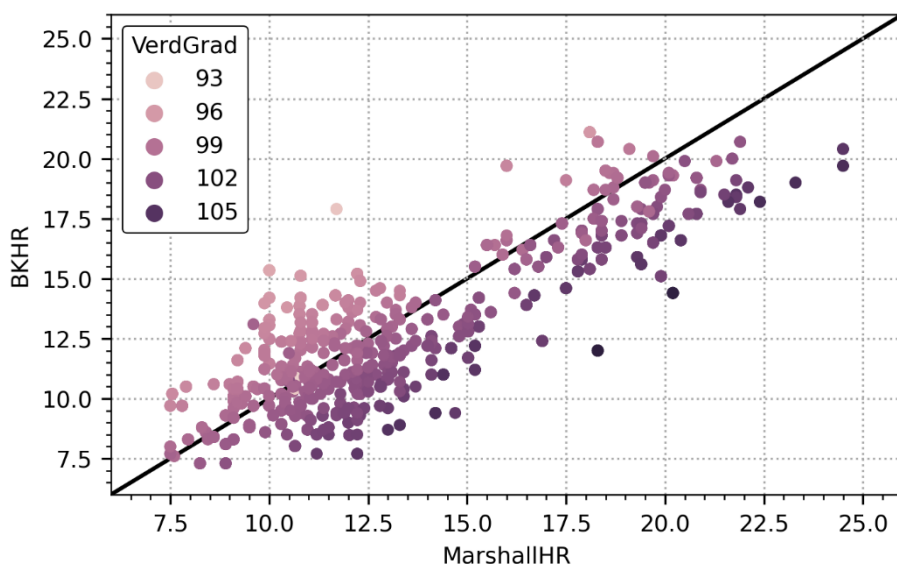


Abbildung 26: Zusammenhang zwischen Marshall-Hohlraumgehalt, Bohrkern-Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad.

3.4.2 Siebkurven der Mischgüter

In Abbildung 27 ist die Korngrößenverteilung/Siebkurve sämtlicher Mischgüter des räumlich kombinierten Datensatzes CPX-Mischgüter-Bohrkerne für die drei Belagstypen SDA 8-12, ACMR 8 und PA 8 dargestellt. Zu jedem Belagstyp ist zudem die Anzahl dargestellter Mischgüter angegeben. Anhand der Abbildung 27 ist ersichtlich, dass die eingebauten Belagsrezepturen des SDA 8-12 Belags eine deutlich grössere Bandbreite im Vergleich zu den anderen beiden Rezepturen aufweisen. Zudem ist eine Überlappung von ACMR 8 und SDA 8-12 wie auch eine teilweise Überlappung zwischen SDA 8-12 und PA 8 festzustellen.

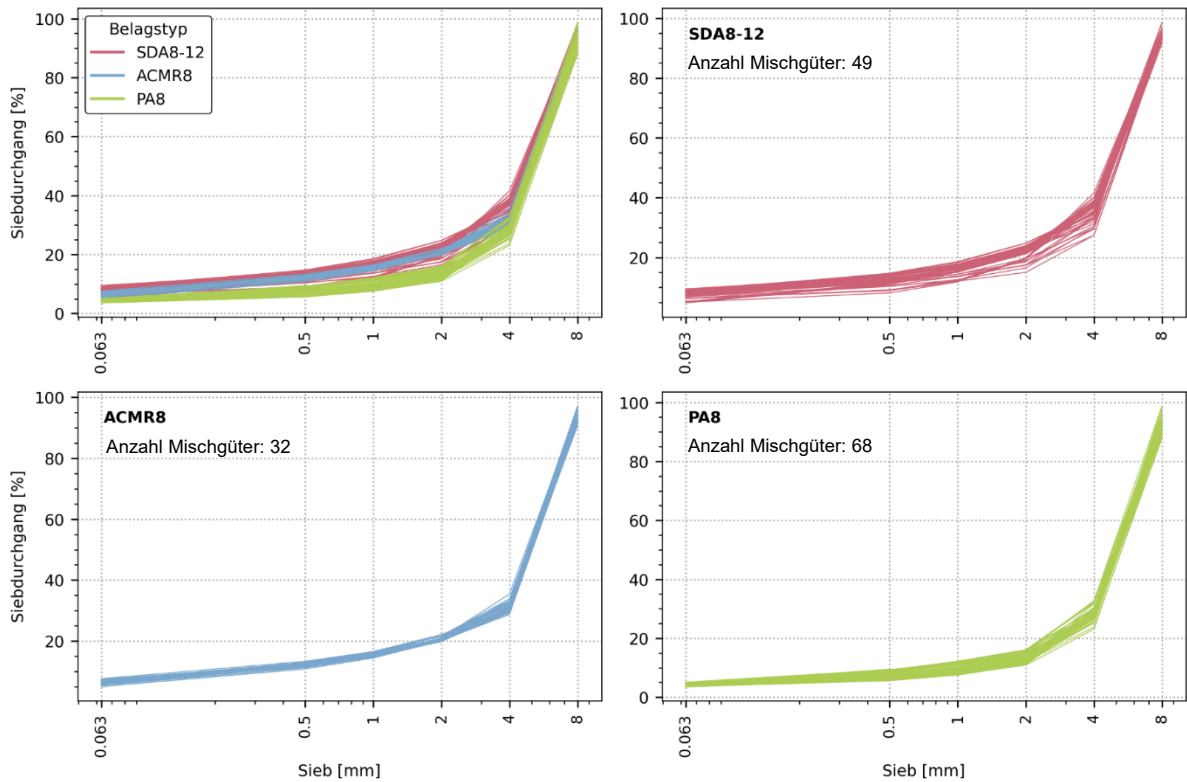


Abbildung 27: Siebkurven aller digitalisierten Mischgüter, aufgeschlüsselt nach den drei Belagstypen SDA 8-12, ACMR 8 und PA 8.

3.4.3 Einflussreiche Bauparameter

Für die Analyse des Einflusses der einzelnen Bauparameter wurde ein lineares Regressionsmodell erstellt. Hierbei wurde der MV15-Wert mit den Bauparametern Verdichtungsgrad, Bohrkern-Hohlraumgehalt, Schichtdicke, den einzelnen Korngrössenfraktionen des Mischgutes (0.063, 0.5, 1, 2, 4 & 8 mm), der Mischguttemperatur, dem löslichen Anteil des Bindemittels wie auch dem Stabilitätsparameter aus dem Marshall-Versuch regressiert. Die Werte der Bauparameter wurden vor der Regression standardisiert. Der Output des in Python berechneten Modells ist in Abbildung 29 dargestellt. Aus dem Modell-Output ist ersichtlich, dass die Bauparameter rund 44 % der MV15-Varianz erklären. Ähnlich wie beim Regressionsmodell in Kapitel 3.3.2 erklären die Modellvariablen die Varianz der MV15-Messdaten nur teilweise. Dennoch ermöglicht das Modell durch die Standardisierung der Modellvariablen die Identifizierung von Trends und eine grobe Rangfolge der verschiedenen Einflussgrössen. Diese Resultate sind unabhängig vom Belagsalter und gelten somit für neue als auch ältere Beläge.

Nach dem Modell beeinflussen die folgenden Bauparameter die Belagsakustik in absteigender Reihenfolge:

1. Sieb 1 mm
2. Bohrkern-Hohlraumgehalt
3. Sieb 0.5 mm
4. Sieb 0.063 mm (Füller)
5. Verdichtungsgrad

Das Modell zeigt, dass die verbleibenden Parameter deutlich geringeren Einfluss auf die Belagswirkung haben. Es ist wichtig zu beachten, dass insbesondere die Variablen der Siebfraktionen miteinander korreliert sind. Daher sollten diese Ergebnisse mit Vorsicht interpretiert werden. Für genauere Analysen ist eine grössere Stichprobe mit mehr Messdaten notwendig.

4 Schlussfolgerung

Mit der vorliegenden Studie wurde der Bericht *Teilprogramm "Akustische Auswertung der lärmarmen Strassenbeläge"* vom März 2017 aktualisiert und überarbeitet. Hierbei wurden die **akustischen Eigenschaften der lärmarmen Strassenbeläge** des ASTRA anhand der aktuellsten Messdaten charakterisiert. Die für dieses Projekt verwendete Datengrundlage enthält sämtliche verfügbaren Belagsuntersuchungen des ASTRA bis 31.12.2022. Diese Untersuchungen dienen dem Nachweis der **Belagswirkungen im Lärmvollzug** sowie der **Datensammlung für neue Erkenntnisse** und der akustischen Zustandserfassung von Strassenbelägen für die Lärmmodellierung im Rahmen des Lärmvollzuges.

Im Rahmen dieses Projektes wurde der akustische Datensatz der **SPB-Messungen** von Nationalstrassen deutlich erweitert. Es wurden über 2'900 Strassenkilometer an aufbereiteten und homogenisierten **CPX-Messungen** berücksichtigt. Erstmals wurden auch bautechnische Belagsdaten systematisch zusammengetragen, digitalisiert und analysiert. Hierbei wurden rund **590 Bohrkernuntersuchungen** und über **500 Mischgutuntersuchungen** digitalisiert.

Basierend auf den aktualisierten akustischen Datensätzen wurden die **belagsspezifischen Alterungskurven** der Beläge neu berechnet. Diese Berechnungen konnten anhand der CPX-Messdaten direkt für den Mischverkehrswert mit 15 % Schwerverkehrsanteil (**MV15**) durchgeführt werden.

Anhand der neu berechneten Alterungskurven können die **Belagskennwerte** direkt abgelesen werden. Die aktuelle Überprüfung der Belagskennwerte zeigt, dass die vorliegenden Messauswertungen weitestgehend deckungsgleich mit den Erkenntnissen des vorangehenden Berichtes von 2017 sind. Es sind somit keine Anpassungen der Belagskennwerte für den Lärmvollzug notwendig. Es ist jedoch anzumerken, dass bei den lärmarmen Belagstechnologien neben den **83 % Quantilen** auch die **50 % Quantile** der Alterungskurven zu berücksichtigen sind. Die Erfahrung zeigt, dass insbesondere lärmarme Belägen nicht immer unter Idealbedingungen eingebaut respektive hergestellt werden. Dies äussert sich auch durch **Ausreisser mit schlechten akustischen Belagswirkungen**. Die alleinige Berücksichtigung der 83 % Quantile für die Bestimmung der Belagskennwerte ist jedoch sehr konservativ und unterschätzt die tatsächliche Wirkung der meisten lärmarmen Belagstechnologien. In früheren Studien wurden die akustisch schlechten «Ausreisser» teilweise als nicht erfolgreich und somit nicht lärmarm klassifiziert und dadurch auch aus den Berechnungen der Alterungskurven ausgeschlossen. Dieses Problem der Datenverzerrung ist auch unter dem Namen «Selection Bias» bekannt. In der vorliegenden Studie wurden nun sämtliche vorhandenen Daten berücksichtigt, auch Messdaten mit schlechten akustischen Wirkungen. Die heute eingebauten lärmarmen Belagsrezepturen sind genauso gut, wenn nicht sogar besser, als die Belagsrezepturen, welche vor zehn Jahren eingebaut wurden. Aus diesen Gründen sollen zukünftig auch die 50 % Quantile für die Alterungskurven berücksichtigt werden.

Die Analyse der Belagswirkung hinsichtlich der Fahrspur zeigte auf, dass die **Normalspur** auf einem SDA 8-12- und ACMR 8-Belag um **1 bis 2 Dezibel lauter** ist als die entsprechenden **Überholspuren**. Folglich müssen bei einer Beurteilung der akustischen Belageigenschaften im Rahmen des Lärmvollzuges und Belagsmonitoring sämtliche Fahrspuren berücksichtigt werden. Es zeigt sich, dass die **Alterung des Belags** für die Belagswirkung bedeutender ist als die **Verkehrsbelastung** und folglich auch zukünftig im Mittelpunkt der Auswertungen stehen sollte. In der Auswertung bezüglich der Verkehrsbelastung wurde zusätzlich festgestellt, dass der Schwerverkehr einen stärkeren Einfluss auf die Belagswirkung hat als leichtere Fahrzeuge.

Die Untersuchung der Bauparameter ergab, dass mit den bis anhin gesammelten Daten leider noch keine vertieften Analysen über den Zusammenhang der Bauparameter und der Belagsakustik möglich sind. Hierzu ist die Datengrundlage aktuell leider noch zu klein. Aufgrund dieser kleinen Datengrundlage kann auch noch keine Auswertung von «korrekt» / «nicht korrekt» eingebauten Belägen durchgeführt werden, denn hierzu sind die Stichproben ebenfalls zu klein. Es sind jedoch erste Tendenzen zu erkennen, wie z.B., dass bei Belägen mit **höheren Hohlraumgehalten** sowohl anfänglich als auch langfristig etwas bessere Belagswirkungen erzielt werden können. Dies trifft

zumindest auf den semi-dichten Bereich mit einem Hohlraumgehalt von **8-14 %** zu – bei höheren Hohlraumanteilen geht die Lärmoptimierung auf Kosten der Lebensdauer. Es wurde zudem festgestellt, dass sich die **Korngrößenverteilungen** von eingebauten ACMR 8-, SDA 8-12- und PA 8-Beläge teilweise überschneiden. Innerhalb eines Belagstyps kann die Siebkurve des Mischguts deutlich variieren.

Es zeigte sich weiter, dass die **Bauparameter Sieb 1 mm, Bohrkern-Hohlraumgehalt, Sieb 0.5 mm, Sieb 0.063 mm** (Füller) und der **Verdichtungsgrad** einen markanten **Einfluss auf die Belagsakustik** haben. Für eine detaillierte Analyse der Bauparameter mit dem Ziel der **Belagsrezeptur-Optimierung** sind jedoch grössere Stichproben mit mehr Messdaten notwendig. Die Optimierung der Belagsrezeptur mithilfe von Bauparameter-Daten konnte im Innerortsbereich demonstriert werden. Dieses Ziel kann auch für Nationalstrassen erreicht werden, es bedingt jedoch zukünftig die systematische Erfassung und Digitalisierung der Bauparameter-Daten.

Grolimund + Partner AG



Daniel Schweizer



Tina Saurer

5 Anhang

Anhang 1: Literaturverzeichnis

- [1] Bundesamt für Strassen (ASTRA) und Bundesamt für Umwelt (BAFU), «Leitfaden Strassenlärm Anhang 1c : Technisches Merkblatt für akustische Belagsgütemessungen an Strassen», 2013.
- [2] Bundesamt für Strassen (ASTRA), «Technisches Merkblatt Projektierung 21001-20108 Akustische Beurteilung von lärmarmen Strassenbelägen». 1. Juli 2020.
- [3] Grolimund + Partner AG, «Teilprogramm Akustische Auswertung der lärmarmen Strassenbeläge - Zwischenbilanz 2015», März 2017.
- [4] VSS, «VSS-640425:2019 - Lärmindernde Decken - Grundlagen». 2013. Revision 2019
- [5] VSS, «VSS-436:2021 - Semidichtes Mischgut und Deckschichten, Festlegungen, Anforderungen und Konzeption». 2013. Revision 2021
- [6] ISO 11819-1, «Messung des Einflusses von Strassenoberflächen auf Verkehrsgeräusche Teil 1: Statistisches Vorbeifahrtverfahren (ISO 11819-1:1997) Acoustics», Nr. 2313, 1997.
- [7] ISO 11819-2, «Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 2: The close-proximity method (ISO 11819-2:2017)», S. 2–4, 2017.
- [8] ISO 11819-3, «ISO 11819-3, Acoustics — Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise — Part 3: Reference tyres», Bd. 2017, 2017.
- [9] «Modelletablierung Nationales Personenverkehrsmodell (NPVM) 2017 - Schlussbericht», 2020.
- [10] K. Heutschi, «sonROAD18 - Berechnungsmodell für Strassenlärm - Weiterentwicklungen und Ergänzungen.», 2022. [Online]. Verfügbar unter: www.bafu.admin.ch
- [11] H. Pestalozzi, «Bestimmung von akustischen Belagskennwerten als Grundlage für den Leitfaden BUWAL / ASTRA», 2006.

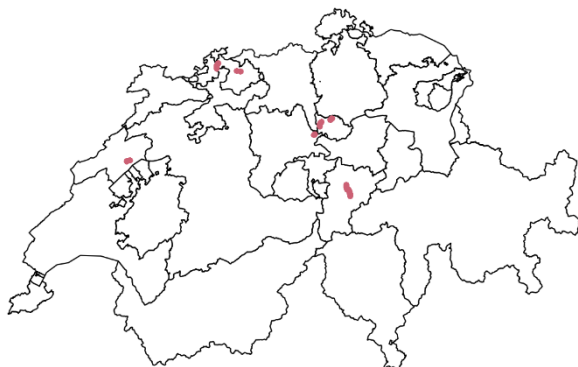
Anhang 2: Glossar

Abkürzung:	Bedeutung:
CPX	Rollgeräusch-messung (Close-Proximity-Methode)
SPB	Statistischen Vorbeifahrtmethode (Statistical-Pass-By-Methode)
SEM	Stichproben-Emissionsmessungen
DTV	Durchschnittlich täglicher Verkehr
N1	Anteil Personenwagen (%)
N2	Anteil Schwerverkehr (%)
MV15	Mischverkehrswert mit 15 % Schwerverkehrsanteil und 85 % Personenwagenanteil bezüglich dem Modell Stl86+
StL86+	Strassenlärmmodell
KB	«Korrektur Belageinfluss», Belagskennwert bezüglich dem Modell StL86+
PA	Drain Belag (Porous Asphalt)
SDA	Semi-dichter Belag (Semi Dense Asphalt)
ACMR	Rauasphaltbelag (Asphalt Concrete Macro Rough)
MG	Mischgutuntersuchung
BK	Bohrkernuntersuchung

Anhang 3: Übersichtskarten der CPX-Datengrundlage

Die Angabe #CPX-Segmente zeigt die Anzahl an CPX-Datenpunkte auf. Ein CPX-Segment entspricht einer gemessenen Strassenlänge von 20 m.

PA8, #CPX-Segmente: 6667



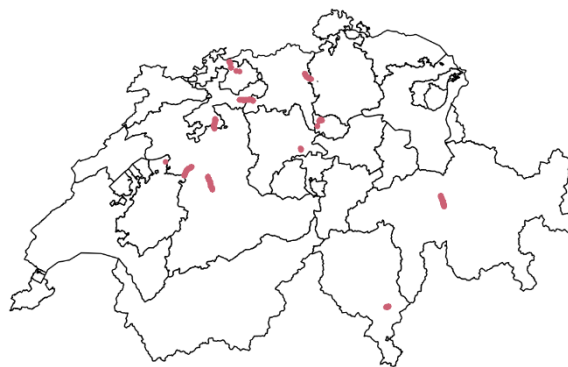
PA11, #CPX-Segmente: 14308



SDA8-12, #CPX-Segmente: 25932



ACMR8, #CPX-Segmente: 23017



ACMR11, #CPX-Segmente: 15233



SMA11, #CPX-Segmente: 14931



SMA8, #CPX-Segmente: 1161



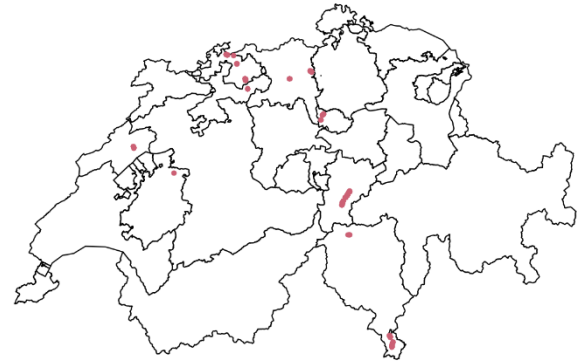
AC11, #CPX-Segmente: 7177



AC16, #CPX-Segmente: 7754



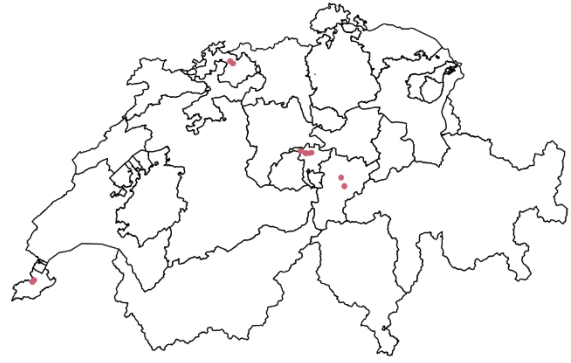
MA11, #CPX-Segmente: 945



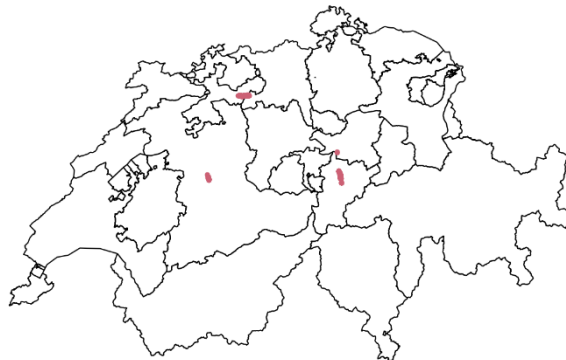
MA16, #CPX-Segmente: 1698



DSAK6, #CPX-Segmente: 563



Beton, #CPX-Segmente: 3035



HRA16, #CPX-Segmente: 633



TA16, #CPX-Segmente: 4372

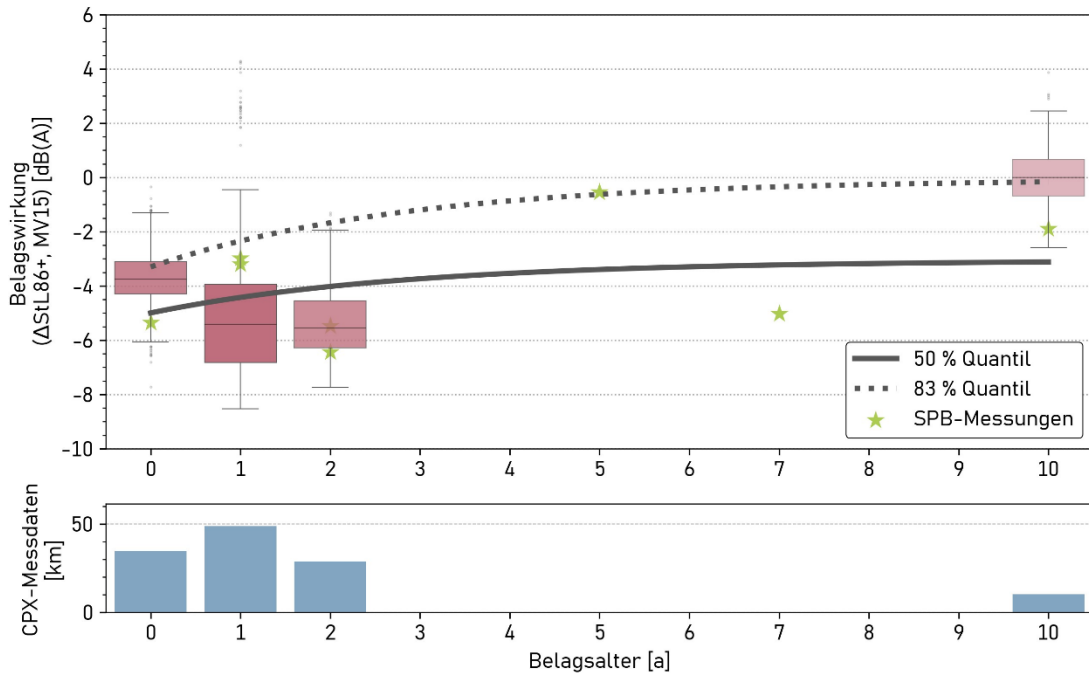


Anhang 4: Liste mit SPB-Standorten

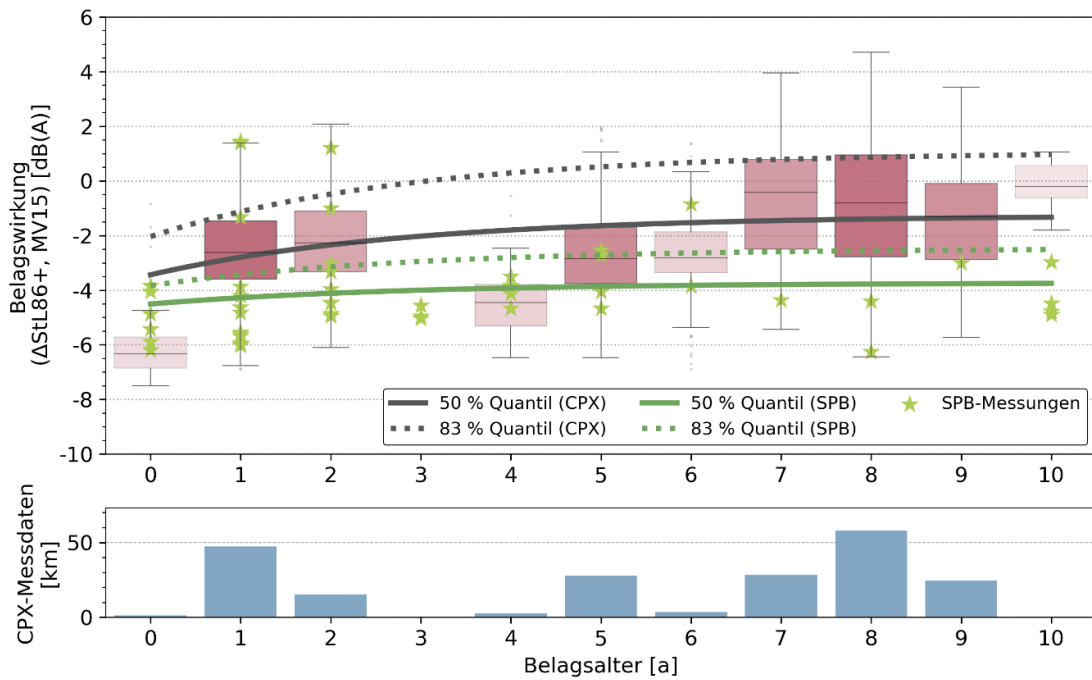
Gemeinde	Belag	Gemeinde	Belag	Gemeinde	Belag
Brienz	AC11	Niederbuchsiten	AC11	Bern	AC11
Frauenkappelen	AC11	Gurbrü	AC11	Mühleberg	AC11
Wimmis	AC11	Schönbühl	AC16	Derendingen	ACMR11
Versvey	ACMR11	Aigle	ACMR8	Alpnachstad	ACMR8
Attikon	ACMR8	Bad Ragaz	ACMR8	Benken	ACMR8
Bern	ACMR8	Cham	ACMR8	Chatel-St. Denis	ACMR8
Châtel-St-Denis	ACMR8	Colombier	ACMR8	Erstfeld	ACMR8
Etoy	ACMR8	Gunzgen	ACMR8	Hunzenschwil	ACMR8
Knonau	ACMR8	Luterbach	ACMR8	Münsingen	ACMR8
Niederurnen	ACMR8	Niederwangen	ACMR8	Oberbipp	ACMR8
Oberengstringen	ACMR8	Recherswil	ACMR8	Rubigen	ACMR8
St. Prex	ACMR8	Thalwil	ACMR8	Sargans	ACMR8
Wichtrach	ACMR8	Wünnewil	ACMR8	Subingen	ACMR8
Seedorf	Kaltnikro8	Schinznach-Dorf	MA	Wädenswil	ACMR8
Kölliken	PA11	La Neuveville	PA11	Würenlos	ACMR8
Oftringen Neu	PA11	Payerne	PA11	Erstfeld	PA11
Strengelbach	PA11	Suhr	PA11	Montreux	PA11
Suhr	PA11	Tolochenaz	PA11	Silenen	PA11
Walterswil	PA11	Walterswil Neu	PA11	Versvey	PA11
Erstfeld Nord	PA8	Niederlenz	PA8	Alpnachstad	PA8
Lugano Pazzallo	PA8	Melide	PA8	Bissone	PA8
Airolo	SDA8-12	Baar	SDA8-12	Bargen	SDA8-12
Brig	SDA8-12	Biaschina	SDA8-12	Birmenstorf	SDA8-12
Faido	SDA8-12	Frauenfeld	SDA8-12	Giornico	SDA8-12
Herblingen	SDA8-12	Hinterrhein	SDA8-12	Lugano-Pazzallo	SDA8-12
Muttenz	SDA8-12	Mesocco	SDA8-12	Mendrisio	SDA8-12
Uffikon-Sursee	SDA8-12	San Antonio	SDA8-12	St. Margrethen	SDA8-12
Wangen	SDA8-12	Wil SG	SDA8-12	Wil SG	SDA6
Rubigen	SMA11	Zeiningen	SMA11	Gurtellen	SMA11
Hunzenschwil	SMA11	Altendorf	SMA11	Oeschgen	SMA11
Oftringen	SMA11	Kaiseraugst	SMA11	Solothurn	SMA11
Rheinfelden	SMA8	Sempach	TA16	Neuenkirch	TA16

Anhang 5: Alterungskurven

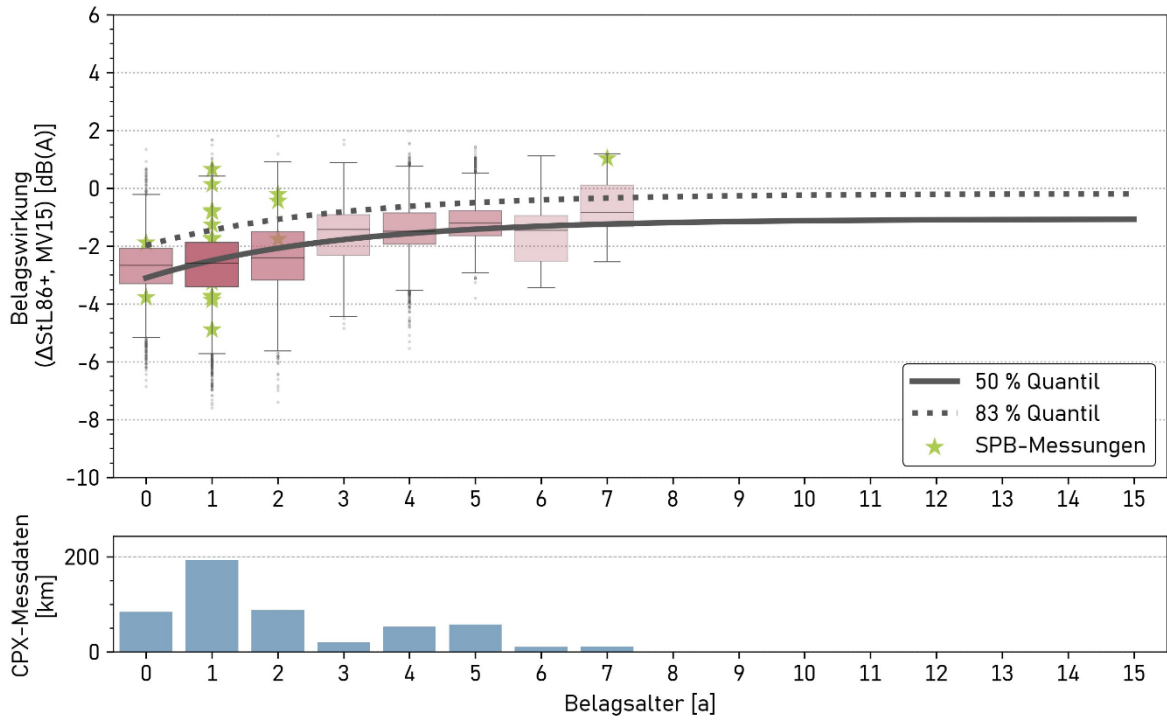
PA8



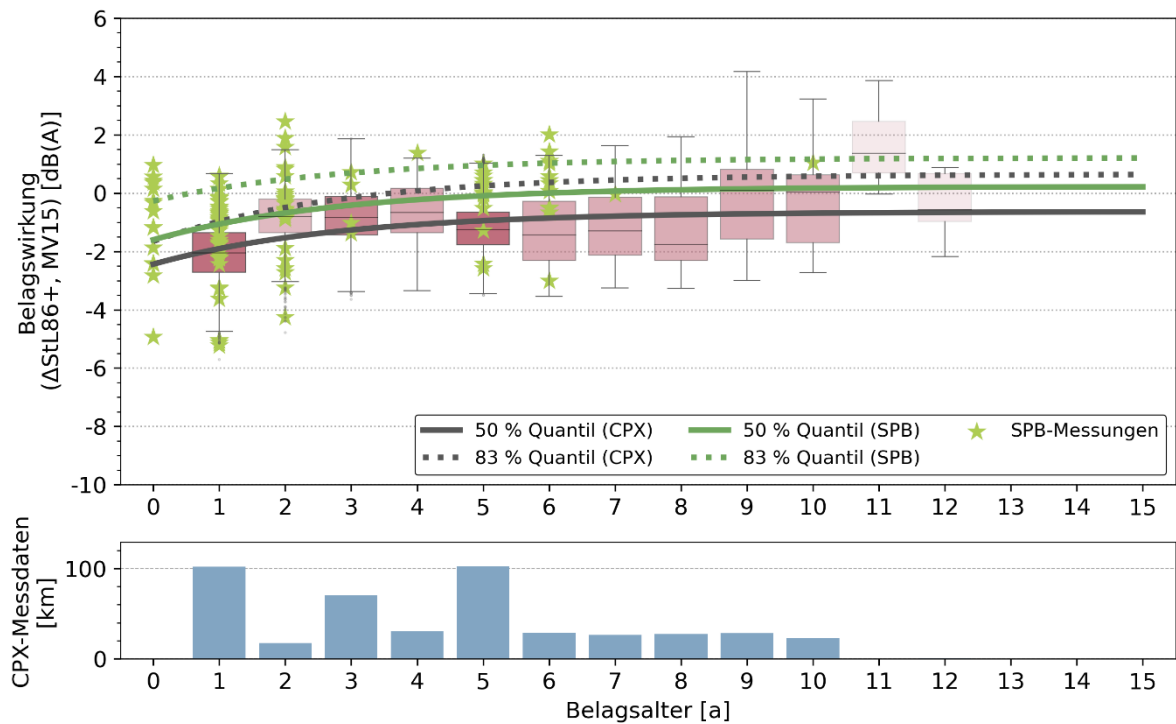
PA11



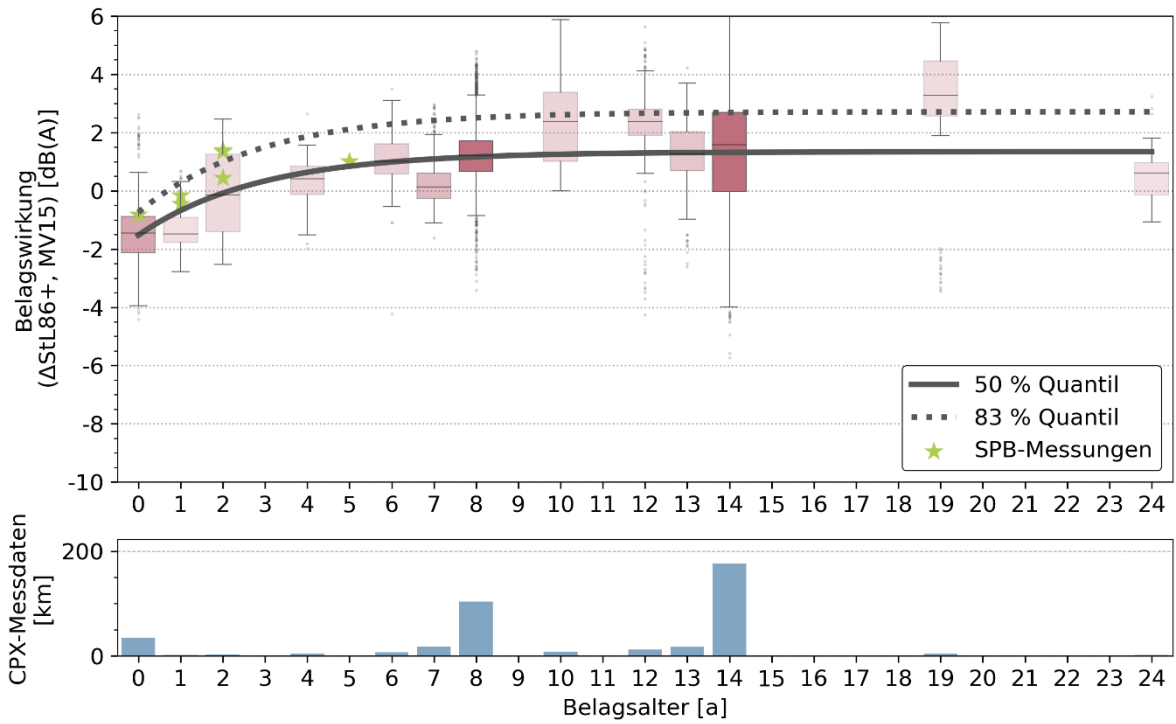
SDA8-12



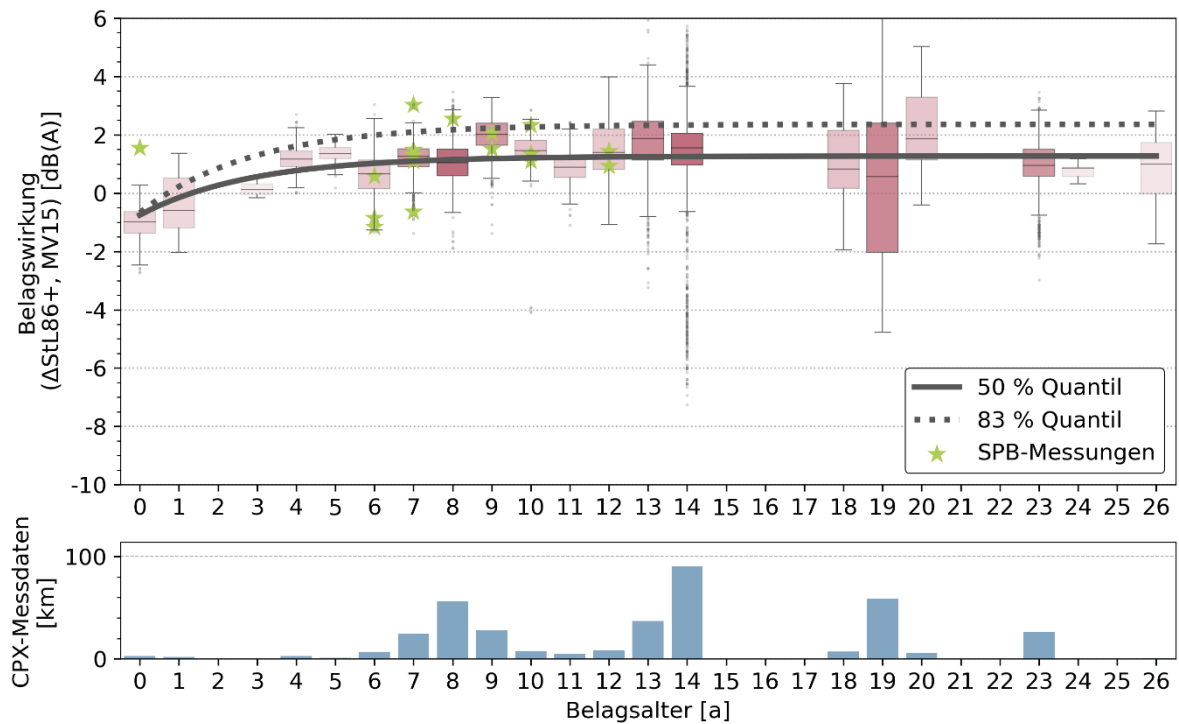
ACMR8



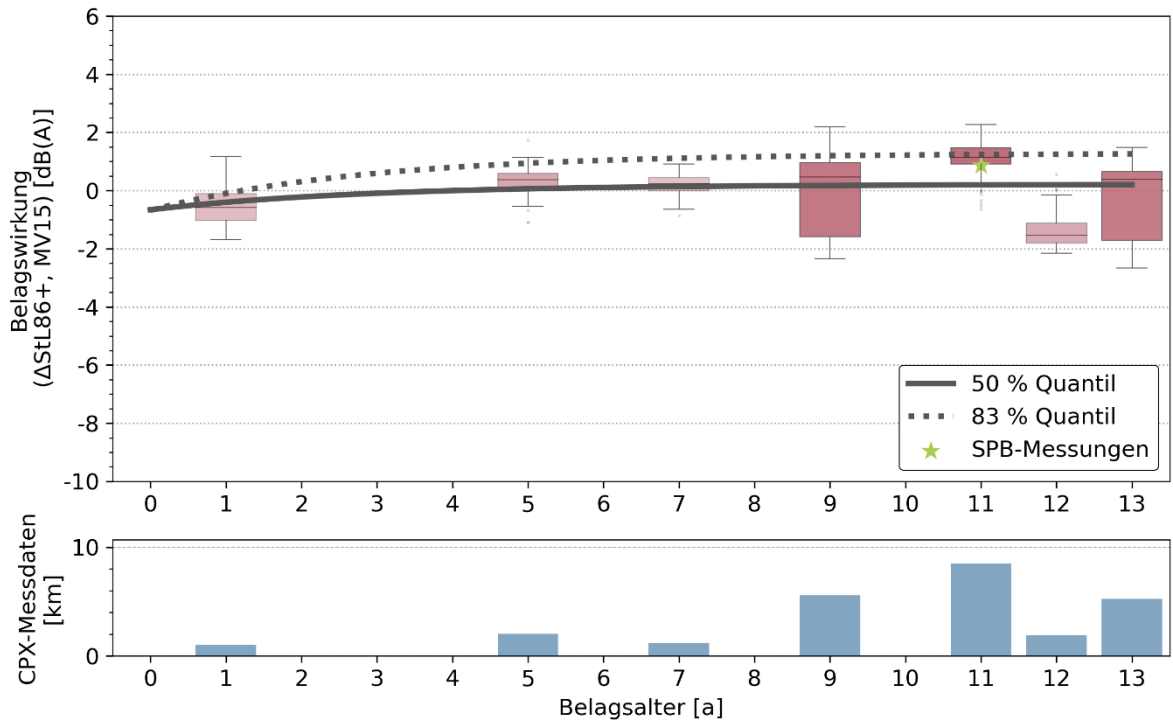
ACMR11



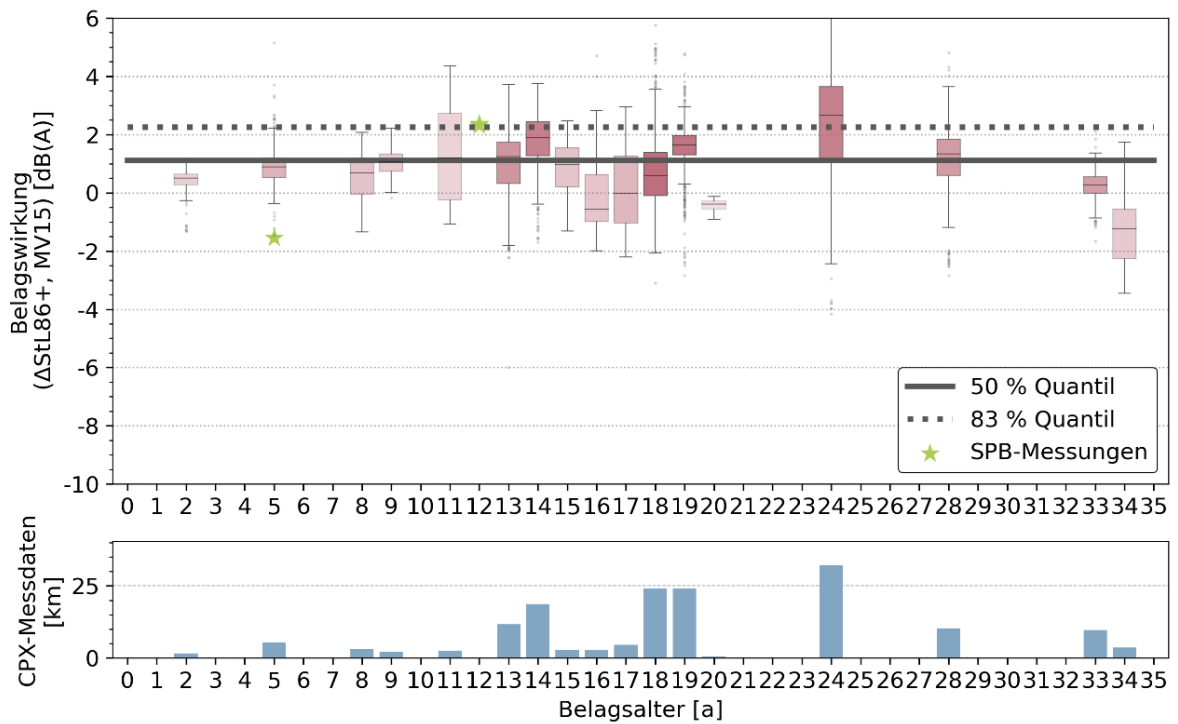
SMA11



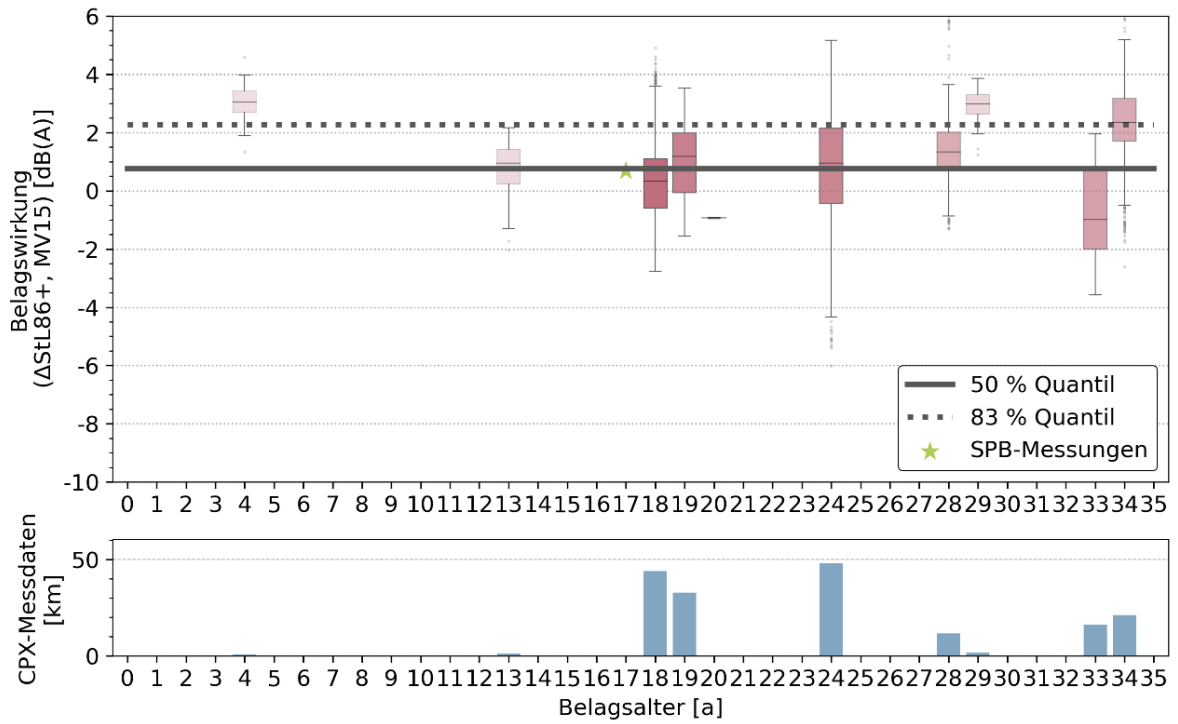
SMA8



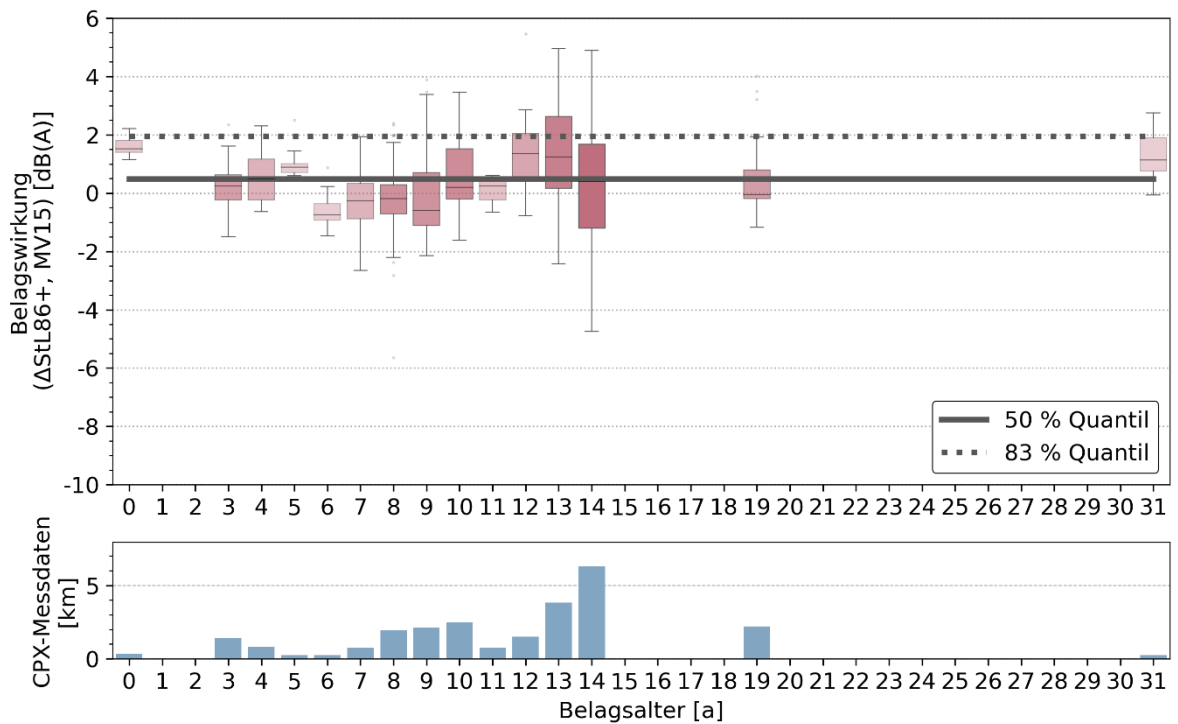
AC11



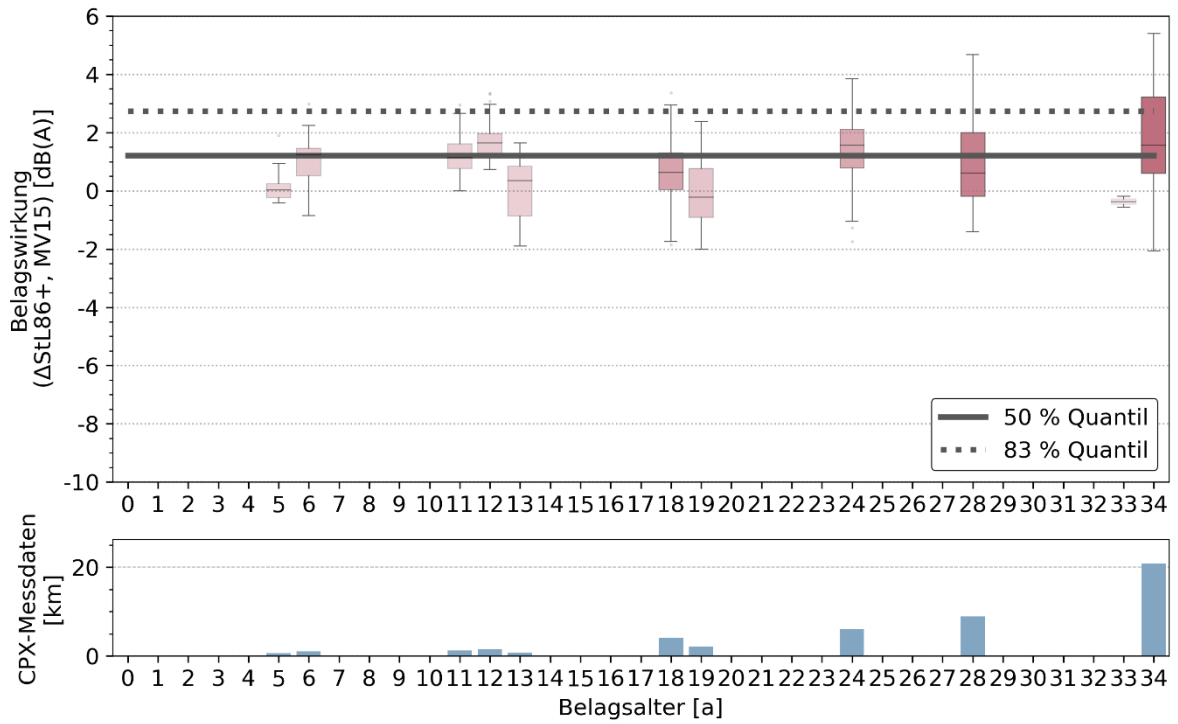
AC16



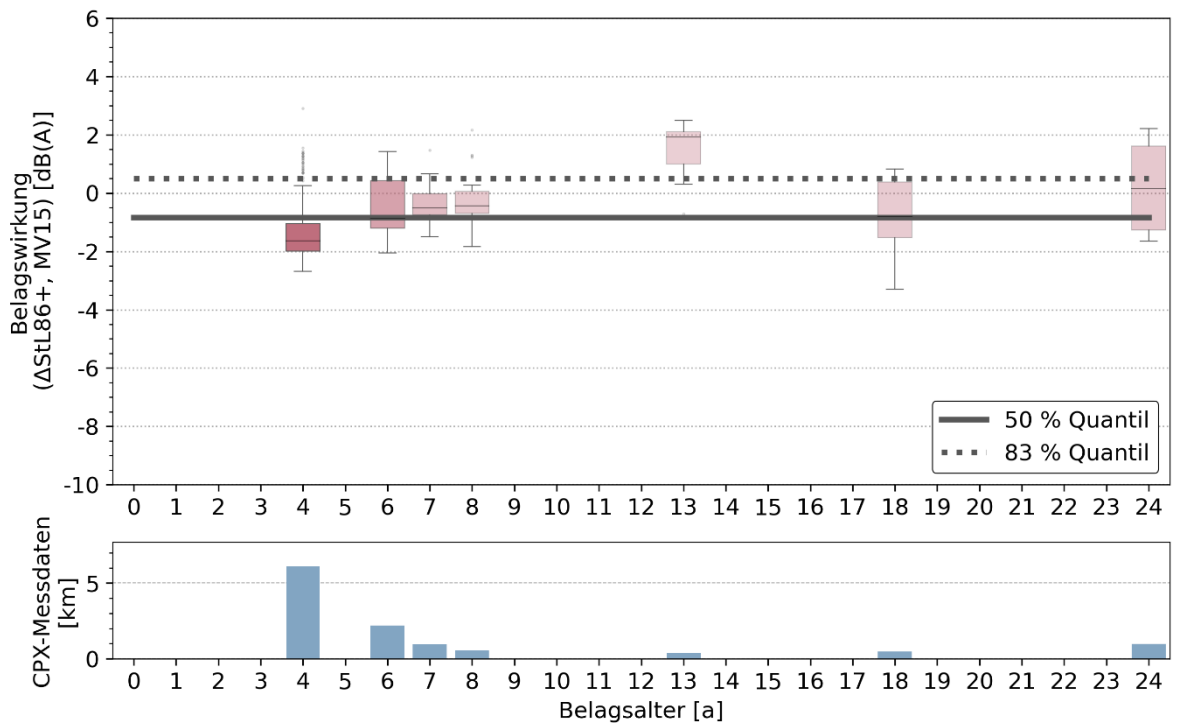
MA11



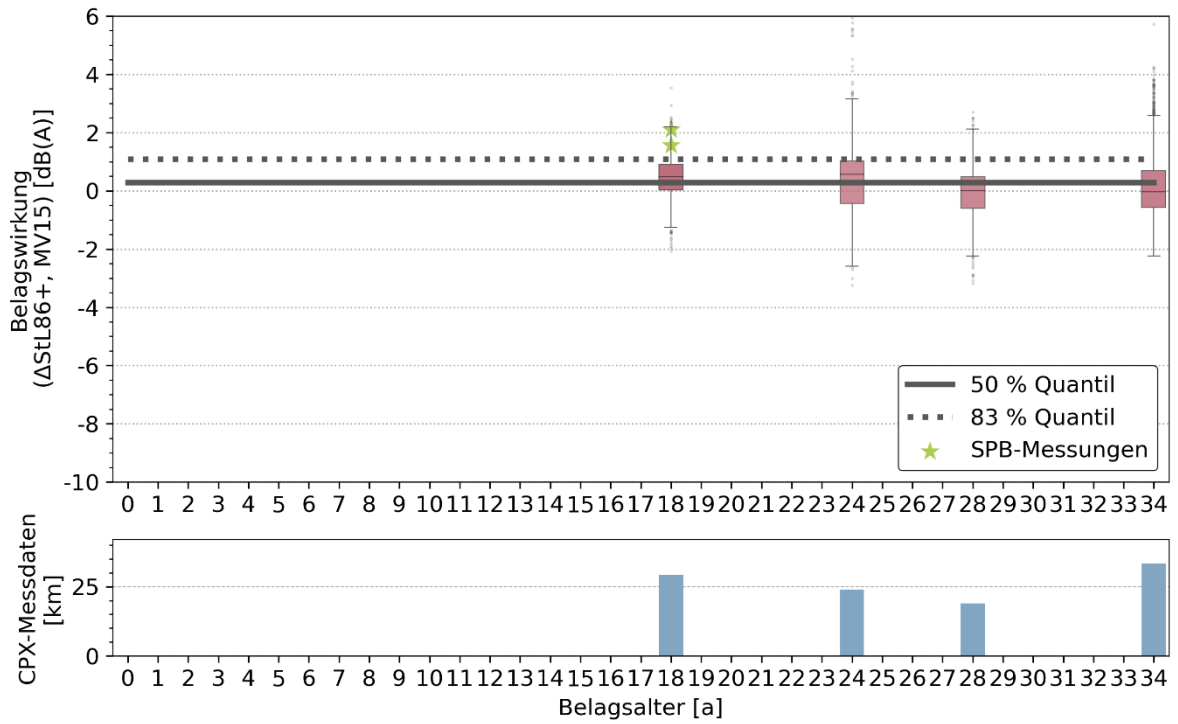
MA16



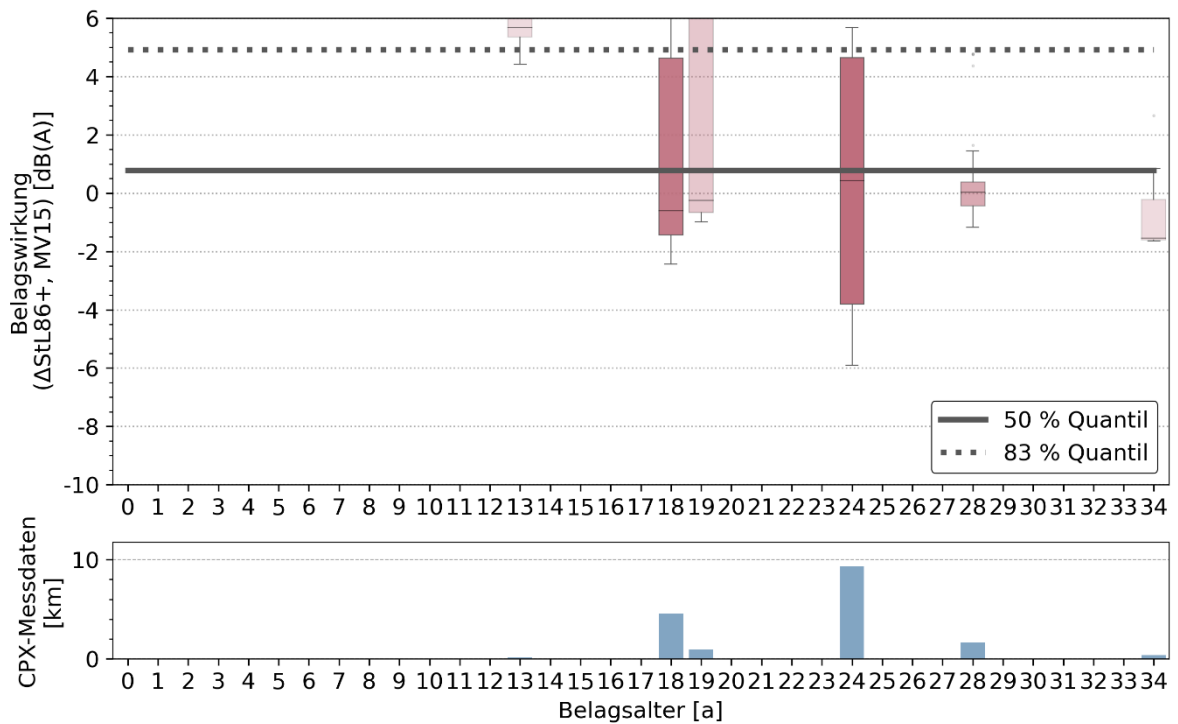
DSAK6



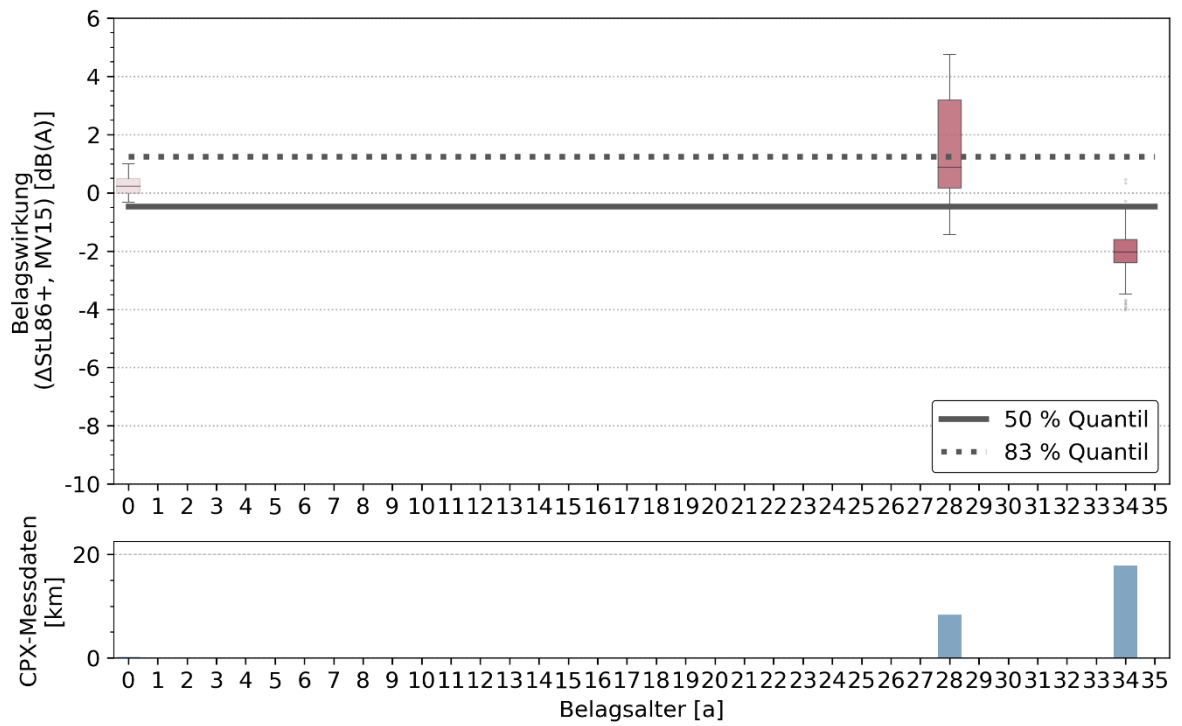
TA16



HRA16



Beton



Anhang 6: Lineare Modelle

OLS Regression Results

```

=====
Dep. Variable:          MV15      R-squared:                0.241
Model:                 OLS      Adj. R-squared:           0.240
Method:                Least Squares  F-statistic:              5167.
Date:                  Thu, 28 Sep 2023  Prob (F-statistic):      0.00
Time:                  11:52:07    Log-Likelihood:          -62722.
No. Observations:     48949      AIC:                     1.255e+05
Df Residuals:         48945      BIC:                     1.255e+05
Df Model:              3
Covariance Type:      nonrobust
=====

```

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
Intercept	1.388e-17	0.004	3.52e-15	1.000	-0.008	0.008
Belagsalter	0.5060	0.004	123.578	0.000	0.498	0.514
DTV leichte Fz	0.0559	0.006	9.949	0.000	0.045	0.067
DTV schwere Fz	0.0760	0.006	13.796	0.000	0.065	0.087

Abbildung 28: Lineares Regressionsmodell der Belagswirkung mit den Variablen *Belagsalter*, *DTV leichte Fahrzeuge* und *DTV schwere Fahrzeuge*.

OLS Regression Results

```

=====
Dep. Variable:          MV15      R-squared:                0.443
Model:                 OLS      Adj. R-squared:           0.422
Method:                Least Squares  F-statistic:              21.12
Date:                  Tue, 23 May 2023  Prob (F-statistic):      1.25e-36
Time:                  12:40:38    Log-Likelihood:          -404.30
No. Observations:     359      AIC:                     836.6
Df Residuals:         345      BIC:                     891.0
Df Model:              13
Covariance Type:      nonrobust
=====

```

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
Intercept	-5.031e-17	0.040	-1.25e-15	1.000	-0.079	0.079
VerdGrad	-0.2218	0.090	-2.456	0.015	-0.399	-0.044
BKHR	-0.4526	0.168	-2.686	0.008	-0.784	-0.121
Schichtdicke	-0.0311	0.050	-0.620	0.536	-0.130	0.068
Sieb_0063	-0.3014	0.173	-1.744	0.082	-0.641	0.039
Sieb_05	-0.4462	0.297	-1.504	0.134	-1.030	0.137
sieb_1	0.6587	0.479	1.375	0.170	-0.284	1.601
Sieb_2	0.1552	0.355	0.437	0.662	-0.543	0.853
Sieb_4	0.0998	0.097	1.029	0.304	-0.091	0.291
Sieb_8	-0.0846	0.059	-1.427	0.155	-0.201	0.032
Löslicher Anteil Bindemittel	0.0092	0.057	0.163	0.871	-0.102	0.121
Mischguttemperatur	-0.0350	0.052	-0.678	0.498	-0.136	0.066
Stabilität	0.0230	0.095	0.241	0.810	-0.165	0.211

Abbildung 29: Lineares Regressionsmodell der Belagswirkung nach unterschiedlichen Bauparametern.