



Präzisierung Ausführungsbestimmungen Akustik SDA-Beläge 2022 Auswertung Bauparameter & Akustik

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bundesamt für Strassen (ASTRA), Kanton Aargau,
Kanton St. Gallen
A6142
14. Februar 2023

14. Februar 2023

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).
- Bundesamt für Strassen ASTRA
- Abteilung Tiefbau Kanton Aargau (ATB)
- Kanton St. Gallen, Tiefbaumt

Begleitung:

- Simon Steiner (BAFU)
- Fabian Traber (ASTRA)
- Michael Strickler (ATB, Kt. Aargau)
- Sam Lanners (Kt. St. Gallen)

Auftragnehmer:

Grolimund + Partner AG, 3006 Bern

Hinweis: Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag der Auftraggeber verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Projektteam

Felix Schlatter
Daniel Schweizer
Erik Bühlmann

Version	Datum	Autoren	Beschrieb	Verteiler
V 1.0	03.05.2022	Felix Schlatter	Entwurf	
V 2.0	12.07.2022	Felix Schlatter	Überarbeitete Version	BAFU/ASTRA/Kt. AG / Kt. SG
V 3.0	14.02.2023	Felix Schlatter	Schlussversion	BAFU/ASTRA/Kt. AG / Kt. SG

A6142_PräzisierungAusführungsbestimmungenSDA_V3.docx

14. Februar 2023

Zusammenfassung

Im Rahmen der Studie *Präzisierung Ausführungsbestimmungen Akustik SDA-Beläge* wurde von der breiten Praxiserfahrung über den Einbau von lärmarmen Deckschichten profitiert und die Einbauparameter von Semi-dichten Asphalten (SDA-Beläge) präzisiert, um möglichst funktionierende Beläge erwarten zu können. In der aktuell gültigen Regel zu den SDA-Belägen (VSS 40 436:2019/SNR 640 436:2015) [1], [2] ist eine sehr breite Palette an Mischungen möglich, und gleichwohl kann das Gemisch als SDA-Belag bezeichnet werden.

Die Datenauswertung zeigt, dass die Bauparameter einen entscheidenden Einfluss auf die akustische Belagsgüte aufweisen. Dabei ist das Zusammenspiel der einzelnen Parameter wichtig. Neben den bekannten, wichtigen Einbauparameter wie zum Beispiel der Marshall-Hohlraumgehalt oder die Korngrößenverteilung (Füller- & Sandgehalt) zeigt sich, dass auch die Verdichtung sehr entscheidend ist. Auswertungen zum Akustik-Faktor zeigen, dass dieser speziell bei SDA4-12 Belägen kaum eingehalten werden konnte.

Die Datenanalysen zeigen des Weiteren, dass die bisherige Praxis des Akustik-Faktors für 4er Beläge (Verhältnis 2:1 Füller-Sand < 41.1 für 4er-Beläge) für generell gute Bedingungen sorgen. Allerdings ist die Einhaltung dieses Akustik-Faktors mit der klassischen SDA4-12-Rezeptur, aufgrund der Einschränkung im Marshall-Hohlraumgehalt kaum zu erreichen. Dies verdeutlicht auch, dass ab einem Marshall-Hohlraumgehalt von 13% die Wahrscheinlichkeit für einen akustisch gut funktionierenden Belag in der Regel steigt. Bei höheren Akustik-Faktoren gibt es aber gleichwohl einen erweiterten Bereich, der vielversprechende Belagsrezepturen ermöglicht. Dabei ist allerdings die gesamte Siebkurve und insbesondere die Feinanteile zu berücksichtigen.

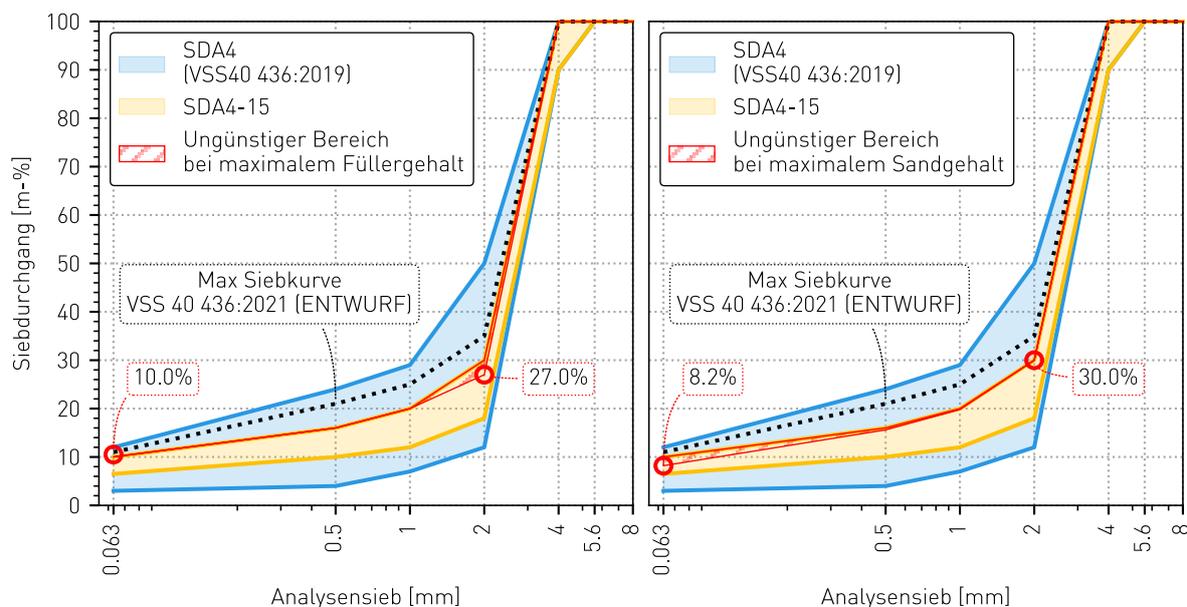


Abbildung 0-1: Optimale Siebkurven für 4er Beläge inklusive Darstellung des ungünstigen Bereiches (rot schraffierte Flächen). Dabei soll ein Marshall-HR-Gehalt von 13-17% angestrebt werden.

Für SDA4-Beläge zeigt sich, dass der in der Abbildung 0-1 dargestellte Siebkurvenbereich (gelb, SDA4-15) als grösstenteils vielversprechend herausstellte. Dabei gilt es zu beachten, dass gewisse

14. Februar 2023

Kombinationen im Grenzbereich nur bei der Anpassung von anderen Kornfraktionen anzuwenden sind. So sind neben den bekannten Fraktionen Füller (Sieb 0.063mm) und Sand (Sieb 2.0 mm) die Zwischensiebe ebenfalls als entscheidend Einflussgrößen identifiziert worden, welche beachtet werden sollten.

Für SDA8- Beläge zeigt sich ebenfalls, dass die Siebkurven in der aktuellen Norm zu breit gefasst sind. So sollte die optimale Zusammensetzung gemäss Abbildung 0-2 eingehalten werden:

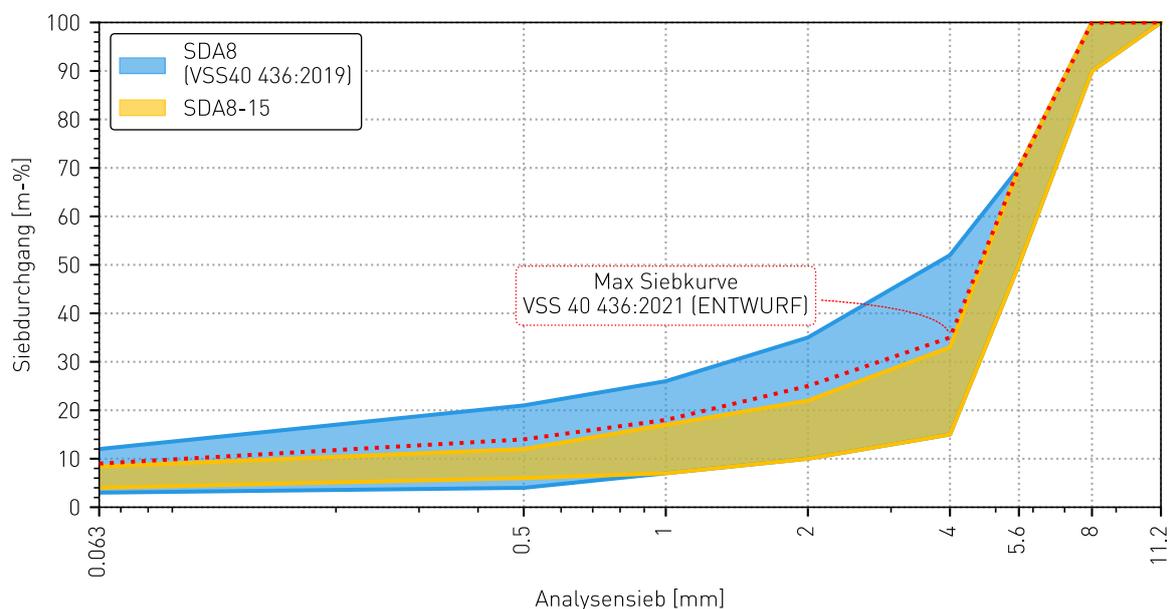


Abbildung 0-2: Optimale Siebkurvenbereiche SDA8-Beläge. Dabei sollte ebenfalls ein Hohlraumbereich von 13- 18% angestrebt werden.

Mit der Anwendung der in dieser Studie präsentierten Siebkurven (*SDA4-15* und *SDA8-15*), welche aus wissenschaftlicher Sicht definiert wurden, ist es möglich das Risiko eines nicht optimal funktionierenden Belages deutlich zu senken.

In Bezug auf die Langzeitwirkung kann gezeigt werden, dass im aktuell möglichen Betrachtungszeitraum von 7 Jahren, hohlraumreiche Schichten (>13 %) insgesamt über bessere Lärmwirkungen erreichen als hohlraumarme Schichten (<13%). Aus akustischer Sicht ist zum jetzigen nicht eindeutig feststellbar, ob hohlraumreiche oder hohlraumarme Schichten in ihrer zweiten Lebenshälfte (7-15 Jahre) bessere akustische Endwerte aufweisen, da die entsprechenden Langzeiterfahrungen noch fehlen. Was sich jedoch zeigt, ist dass die hohlraumreichen Schichten in der Tendenz ihre anfänglich bessere akustische Belagsgüte schneller verlieren als die dichteren Alternativen.

Kombiniert mit weiteren Einschränkungen zu den Siebkurven respektive Verdichtungsgrad könnte so das Risiko eines akustisch unzureichenden Belages deutlich reduziert werden.

14. Februar 2023

Inhalt

Zusammenfassung.....	3
1. Einleitung	6
1.1 Der Kaufprozess von lärmarmen Belägen, oder wieso lärmarme Beläge besser kontrolliert werden müssen	7
1.2 Die «neue» Klasse von lärmarmen Belägen	7
1.3 Ziel.....	9
1.4 Abgrenzung	9
2. Grundlagedaten & Methodik	10
2.1 Datenherkunft	10
2.2 Datenaufbereitung	11
2.3 Beschreibung Grundlagedatensatz	13
2.4 Aktuelle Einbaupraxis.....	14
2.5 Überprüfung Hohlraumstruktur mit der Methode Acoustical Void Content Analysis (AVCA)	17
3. Resultate und Diskussion.....	20
3.1 Identifikation von Bauparametern für akustisch wirksame Beläge.....	20
3.2 Überprüfung Erkenntnisse Studie 2017.....	23
3.3 Optimierung Parameterbereiche SDA-Beläge.....	27
3.4 Klassierung Hohlraumgehalt	37
3.5 Einfluss Einbaupraxis	38
3.6 Ermittlung Grenzbereich (AVCA).....	39
3.7 Akustisch optimale Rezepturen	41
3.8 Präzisierung Grenzbereiche.....	45
4. Variantenstudium Normierung	47
4.1 Kategorisierung SDA-Belägen und Erfolgswahrscheinlichkeiten	47
4.2 Alternative SDA4-14.....	50
5. Einflussfaktoren Langzeitwirkung	52
5.1 Einflussfaktor Höhenlage.....	55
5.2 Einflussfaktor Belastungssituation.....	55
5.3 Mittlere Wirkung	57
6. Auswirkungen der Norm VSS 40 436:2021	58
7. Schlussfolgerungen.....	59
8. Literatur	61
Anhang	
I AVCA-Analysen	62
II Modellierung weiterer Hohlraumgehalte	66

14. Februar 2023

1. Einleitung

Strassenlärm ist in der Schweiz die grösste Quelle für schädliche oder lästige Lärmbelastung. Dabei ist in der Schweiz jede siebte und in der Nacht jede achte Person an ihrem Wohnort von schädlichem oder lästigem Strassenverkehrslärm betroffen [3]. Dabei gibt es gemäss dem schweizerischen Umweltschutzgesetz USG die Anforderung, dass der schädliche oder lästige Lärm möglichst vermieden wird und an der Quelle eingegrenzt wird [4]. Eine mögliche Massnahme für die Eindämmung des Strassenlärms an der Quelle ist seit einigen Jahren die Technologie der sogenannten lärmarmen Beläge. Dabei wurde bereits im Jahr 2003 mit umfassenden Untersuchungen zum Thema lärmarme Beläge im Niedergeschwindigkeitsbereich gestartet [5], [6]. Dabei wurden Untersuchungen mit sogenannten Semi-Dichten Asphalten (AC MR4 und AC MR8 mit erhöhtem Hohlraumgehalt, sowie poröse Asphalte PA) durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass sich dazumal im Innerortsbereich feinkörnigen AC MR Beläge mit erhöhtem Hohlraumgehalt als vielversprechend herausstellten. Durch die positiven Erkenntnisse dieses Projekts wurde im Jahr 2008 das Forschungspaket «lärmarme Beläge innerorts» gestartet. [7]–[9] In diesem Forschungspaket wurde der Grundstein für die Formulierung der heutigen bekannten Semi-Dichte-Asphalte (SDA-Beläge) gelegt [9].

Folglich wurde in der Schweiz seit ca. 2012 vermehrt Lärmschutz mit lärmarmen Belägen (LAB) mit den ebenfalls heutigen Standard-Technologie SDA betrieben. Dabei wird die Technologie der lärmarmen Beläge mittlerweile in praktisch allen Kantonen erfolgreich eingesetzt. Die Erfahrungen der letzten Jahre zeigten jedoch, dass es hinsichtlich der Belagsrezepturen beträchtliche Unterschiede gibt und dass die Anfangswirkung bei frisch eingebauten Belägen deutlich variiert. Praktische Erfahrungen zeigen, dass bei frisch eingebauten SDA die akustische Langzeitleistung um bis zu 4 dB variiert. Dieser Umstand ist in der Abbildung 1-1 dargestellt. Mit den SDA-Rezepturen befindet man sich im semi-dichten Bereich, welcher von den dichten Rezepturen (SMA, ACMR8) bis zu porösen Asphalten (PA) reicht. Folglich kann beim Einbau von SDA-Schichten ein relativ grosser Bereich abgedeckt werden.

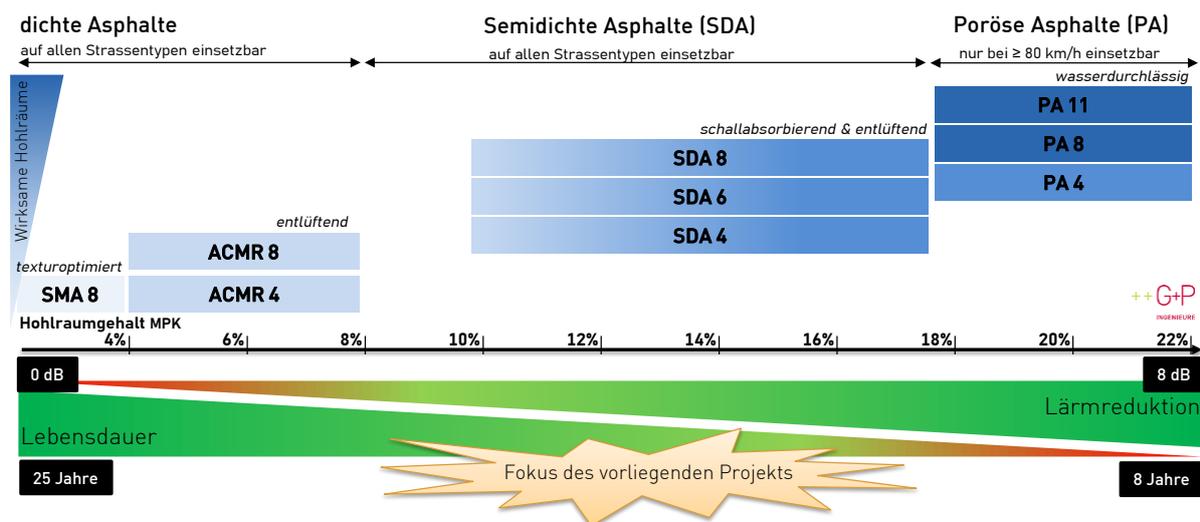


Abbildung 1-1: Bereich der verschiedenen Belagstypen in Bezug auf Akustik, Hohlraumgehalt und Lebensdauer.

Mit dem Einbau der SDA-Beläge deuten die Erfahrungen darauf hin, dass sich die akustische Leistung der Beläge mit der Zeit deutlich verringert, was in der der Abbildung 1-1 reziprok zur Lebensdauer ein-gezeichnet ist.

14. Februar 2023

Ziel der vorliegenden Studie ist, aus den Praxiserfahrungen des letzten Jahrzehnts im Bereich lärmarme Beläge zu profitieren. Bei den Gemeinden, Städten und den Kantonen sind viele bautechnische Untersuchungsdaten über die eingebauten LABs vorhanden. Diese Baudaten wurden für diese Studie mit den akustischen Messdaten von G+P kombiniert und gemeinsam ausgewertet, um die Ausführungsbestimmung Akustik von SDA 4 und SDA 8 weiter präzisieren zu können. Als Ergebnis resultieren konkrete, datenmässig breit abgestützte Normierungsempfehlungen, mit dem Ziel, die Erfolgsquote von dauerhaft akustisch wirksamen SDA zukünftig wesentlich zu erhöhen.

1.1 Der Kaufprozess von lärmarmen Belägen, oder wieso lärmarme Beläge besser kontrolliert werden müssen

Im schweizerischen Umweltschutzgesetz von 1983 wird im 1. Abschnitt zu den Emissionen gefordert, dass Emissionen durch Massnahmen an der Quelle begrenzt werden müssen. Die Strasseneigentümer sind somit gesetzlich verpflichtet, das Lärmproblem ihrer Anlagen zu lösen respektive einzugrenzen. Dabei stellen lärmarme Beläge eine gut geeignete Massnahme an der Quelle dar. In der folgenden Abbildung 1-2 ist dabei ein möglicher Ablauf des Kaufprozesses von lärmarmen Belägen dargestellt.



Abbildung 1-2: Idealisierter Kaufprozess von lärmarmen Belägen (bezogen auf normierte Beläge).

Nach der Feststellung des Lärmproblems werden Anforderungen an die gewünschte Reduktion definiert. Dabei wird gemäss der VSS-Norm *VSS SNR 640 425:2013* [10] jeweils ein Endwert von 3 dB (lärmärmer 4er Belag), als Langzeitwirkung angenommen respektive eingesetzt. Mit der Vergabe an ein Bauunternehmen und dem folgenden Einbau wird die Qualität des Einbaus mittels Qualitätskontrolle, z. B. CPX-Messungen oder Belagsuntersuchungen, bestimmt. Mit dem Einbau sollte das Lärmproblem nun gelöst sein und die Zahlung wird ausgelöst. Bei akustischer nicht Konformität erfolgt in der Regel die Zahlung gleichwohl und der Bauherr muss für einen allfälligen frühzeitigen Ersatz aufkommen.

1.2 Die «neue» Klasse von lärmarmen Belägen

Strassenbeläge lassen sich hauptsächlich durch die Siebkurven charakterisieren, welche die unterschiedlichen Gesteinsfraktionen in einem spezifischen Massenverhältnis zueinander definieren. Mit den

14. Februar 2023

unterschiedlichen Ausfallkörnungen können z. B. unterschiedliche Hohlraumgehalte erreicht werden. In der Abbildung 1-3 sind für verschiedene 8er-Grösstkornbeläge die Siebkurven dargestellt.

Bezüglich des Wirkmechanismus zeigt sich, dass mit den definierten Mischgutkurven ein Bereich von den primär über die Textur wirksamen AC8-Belägen bis hin zum porösen PA-Belag ein breiter Bereich an möglichen Deckschichtentypen definiert ist. Dabei sind die Siebkurven oft relativ genau spezifiziert. Eine Ausnahme stellt dabei die SDA-Norm dar, welche einen sehr breiten Bereich zwischen PA8 (untere Grenze) und sogar höher als ACMR8 (obere Grenze) theoretisch erlaubt. In der Abbildung 1-3 zeigt sich dementsprechend auch eine breitere Überlagerung indem sich die gelbe SDA8-Kurve mit der grünen PA8 Kurve überlagert und somit deckungsgleich ist.

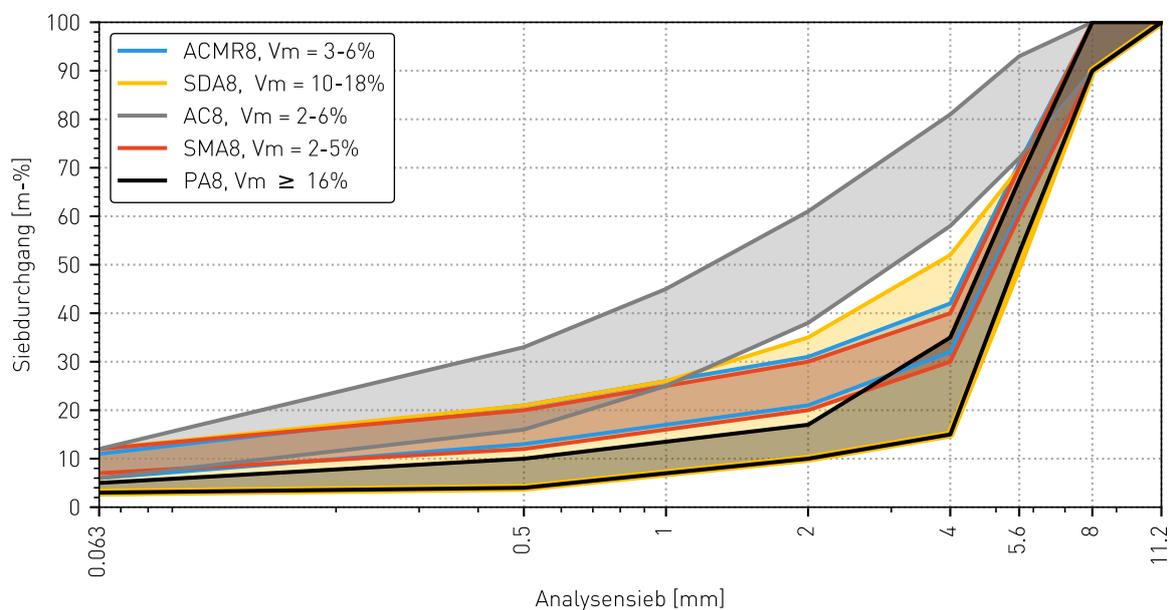


Abbildung 1-3: Normierte Siebkurvenbereiche von typischen 8er Belägen.

Bei den 4er Belägen in der Abbildung 1-4 zeigt sich ebenfalls, dass für 4er Beläge ein sehr grosser Bereich an verschiedenen Mischgutkurven erlaubt ist.

14. Februar 2023

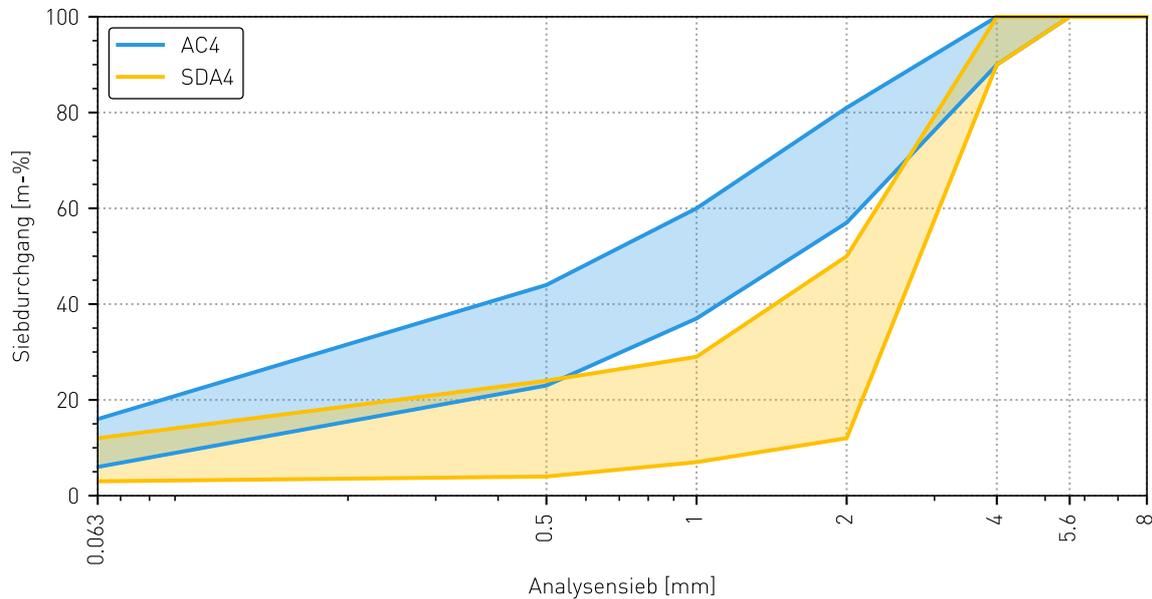


Abbildung 1-4: Normierte Siebkurvenbereiche von 4er-Belägen (SDA und AC4)

1.3 Ziel

Das Ziel dieser Untersuchung kann folgendermassen zusammengefasst werden:

- Innerhalb des Semi-Dichten Bereichs sollen Beläge bautechnisch beschreiben werden, welche eine klar definierte Lärmwirkung erzielen sollen. Dabei soll neben dem Einbauzustand auch die Langzeitwirkung optimiert werden.
- Die Studie aus dem Jahr 2017 soll mit dieser neuen Studie überarbeitet werden.
- Die Einflussfaktoren für die akustische Alterung sollen näher betrachtet werden.
- Die Vorteile des Belagstyps SDA4-14 und SDA8-14 sollen eruiert werden.

1.4 Abgrenzung

Die bisherige Erfahrung mit dem Einbau lärmarmen Beläge hat deutlich gezeigt, dass die akustische Leistung von verschiedenen Faktoren abhängig ist. Da es sich im vorliegenden Fall um (teilweise) poröse Beläge handelt, spielt die Aktivität und die Zugänglichkeit dieser Poren eine äusserst wichtige Rolle. Die Zugänglichkeit dieser Poren wird allerdings durch den Eintrag von Fremdmaterial (Schmutz) allmählich verringert, was zu einer Abnahme der Leistungsfähigkeit der Beläge führt. Im vorliegenden Projekt wird die Verschmutzung und der damit verbundenen verminderten Leistungsfähigkeit nicht näher betrachtet, da es sich dabei um ein eigenständiges Projekt handelt.

Ebenso wird in diesem Projekt versucht, die akustische Leistungsfähigkeit der Beläge im Neuzustand zu optimieren, sodass die Erfolgswahrscheinlichkeit für einen funktionierenden Belag steigt. Es wird dabei ebenfalls versucht, die Langzeitfolgen dieser optimierten Beläge abzuschätzen, was sich aber aufgrund der eher dünnen Datengrundlage bei Belägen mit hohem Alter als eher schwierig herausstellte, da für eine grundlegende statistische Analyse eine Vielzahl von Faktoren mitberücksichtigt werden müssen, was eigentlich bedingt, dass die Datengrundlage entsprechend gross und breit gefächert ist.

14. Februar 2023

2. Grundlagedaten & Methodik

Die grundlegende Idee der Studie ist es, die vorhandenen bautechnischen Belagsuntersuchungen mit den akustischen Belagsmessungen zu verbinden. Bautechnische Belagsuntersuchungen werden zur Qualitätskontrolle von neu eingebauten Deckschichten, aber auch zur Belagsabnahme durchgeführt. Die akustischen Belagsmessungen werden ebenfalls zur Qualitätskontrolle nach Belagseinbau durchgeführt. Des Weiteren wird in vielen Fällen die akustische Wirkung der eingebauten Beläge jährlich gemessen, um die Lärmentwicklung über die Zeit verfolgen zu können. Dazu waren neben der CPX-Datenbank von Grolimund + Partner auch die Bauparameter-Untersuchungen der Strasseneigentümer notwendig. Für die Beschaffung der Bauparameter-Daten wurden beim Start dieser Studie die Strasseneigentümer für Herausgabe der Einbauprotokolle angefragt. In den folgenden Kapiteln werden die Daten sowie deren Herkunft näher beschrieben.

2.1 Datenherkunft

CPX-Daten sind grundsätzlich für alle in dieser Studie betrachteten Beläge von Voraussetzung. Dabei sind Daten mit möglichst langen Zeitreihen von Vorteil. Zu den CPX-Daten sind für die Berücksichtigung im Gesamtdatensatz auch georeferenzierte Belagsuntersuchungen nötig. In der Abbildung 2-1 sind die Anzahl an 4er-Belägen pro Kanton dargestellt. Grundsätzlich ist aus dem Kanton Aargau die grösste Datengrundlage mit 70 verschiedenen Belägen vorhanden.

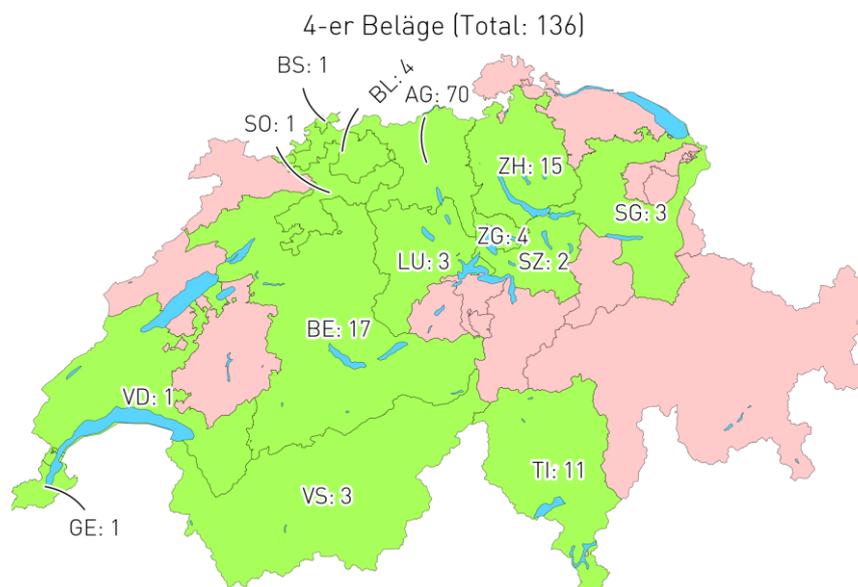


Abbildung 2-1: Verteilung der erfassten (mit Mischgut & Bohrkerninformationen) 4er-Grösstkorn-Beläge. Insgesamt konnten für 4er Beläge 136 vollständige Paare an Belagsparameter & CPX-Messungen vor.

Bei den 8er-Grösstkornbelägen ist die Verteilung ähnlich, wobei der Kanton St. Gallen hinter dem Kanton Aargau die zweitgrösste Anzahl an verwertbaren und kompletten Datenpaaren (CPX-Messungen und bautechnische Untersuchungen) aufweist. Die Verteilung ist in der Abbildung 2-2 abgebildet.

14. Februar 2023

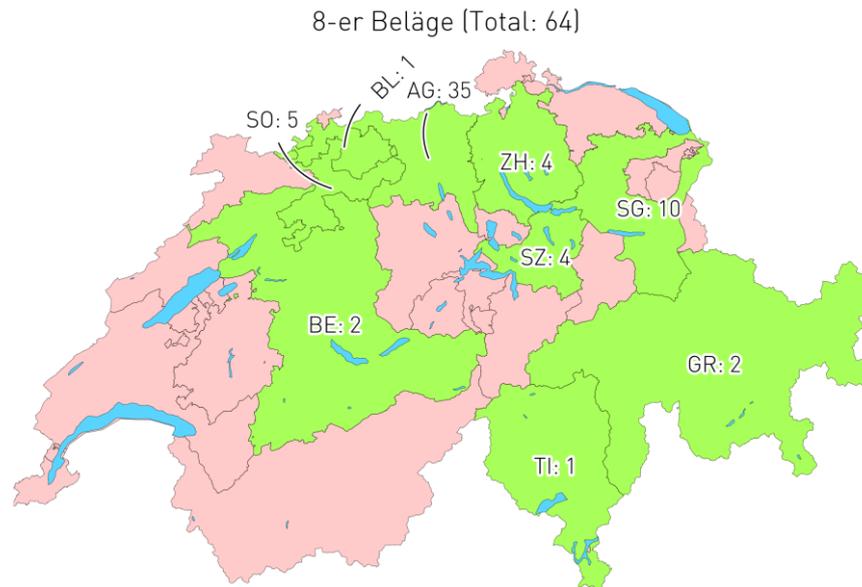


Abbildung 2-2: Verteilung der erfassten (mit Mischgut & Bohrkerninformationen) 8er Grösstkorn-Beläge. Insgesamt konnten für 64 SDA8-Rezepturen detaillierte Belagsparameter erfasst werden.

2.2 Datenaufbereitung

Diese Studie hatte zum Ziel, die erfassten Bauparameter (Bohrkern- und Mischgutdaten) möglichst genau zu erfassen und gleichzeitig auch exakt zu verorten, also zu geolokalisieren. Da nicht alle Einbauprotokolle einheitlich – geschweige denn digital – vorlagen, mussten die einzelnen Protokolle manuell digitalisiert und geolokalisiert werden.

Die Mischgutuntersuchungen wurden jeweils als Flächenelement (Polygone) erfasst, da sie jeweils für einen grösseren Strassenbauabschnitt galten. Die genaue Abgrenzung der verwendeten Mischgüter war jedoch häufig sehr schwierig, da aus den Protokollen meist keine detaillierten Angaben vorhanden waren.

Die Bohrkernentnahmen stellen klassische Punktdaten dar und wurden somit als Punkte erfasst. Auch hier waren die Angaben zur Geolokalisierung zwingend nötig, jedoch häufig besser dokumentiert, wie zum Beispiel in Karten oder mit Kilometrierungsangaben. Nichtsdestotrotz wäre es zukünftig empfehlenswert, bei Probeentnahmen systematisch auch die entsprechenden geographischen Koordinaten miterfassen. Dabei würde sich eine Digitalisierung der Protokolle und das Erfassen in einer Datenbank anbieten.

2.2.1 Homogenisierung Hohlraumgehalt

Für die Bestimmung des Hohlraumgehaltes an den Marshall Prüfkörpern gibt es verschiedene Verfahren: Entweder die Hohlraumbestimmung mittels Tauchwägewerfahren oder die Hohlraumbestimmung mittels Ausmassverfahren. Für hohlraumreiche Beläge ist das Ausmassverfahren präziser, da sich beim Tauchwägewerfahren die Hohlräume zusätzlich mit Wasser füllen können und somit das Messergebnis

14. Februar 2023

verfälschen. Da viele der Mischgutuntersuchungen (insbesondere die älteren Untersuchungen) den Hohlraumgehalt ausschliesslich im Tauchwägeverfahren angegeben haben, musste ein Umrechnungsmodell zwischen den beiden Verfahren ermittelt werden. Zur Berechnung des Modells (siehe Abbildung 2-3) wurden die Daten jener Bohrkerne verwendet, für welche beide Angaben (Tauchwägeverfahren und Ausmassverfahren) vorliegen. Dieses ermittelte Modell wurde in der Datenaufbereitung dann für diejenigen Mischgutuntersuchungen angewendet, für welche die Hohlraumgehaltsbestimmung nur mit dem Tauchwägeverfahren erfolgte.

Es ist deutlich erkennbar, dass die beiden Verfahren für 4er und 8er Beläge einem linearen Trend folgen. Dabei ergibt sich jedoch ein etwas anderes Modell, als dies im Bericht *Ausführungsbestimmung Akustik* [11] präsentiert wurde. Damals standen allerdings weniger Daten für die Modellbildung zur Verfügung. Es zeigt sich nun, dass die Umrechnung für 4er und 8er Beläge unterschiedlich verläuft. Bei 8er Belägen beträgt die Differenz zwischen den Verfahren ca. 3 %, während sie sich bei 4er Belägen zwischen 2.1 und 2.5% bei einem Tauchwiegeanteil von 12% respektive 16% beträgt.

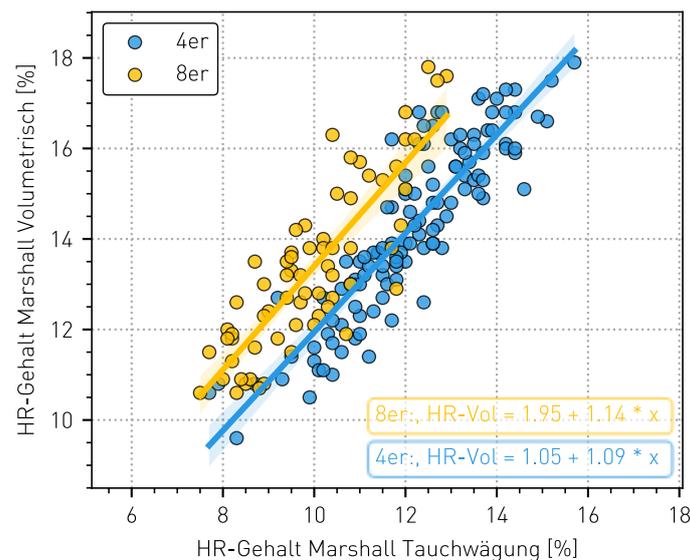


Abbildung 2-3: Umrechnung Tauchwägeverfahren zu Ausmassverfahren für 4er und 8er Beläge.

2.2.2 Klassierung Beläge

Im *Leitfaden Strassenlärm* [12] wird für Sanierungsmassnahmen die Option lärmarme Beläge als sehr kosteneffizient dargestellt. Es ist unbestritten, dass die Leistung von lärmarmen Belägen in den ersten Jahren sehr gut ist. Es hat sich jedoch auch gezeigt, dass nicht alle Beläge gleich von Beginn weg ihre volle Wirkung entfalten können. Um die lärmarmen Deckschichten zu kategorisieren und deren Wirkung zu erfassen, ist in der VSS SNR 640 425:2013 [10] eine Tabelle mit verschiedenen Lärmreduzierungskategorien abgebildet. Diese Tabelle ist in der Folge dargestellt.

14. Februar 2023

Tabelle 2-1: Kategorisierung von Belägen entlang ihrer erhofften Pegeländerung gemäss VSS SNR 640 425:2013 [10].
Diese Angaben beziehen sich auf die Pegeländerung in Abweichung zum Referenzmodell StL-86+.

Kategorie	Stand der Technik	Pegeländerung nach Einbau	Pegeländerung nach 5 Jahren	Pegeländerung am Ende der Lebensdauer
[dB]				
III	Vision	-9	-4	-3
II	Erfolgsversprechend	-6	-3	-2
I	Bewährt	-3	-1.5	-1

In der Schweiz werden seit 2013 grossflächig lärmarme Deckschichten eingebaut und intensiv wissenschaftlich begleitet. Entsprechend bedeutet dies, dass die ältesten verfügbaren Deckschichten mit Langzeitinformationen zum Zeitpunkt dieses Projektes nur gerade acht Jahre alt sind und das Ende ihrer Lebensdauer noch nicht erreicht haben. Eine Aussage über eine Pegeländerung am Ende der Lebensdauer kann deshalb vielfach noch nicht gemacht werden.

2.3 Beschreibung Grundlagendatensatz

Im Rahmen der Studie wurde eine Datenbank angelegt, welche bis zum Projektende (Frühling 2022) insgesamt 1327 einzelne Bohrkerne und 775 Mischgutuntersuchungen enthält. Diese teilen sich auf 136 4er- und 64 8er-Beläge mit insgesamt 737 CPX-Messungen auf.

2.3.1 Akustische Signatur der Beläge

Semidichte 4er und 8er Beläge zeichnen sich im Neuzustand durch eine deutliche Reduktion der wahrgenommenen Schallenergie aus. In Abbildung 2-4 wird die spektrale Wirkungsweise dieser beiden Belagstypen verdeutlicht. Im Neuzustand (0-Jahre, blau) lässt sich erkennen, dass die Peak-Frequenz im besten Fall bei 500 Hz zu liegen kommt. Mit zunehmendem Alter der Beläge (3 Jahre (grün) und 5 Jahre (blau)) folgt vor allem bei den 4er Belägen eine Verschiebung in den mittel- bis hochfrequenten Frequenzbändern. Ganz deutlich sichtbar ist die Verschiebung in den Terzbändern 800 und 1000 Hz.

14. Februar 2023

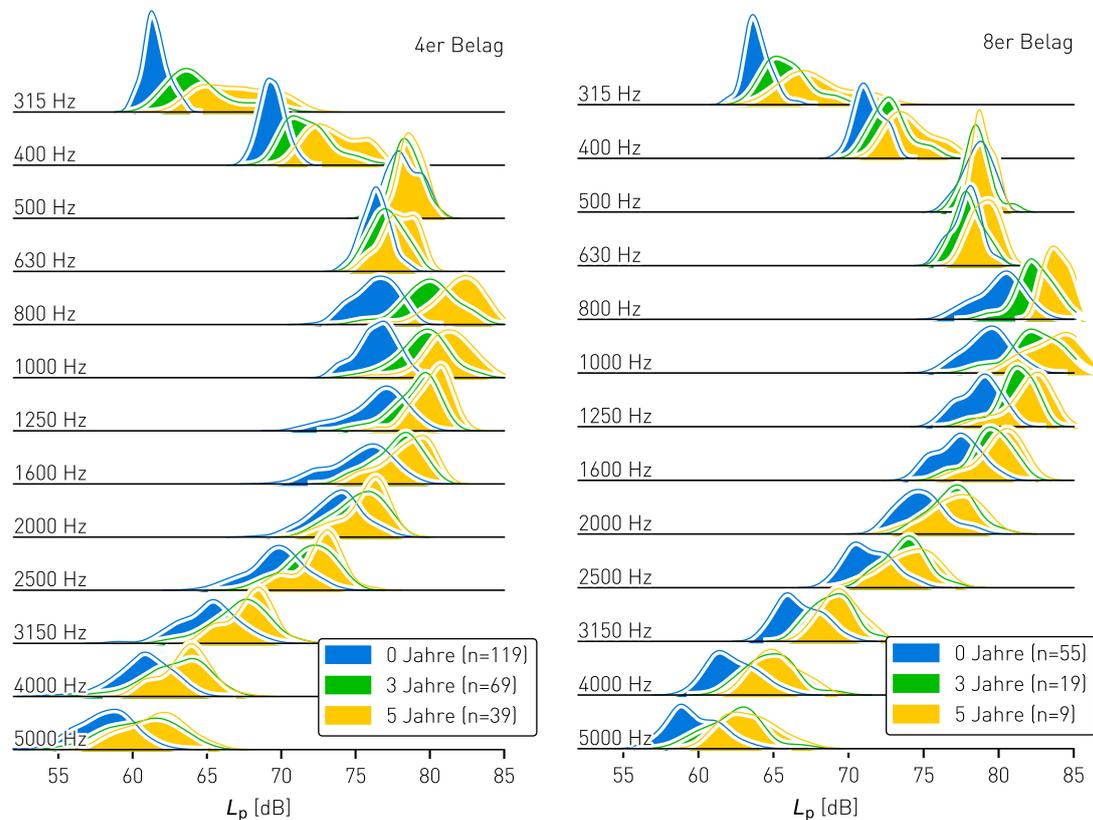


Abbildung 2-4: Spektrale Verteilung der gemessenen CPX-Pegel für den PKW-Pneu für verschiedene Belagsalter (0, 3 und 5 Jahre)

2.4 Aktuelle Einbaupraxis

Die ausführliche Datensammlung machte es möglich, die Einbaupraxis der lärmarmen Beläge näher zu untersuchen.

2.4.1 4er Beläge

In Abbildung 2-5 sind die mittleren Mischgutkurven der 4er-Beläge für verschiedene Subtypen (SDA4-12, SDA4-14 und SDA4-16) dargestellt. Die Kurven wurden jeweils mit einer Standardabweichung (schattierter Bereich) dargestellt. Wie bereits aus der Grafik ersichtlich ist, wird ein Grossteil der aktuellen Normkurve (schwarz-gestrichelt) in diesem Bereich gar nicht verwendet. Ebenfalls ist sehr gut ersichtlich, wie die unterschiedlichen Siebkurven mit ihrer Ausfallkörnung zu unterschiedlichen Hohlraumgehalten führen.

14. Februar 2023

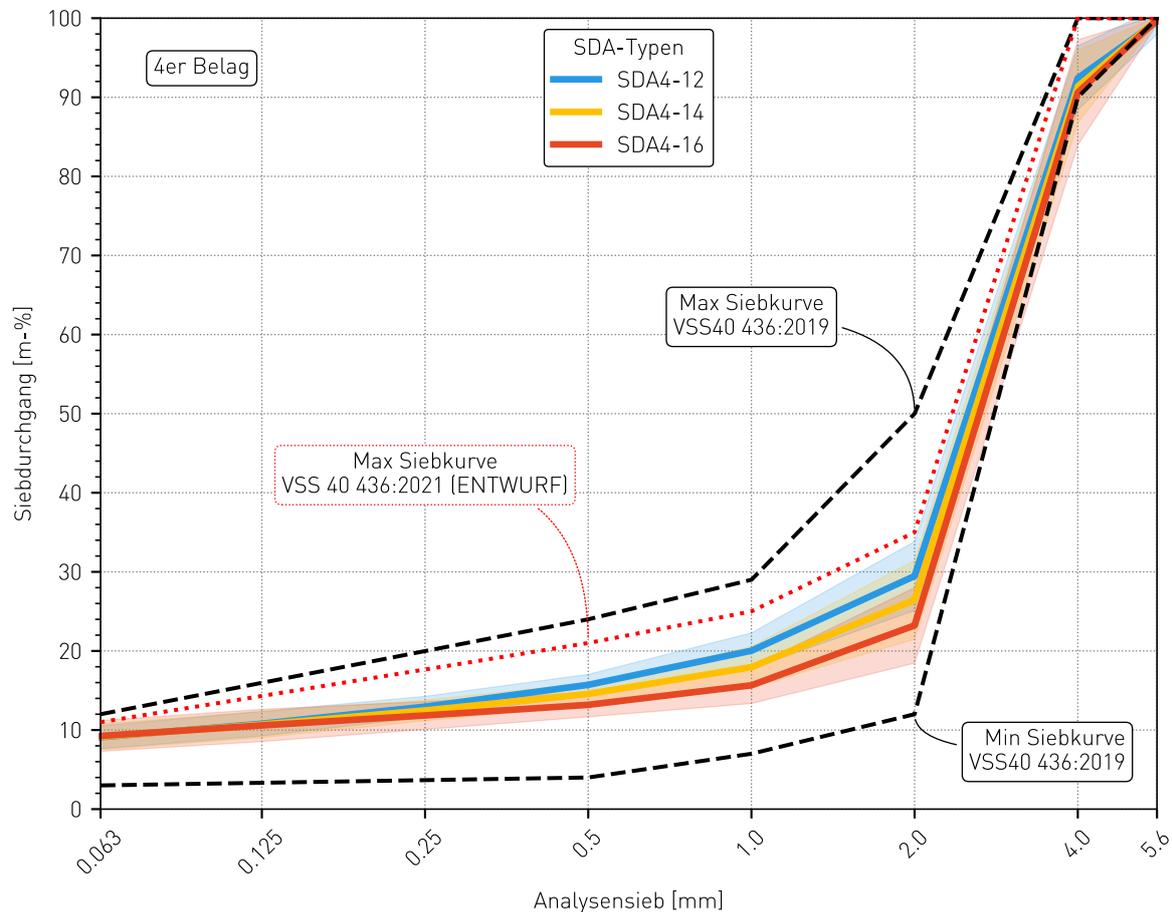


Abbildung 2-5: Siebkurvenverlauf der verschiedenen SDA4-Varianten, wie sie aktuell eingebaut werden.

Die Tabelle 2-2 listet die Mittelwerte der Analysesiebe inklusive Standardabweichung auf. Dabei zeigt sich wie schon bereits in der Abbildung 2-5, dass der grösste Diskriminator bei den Analysesieben zwischen 0.5 mm und 2.0 mm zu finden ist. Es gilt daher: Je höher der Anteil der Kornfraktion > 0.5 mm, desto höher auch der resultierende Hohlraumgehalt.

Tabelle 2-2: Statistische Kenngrössen der Siebkurven für verschiedene Varianten der 4er Beläge.

	SDA4-12	SDA4-14	SDA4-16	SDA4-12	SDA4-14	SDA4-16
	Mittelwert			Standardabweichung		
Sieb 0.063mm	9.1	9.1	9.3	1.5	1.6	1.9
Sieb 0.5mm	15.7	14.6	13.2	1.3	1.4	1.5
Sieb 1mm	20.0	18.0	15.7	2.2	2.6	2.3
Sieb 2mm	29.5	26.5	23.2	4.4	5.0	4.8
MV 8% [dB]	-5.9	-6.2	-6.4	0.9	0.7	0.7
STLN1TK [dB]	-5.5	-5.8	-5.9	0.9	0.7	0.9

14. Februar 2023

2.4.2 8er Beläge

Für 8er Beläge sind grundsätzlich dieselben Trends erkennbar. Die Abbildung 2-6 zeigt ebenfalls verschiedene SDA8-Typen. Die Unterscheidung zwischen den einzelnen Hohlraumgehalten liegen jedoch etwas näher beieinander als bei den 4er Belägen. Ebenso gibt es neben dem Analysensieb 2.0 mm ebenfalls noch das Analysensieb 4.0 mm, welches zumindest die 16-er Beläge von den anderen beiden Belägen unterscheiden lässt.

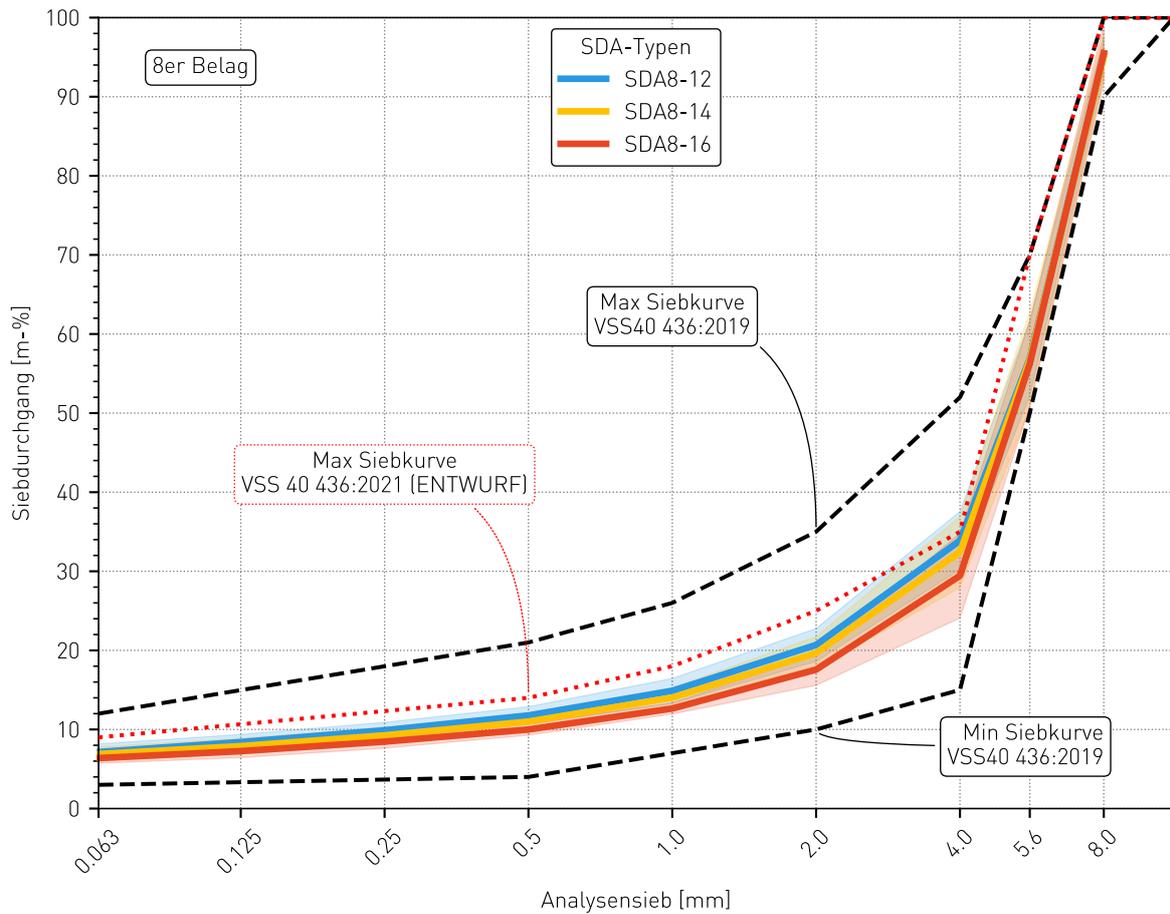


Abbildung 2-6: Siebkurvenverlauf der verschiedenen SDA4-Varianten, wie sie aktuell eingebaut werden.

14. Februar 2023

Tabelle 2-3: Statistische Kenngrößen der Siebkurven für verschiedene Varianten der 8er Beläge. Die linke Hälfte der Tabelle zeigt die Mittelwerte pro Analysensieb, die rechte Hälfte listet die Standardabweichung auf.

	SDA8-12	SDA8-14	SDA8-16	SDA8-12	SDA8-14	SDA8-16
	Mittelwert			Standardabweichung		
Sieb 0.063mm	7.2	6.9	6.4	1.0	0.9	0.7
Sieb 0.5mm	11.8	11.0	10.0	1.1	1.1	0.7
Sieb 1mm	14.9	14.0	12.7	1.6	1.3	0.7
Sieb 2mm	20.7	19.7	17.6	2.1	2.1	2.0
Sieb 4mm	33.9	32.4	29.4	3.7	4.5	5.4
MV 8% [dB]	-4.4	-4.9	-5.2	1.0	1.0	0.9
STLN1TK [dB]	-3.3	-3.8	-4.0	1.1	1.1	1.0

2.5 Überprüfung Hohlraumstruktur mit der Methode Acoustical Void Content Analysis (AVCA)

Um die Hohlraumstruktur der Beläge näher untersuchen zu können, wurden insgesamt 12 Beläge ausgewählt, welche über eine definierte Zusammensetzung zwischen den Parametern Füller (Analysensieb 0.063 mm) und Sand (Analysensieb 2 mm) verfügen. Die untersuchten Beläge sind in Tabelle 2-4 aufgeführt. Wie Abbildung 2-7 zeigt, sind die untersuchten Beläge in der ganzen Schweiz verteilt.

Tabelle 2-4: Auflistung Beläge, für welche ein Bohrkern gezogen wurde.

ID	Standortbezeichnung	Kanton	X	Y	Fahrtrichtung	IMP Nr.	BK Nr
1206	Kaisten-Laufenburg, Baslerstrasse, SDA4-12 2019	AG	2'646'117	1'267'317	Süd-West	21-13016	1
1210	Wegenstetten-Schupfart, K296, SDA4-12 2019	AG	2'637'414	1'261'180	West	21-13017	2
872	Leuggern, Baslerstrasse, SDA8-12 2018	AG	2'658'972	1'270'041	Ost	21-13018	3
1204	Ammerswil IO, K376, SDA4-12 2019	AG	2'657'870	1'246'781	Nord-Ost	21-13019	4
878	Holderbank, Bruggerstrasse, SDA4-12 2018	AG	2'654'908	1'253'861	Nord	21-13020	5
873	Mooslerau, Attelwilerstrasse, SDA4-12 2018	AG	2'646'947	1'235'340	Süd-West	21-13021	6
941	Latterbachl, Hauptstrasse, SDA4 2018 (ost)	BE	2'610'825	1'168'204	Nord-Ost	21-13463	7
909	Bern, Weissensteinstrasse, SDA4 2018	BE	2'598'105	1'198'992	West	21-13464	8
910	Bern, Tiefenaustrasse, SDA4-12 2018	BE	2'600'563	1'202'199	Süd-West	21-13465	9
1496	Freienbach, Seestrasse, SDA 4-14 2020	SZ	2'700'380	1'228'965	Ost	21-13466	10
988	Oetwil an der Limmat, Limmattalstrasse, SDA4-16 2018	ZH	2'671'965	1'253'529	Nord-West	21-13467	11
1294	Goldach, Blumenstrasse, SDA4-12 2019	SG	2'753'218	1'260'436	Nord-Ost	21-13468	12

14. Februar 2023

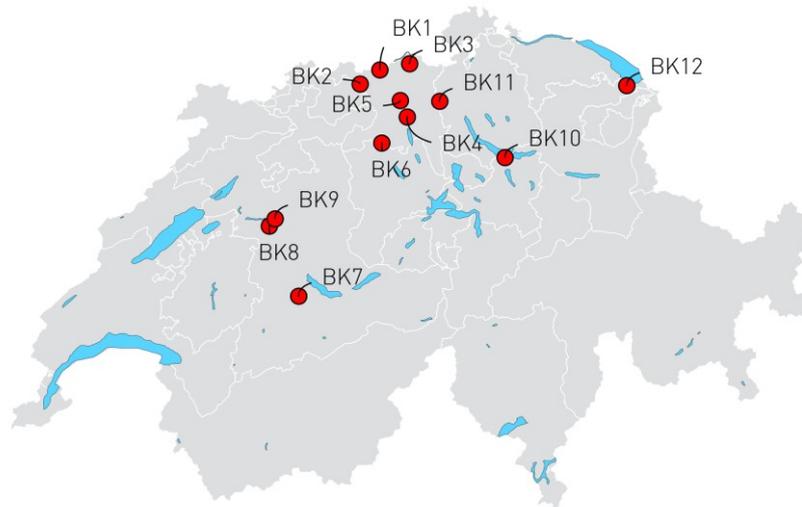


Abbildung 2-7: Verteilung der AVCA-Bohrkerne in der Schweiz.

Die Beläge wurden aufgrund ihrer Zusammensetzung aus dem Analysensieb 2.0 mm (Sand) und 0.063 mm (Füller) ausgewählt. Die Verteilung der Füller- respektive Sandgehalte ist in Abbildung 2-8 dargestellt.

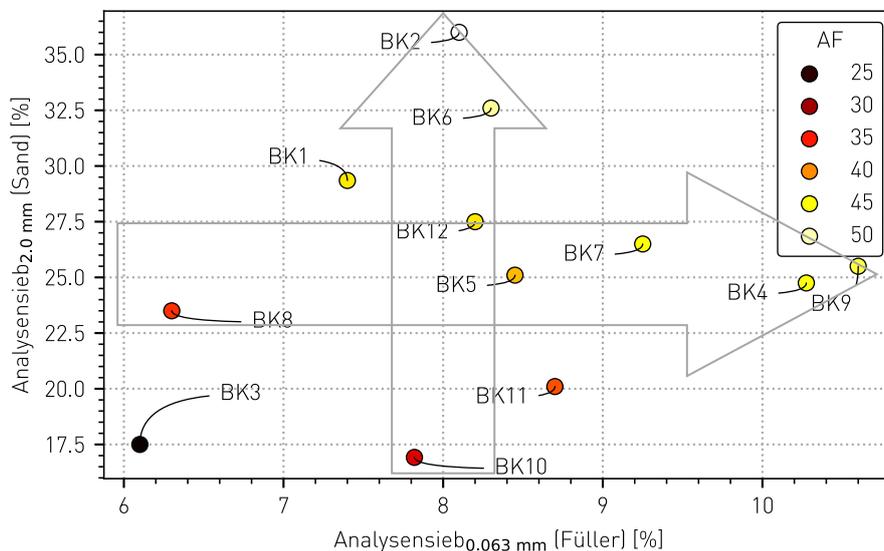


Abbildung 2-8: Illustration AVCA-Beläge mit Füller- & Sandgehalt

Für die Auswahl wurde jeweils eine Komponente möglichst konstant zu halten, während der andere Bestandteil variiert wurde. So wurden zwei Gruppen gebildet: Eine Gruppe mit ungefähr konstantem Sandgehalt von 24 – 28 %, mit jeweils variablem Füllergehalt (6.3– 10.6%). Die andere Gruppe verfügt über einen fixierten Füllergehalt von ca. 8% und einem variablem Sandanteil (16.9 – 36%). Mit diesen beiden Gruppen lässt sich aufzeigen, wie sich die beiden Komponenten Füller und Sand zueinander verhalten.

Diese entnommenen Bohrkern wurden mittels Computer Tomographie (CT) untersucht, aus welchen ein 3D-Modell der Porenstruktur extrahiert wird. Mittels der Auswertung der Porenstruktur hinsichtlich der akustisch wirksamen Poren (Acoustic void content analysis, AVCA) lassen sich nachfolgend Aussagen zu der Wirksamkeit der Hohlräume ermitteln.

14. Februar 2023

3. Resultate und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Resultate der Untersuchung präsentiert.

3.1 Identifikation von Bauparametern für akustisch wirksame Beläge

Um relevante Parameter für die akustische Leistung der Beläge im Neuzustand zu identifizieren, wurde mit den zur Verfügung stehenden Bauparametern für jedes CPX-Terzband eine multivariate Regression durchgeführt. Dabei wurden nur diejenigen Parameter in das Modell aufgenommen, welche signifikant zur Verbesserung des Modells beitragen konnten. Diese Modellierung wurde separat für beide Belagstypen (4er und 8er) durchgeführt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass viele der Parameter miteinander verknüpft sind, und somit die einzelnen Koeffizienten der Modelle nicht direkt interpretierbar sind.

3.1.1 4er Beläge

In der Abbildung 3-1 werden für jedes Terzband (X-Achse) die Parameterwerte des Modells der Bauparameter dargestellt. Falls kein Wert dargestellt wird, ist dieser Parameter nicht signifikant und deshalb nicht in die Modellierung aufgenommen worden.

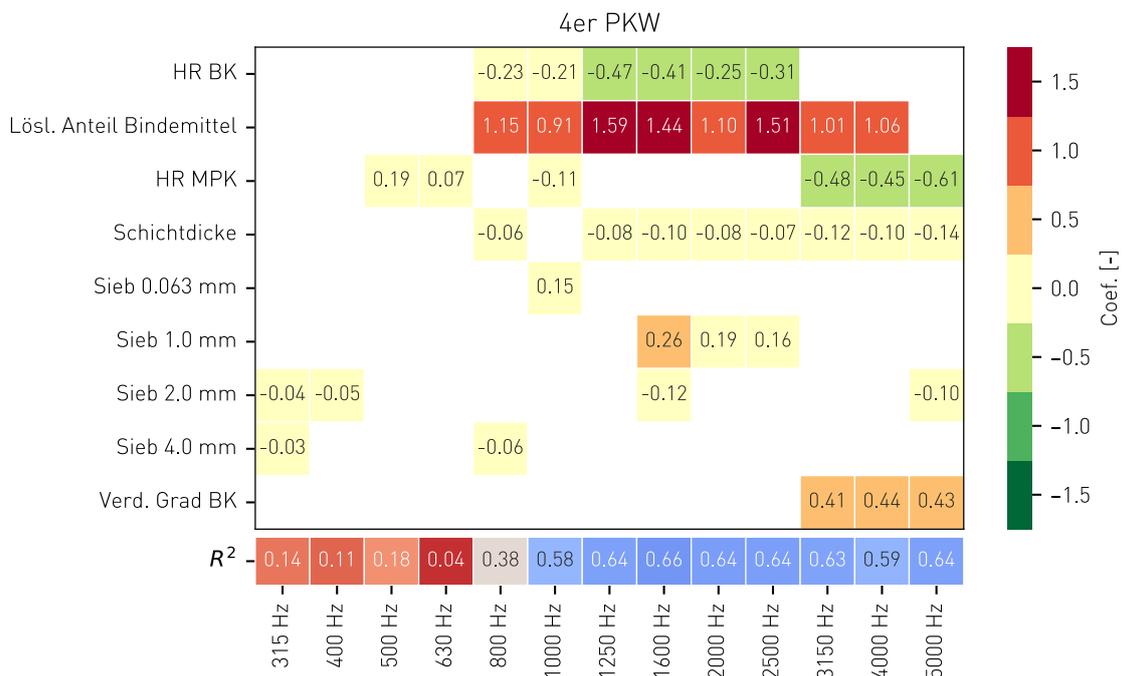


Abbildung 3-1: Lineare, multivariate Modellierung 4er-Beläge für CPX-Frequenzen (315-5000 Hz). Die einzelnen Koeffizienten sind dabei farblich unterschieden. Dabei führt die Zunahme eines Parameters mit positivem Wert (rote Farbtöne) eher zu einer Verbesserung der Akustik. Eine Zunahme eines Parameters mit negativem Vorzeichen (grüner Farbbereich) führt zu einer Abnahme des akustischen Frequenzpegels.

Die folgende Tabelle 3-1 fasst die Erkenntnisse aus der Modellierung zusammen und gibt Hinweise, wie die einzelnen Parameterwerte des Modells gemäss der Abbildung 3-1 zu interpretieren sind.

14. Februar 2023

Tabelle 3-1: Zusammenfassung Modellierung von Parametern für 4er-Beläge anhand des PKW-Modells für Neuzustand der Beläge.

Parameter	Implikation
Löslicher Anteil Bindemittel	Eher tief zu halten? (Dieser Parameter weist in der Bautechnik einen starken Zusammenhang mit Füllergehalt auf)
Sieb 0.063 mm	Zusammenhang mit löslichem Anteil Bindemittel. Eher tief zu halten.
Sieb 1 mm	Führt im mittleren bis hohen Frequenzbereich zu Reduktionen in der akustischen Belagsgüte.
HR-Gehalt	Wird im Modell über verschiedene Parameter eingegeben (HR BK/HR Marshall), beide entscheidend, aber auch stark miteinander korreliert.
Schichtdicke	Führt zur Reduktion der Schallemissionen im mittleren und hochfrequenten Bereich mit zunehmender Schichtdicke.
Verdichtungsgrad	Der Verdichtungsgrad führt gemäss dem oben präsentierten Modell vor allem im hohen Frequenzbereich zu einer akustischen Verschlechterung der Belagsgüte. Grundsätzlich ist aber eine Rückkopplung zum Hohlraumgehalt denkbar.

3.1.2 8er Beläge

Bei den 8er Belägen gibt es im Vergleich zu den 4er-Belägen zusätzlich die Fraktion der 4er Körner, welche ebenfalls im mittleren Frequenzbereich als signifikant resultiert (siehe Abbildung 3-2).

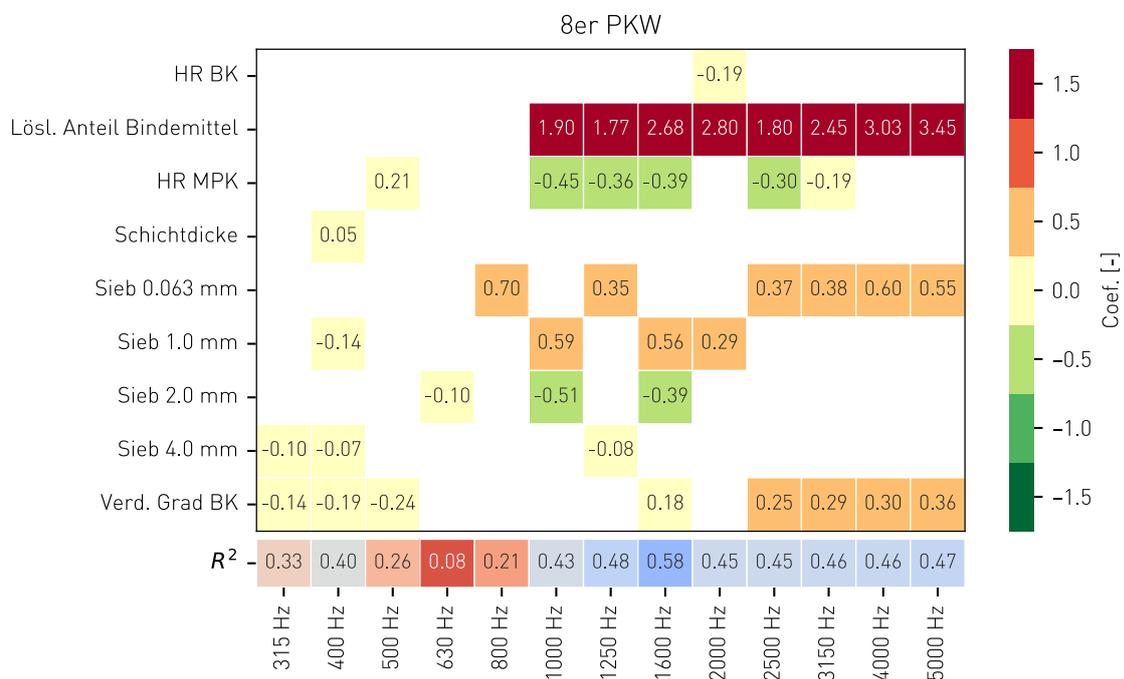


Abbildung 3-2: Lineare Modellierung 8er-Beläge für CPX-Frequenzen (315-5000 Hz). Die einzelnen Koeffizienten sind dabei farblich unterschieden. Dabei führt die Zunahme eines Parameters mit positivem Wert (rote Farbtöne) eher zu einer Erhöhung des akustischen Belagsgütewertes hin. Eine Zunahme eines Parameters mit negativem Vorzeichen (grüner Farbbereich) führt zu einer Abnahme des akustischen Frequenzpegels.

14. Februar 2023

Tabelle 3-2: Zusammenfassung Modellierung von Parametern für 8er-Beläge anhand des PKW-Modells für Neuzustand der Beläge.

Parameter	Implikation
Löslicher Anteil Bindemittel	Eher tief zu halten? (Dieser Parameter weist in der Bautechnik einen starken Zusammenhang mit Füllergehalt auf). Eventuell noch wichtiger als beim 4er Belag.
Sieb 0.063 mm	Zusammenhang mit löslichem Anteil Bindemittel. Eher tief zu halten.
HR-Gehalt	Wird im Modell über verschiedene Parameter eingegeben (HR BK, HR Marshall), beide entscheidend, aber auch stark miteinander korreliert. -Nicht durchgehender direkter Einfluss im hochfrequenten Bereich. Vermutung: Entlüftungseigenschaften auch ohne grösseren HR-Gehalt möglich!?
Schichtdicke	Führt zur Reduktion der Schallemission im mittleren und hochfrequenten Bereich mit zunehmender Schichtdicke.
Verdichtungsgrad	Wie bereits bei den 4er Belägen, zeigt sich eine Abhängigkeit des Verdichtungsgrades in den hohen Frequenzen. Mit zunehmender Verdichtung nimmt ebenfalls die akustische Belagsgüte ab. Dies ist möglicherweise auf Rückkopplungseffekte zum Hohlraumgehalt zurückzuführen.

3.1.3 Grundsätzliche Erkenntnisse

Die obigen multivariaten linearen Modelle wurden erstellt, um die Mischgut- und Bauparameter zu identifizieren, welche die akustische Leistung erklären. Es wurden nur statistisch signifikante Variablen ($p < 0.05^1$) in die Modelle aufgenommen. Folgende Erkenntnisse konnten gewonnen werden:

- **6 Mischgutparameter wurden als relevant identifiziert** und können durch das Mischungsdesign gesteuert werden: Bindemittelgehalt, Hohlraumgehalt am Mischgut, Sieb 0.063 mm, Sieb 0.5 mm, Sieb 1.0 mm, Sieb 2.0 mm, Sieb 4.0 mm, während **3 Parameter durch den Bauprozess beeinflusst** werden können: Verdichtungsgrad, Hohlraumgehalt des Bohrkerns und die Schichtdicke. Für jeden dieser Parameter werden in Abschnitt 3.3 optimale Bereiche bestimmt, um basierend darauf Zielwerte und die optimalen Bereiche für hoch performante lärmindernde SDA zu ermitteln zu können.
Die obige Auswahl wichtiger Parameter zur Optimierung der akustischen Leistung von SDA macht auch aus theoretischer Sicht Sinn, da die meisten der ermittelten Mischgut- und Bauparameter in direkter oder indirekter Weise mit dem Hohlraumgehalt und dem Grad der Interkonnektivität zwischen den Poren in Zusammenhang stehen. Es ist zu beachten, dass in einigen Fällen die Kollinearität zwischen den Variablen zu Selektionen durch das Modell führen kann, die nur indirekt mit der effektiven Belagsgüte in Verbindung gebracht werden können.
- **Gute Korrelation in mittleren und hohen Frequenzen:** Die gebildeten Modelle haben nur im mittleren und hohen Frequenzbereich eine gewisse Aussagekraft. Dabei weisen sie in diesem Bereich höhere R^2 -Werte von 0.5-0.7 auf, somit bleibt allerdings immer noch ein gewichtiger Teil der Varianz durch die Modelle unerklärt. Dies deutet darauf hin, dass entweder der Modellansatz noch nicht ganz optimal ist oder aber, dass nicht genügend erklärende Parameter im Datensatz aufgenommen werden konnten. In Abschnitt 3.2.1 wird deshalb ein weiterer Modellansatz getestet.
- **Schlechte Korrelation bei tiefen Frequenzen:** Die Modellierungen sowohl für SDA4- als auch für SDA8-Beläge weisen im Bereich von 315 bis und mit 800 Hz sehr tiefe R^2 -Werte auf. Folglich haben die gebildeten Modelle in diesem Frequenzbereich kaum Vorhersagekraft. Die Vorhersagekraft erhöht sich hingegen mit zunehmendem Frequenzbereich. Es zeigt sich, dass bei tiefen Frequenzen kein

¹ Das Signifikanzniveau von 5% beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass die Null-Hypothese verworfen werden kann und somit keine Verbesserung des Modells beschreibt. Somit besteht eine Wahrscheinlichkeit von <5%, dass der Parameter nicht zu einer Verbesserung beiträgt.

14. Februar 2023

statistischer Zusammenhang mit der Siebkurve/Bauparametern besteht. Es ist zu beachten, dass zur Erklärung der Schallentstehung im tiefen Frequenzbereich wichtige Parameter fehlen. Dazu gehören etwa die Kornform, die Verarbeitung und die Verdichtungspraxis (Anzahl Walzengänge, Einbaubedingungen usw.).

3.2 Überprüfung Erkenntnisse Studie 2017

Im Rahmen der Studie *Ausführungsbestimmung Akustik* aus dem Jahr 2017 [11] wurde der *Akustik-Faktor* definiert. Mit diesem Faktor soll sichergestellt werden, dass die Rezeptur zu einer kommunizierenden Porenkonstruktion in der eingebauten Deckschicht führt, welche schallabsorbierende Eigenschaften aufweist. Für 4er-Beläge wurde im Jahr 2017 folgender Zusammenhang gefunden:

$$AF_{4er-Beläge} = 2 \cdot Sieb_{0.063mm} + 1 \cdot Sieb_{2mm} \quad (1)$$

wobei die Bedingungen

$$Sieb_{0.063mm} < 10.7 \%$$

$$Sieb_{2mm} < 28.1 \%$$

$$\text{und } AF < 41.1 \%$$

einzuhalten sind. Für 8er-Beläge sind folgende Bedingungen einzuhalten:

$$AF_{8er-Beläge} = 1 \cdot Sieb_{0.063mm} + 1 \cdot Sieb_{2mm} \quad (2)$$

$$Sieb_{0.063mm} < 8.7 \%$$

$$Sieb_{2mm} < 24.2 \%$$

$$\text{und } AF < 30.5 \%$$

Nun ist im Jahr 2021 eine grössere Anzahl an Belägen für eine Analyse vorhanden und der dafür zur Verfügung stehende Datensatz wurde nach den Kriterien gemäss den Formeln (1) und (2) ausgewertet. In der folgenden Abbildung 3-3 ist der Erfüllungsgrad der Beläge im Neuzustand abgebildet. Dabei zeigt sich, dass der Akustik-Faktor für 4er Beläge für sehr gute Bedingungen sorgen kann. Sofern der Akustik-Faktor erfüllt ist, beträgt die Erfolgswahrscheinlichkeit knapp 85%. Umgekehrt zeigt sich aber auch, dass auch bei einem nicht einhalten noch knapp die Hälfte der Beläge (52%) vielversprechende (gute) akustische Leistungen aufweisen. Daraus lässt sich schliessen, dass der Bereich des Akustik-Faktors unter bestimmten Bedingungen erweitert werden kann. Allerdings stellt das Einhalten des Akustik-Faktors immer noch die sicherste Methode dar, einen möglichst guten Belag zu erhalten.

14. Februar 2023

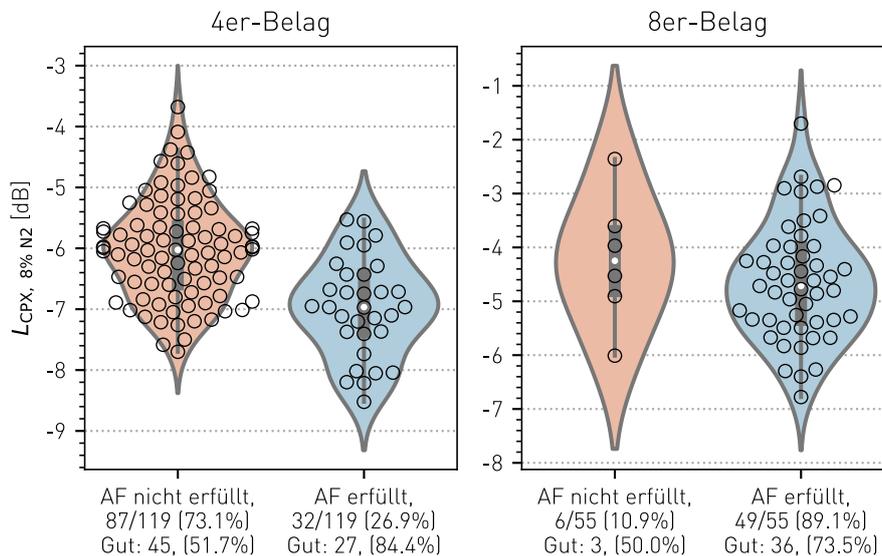


Abbildung 3-3: Auswertung akustische Leistung in Abhängigkeit des Akustik-Faktors für 4er-Beläge (links) und 8er-Beläge (rechts). Dabei ist in der X-Achse der Erfüllungsgrad abgebildet, und wie viele Beläge vielversprechende (gute) akustische Leistung aufweisen.

Die Datenanalysen zeigten auch einen deutlichen Zusammenhang zwischen dem Akustik-Faktor und dem Marshall-Hohlraumgehalt. In der Abbildung 3-4 ist der Zusammenhang zwischen dem Akustik-Faktor und dem Marshall – HR-Gehalt aufgezeigt. Wie der Grafik zu entnehmen ist, besteht zwischen dem Akustik-Faktor und dem Marshall Hohlraumgehalt ein grösstenteils linearer Bezug. Das zeigt bereits deutlich, dass es sich bei den SDA-Deckschichten um ein korngestütztes Gefüge handelt und dass der entstehende Hohlraum aufgrund der Siebkurve erreicht wird.

In der Abbildung sind die Grenzen des Marshall-Hohlraumgehalts der Belagstypen gemäss der Regel VSS 40-436:2019 [2] farblich hinterlegt. Dabei zeigt sich für die 4er Beläge deutlich, dass im untersten Bereich (SDA4-12) kaum Beläge zu finden sind, welche das Kriterium des *Akustik Faktors* erfüllen (in der Abbildung als Kreuze dargestellt). Ebenso ergibt sich, wie schon eingangs erwähnt, ein starker Zusammenhang zwischen der Siebkurve (oder eben dem Akustik-Faktor) und dem Marshall-Hohlraumgehalt. Mit einem Akustik-Faktor von 41.1 landet man bei 4er Belägen bei einem minimalen Marshall HR-Gehalt von ca. 15%. Das heisst, dass die Rezeptur des SDA4-12 nur in sehr ausgeprägten Fällen das Kriterium des Akustik-Faktors einhalten kann. Die Modellierung des Marshall-HR Gehalts rein aufgrund der Parameter *Sieb_{2mm}* und *Sieb_{0,063mm}* kann natürlich nicht die ganze Varianz erklären, was auch die erhöhte Streuung zu erklären vermag. Dies lässt sich in der Abbildung deutlich sehen.

Bei den 8er Belägen zeigt sich, dass der Akustik-Faktor von deutlich mehr Belägen erfüllt wird. Bei den 8er Belägen zeigt sich, dass der Akustik-Faktor von 30.5% ca. einem Marshall-HR Gehalt von ungefähr 11.5% entspricht. Entsprechend wird der Akustik-Faktor Grenzbereich 2017 von einem Grossteil der eingebauten Deckschichten erfüllt.

14. Februar 2023

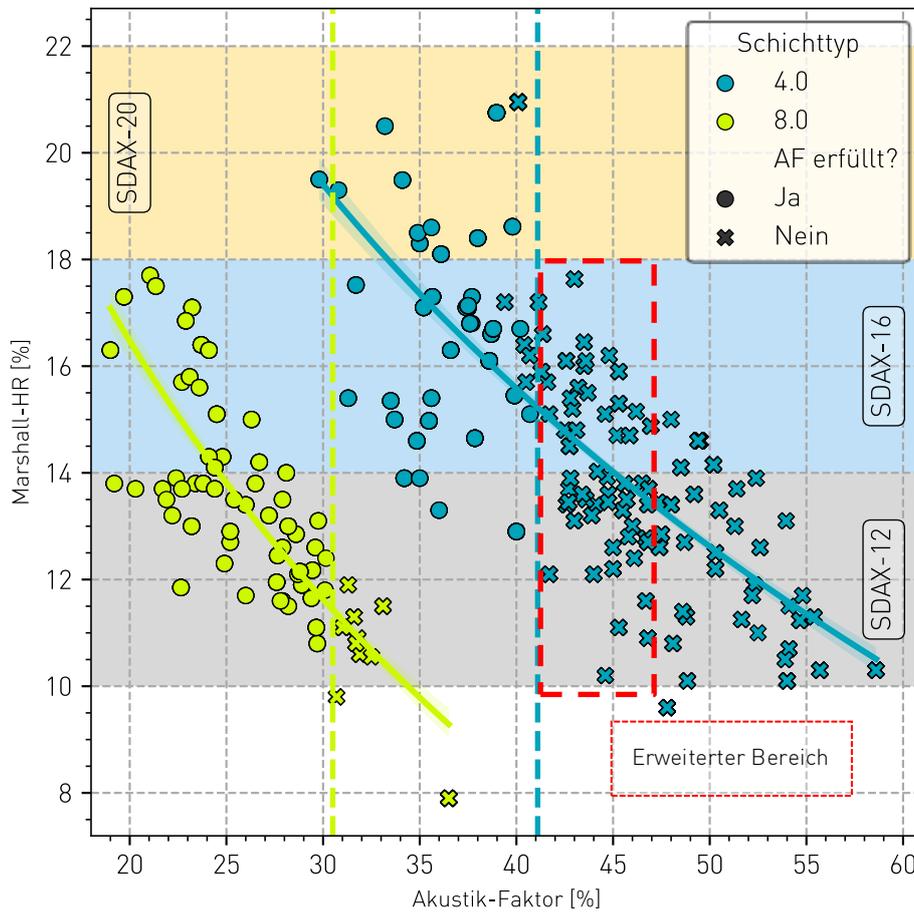


Abbildung 3-4: Zusammenhang zwischen Marshall-Hohlraumgehalt und dem Akustik-Faktor für SDA4 (blau) und SDA8 (grün) Beläge. Dabei wird in den einzelnen Punkten dargestellt, ob der Akustik-Faktor erfüllt wird. In diesem Projekt konnte aufgezeigt werden, dass es offenbar einen erweiterten Bereich zu geben scheint. (Vgl. Kapitel 3.3)

3.2.1 Überprüfung der Wichtigkeit der Parameter Füller und Sand

Zur Überprüfung der Verhältnisse zwischen Füller und Sand wurde auf dem Datensatz ein *Random Forest Modell* auf Basis des Einbauzustandes gebildet. Dabei sind die Hauptfaktoren aus dem Kapitel 3.1 in die Modellierung einbezogen worden. Mit dem Modell kann nun die akustische Belagsgüte (N1-Wert) anhand der Bauparameter vorausgesagt werden. Die Modellbildung erfolgte mit 80% der Daten, und eine unabhängige Verifizierung wurde mit den restlichen 20% der Daten durchgeführt. In der Abbildung 3-5 ist das Resultat der Verifizierung dargestellt. Dabei zeigt sich, dass das *Random Forest Modell* die resultierende akustische Belagsgüte sehr gut vorauszusagen vermag. Das Modell kann somit für Vorhersagen der akustischen Belagsgüte verwendet werden.

14. Februar 2023

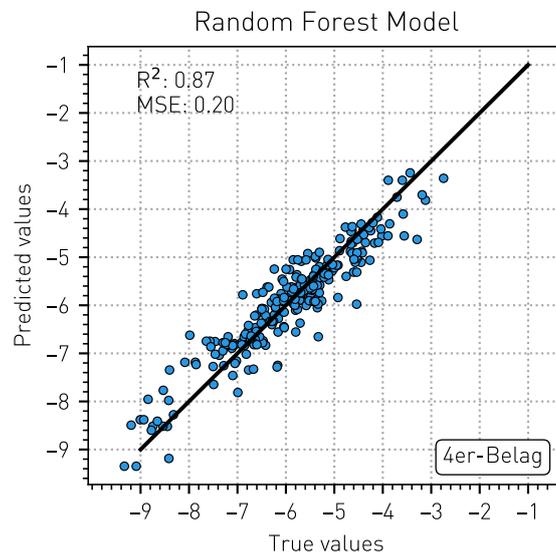


Abbildung 3-5: Modellverifizierung für 4er-Beläge. Auf der X-Achse sind die gemessenen Werte dargestellt, während auf der Y-Achse die vorhergesagten Werte dargestellt werden.

Mit dem besagten Modell ist nun in der Abbildung 3-6 eine Simulation dargestellt, welche die akustische Belagsgüte in Abhängigkeit des Füller- respektive des Sandgehalts darstellt. Dabei sind die restlichen Parameter konstant gehalten worden (Marshall-HR: 12.5%, Verdichtungsgrad: 100%, Schichtdicke: 34.2 mm, Löslicher Anteil Bindemittel: 6.16%).

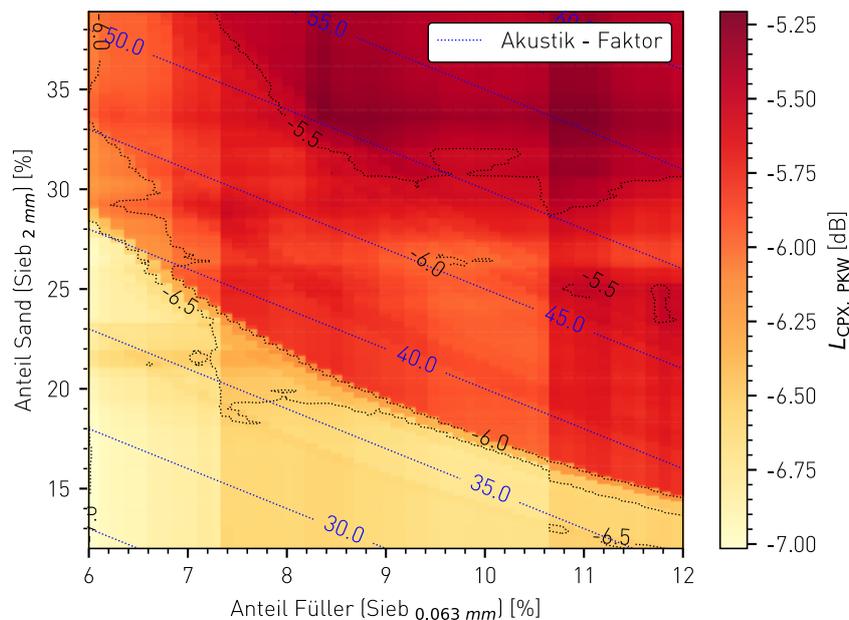


Abbildung 3-6: Simulierte akustische Belagsgüte (CPX-Pegel, Neuzustand, N1) in Abhängigkeit des Sand-, respektive des Füllergehalts. Die Simulation wurde für einen Marshall-Hohlraumgehalt von 12.5%, einem Verdichtungsgrad von 100% und einem Bindemittelgehalt von 6.16% durchgeführt. Neben der resultierenden akustischen Belagsgüte ist ebenfalls der Akustik-Faktor ersichtlich (blaue gestrichelte Linien)

14. Februar 2023

Die Abbildung zeigt deutlich das Zusammenspiel der beiden Grössen Füller & Sand. Die besten akustischen Belagsgütewerte werden demnach bei tiefen Füller- & Sandgehalten erreicht. Klar ist auch, dass der Akustikfaktor 2017 ein guter Näherungswert ist. Gerade im mittleren Bereich verlaufen die Isolinien des Akustik-Faktors praktisch parallel zu den Modellkurven. Dies bedeutet, dass sich das 2:1 Verhältnis der Bestandteile als ziemlich optimal herausstellte. Bei der Betrachtung der Abbildung muss jeweils noch berücksichtigt werden, dass die beiden Parameter Füller und Sand nicht das ganze Konstrukt des Belages beinhalten. Sehr wichtig sind weitere Mischgutparameter sowie der Verdichtungsgrad und die Schichtdicke. Da der Marshall Hohlraumgehalt in obiger Darstellung jeweils konstant gehalten wurde, bedeutet dies, dass bei tiefen Marshall-HR die oben gezeigten Zusammenhänge nicht gelten und die Werte der Belagsgüte entsprechend tiefer ausfallen. Weitere Auswertungen des Modells finden sich zu Illustrationszwecken im Anhang II ab Seite 66.

3.3 Optimierung Parameterbereiche SDA-Beläge

Damit die akustische Leistung der eingebauten SDA-Beläge sichergestellt werden kann, werden in diesem Kapitel die Zielwerte und Optimabereiche von SDA Rezepturen hergeleitet, welche eine akustische Wirksamkeit der eingebauten Deckschicht durch von der Oberfläche zugängliche Poren garantieren soll. Dabei werden für die für die Akustik entscheidenden Parameter aus Abschnitt 3.1 Grenzbereiche ermittelt, ausserhalb welchen mit einem Verstopfen der Porenverbindungen durch die Mastix/Feinanteile zu rechnen ist.

3.3.1 Zusammenspiel Siebkurve vs. Akustik

In der Abbildung 3-7 sind die aufgenommenen Mischgutuntersuchungen für 4er und 8er Beläge aufgeführt. Dabei wird jeweils mit dem gemessenen CPX-Wert ein Klassenmittel von 0.25 dB gebildet und davon die mittlere Mischgutkurve dargestellt. Entsprechend enthalten die folgenden Abbildungen nur einen Mittelwert der einzelnen Mischgutkurven. In der Abbildung ist schwarz gestrichelt der Bereich der minimalen und der maximalen Siebkurve abgebildet. Es fällt auf, dass mit der Norm VSS 40 436:2019 ein sehr weiter Bereich möglich ist. Mit der möglichen Anpassung durch die Norm VSS 40 436:2021 wird sich dieser Bereich deutlich verkleinern. Dabei wird in diesem Normenentwurf nur die obere (maximale) Siebkurve verändert. Dies gilt ebenso für 4er wie auch für 8er Beläge.

14. Februar 2023

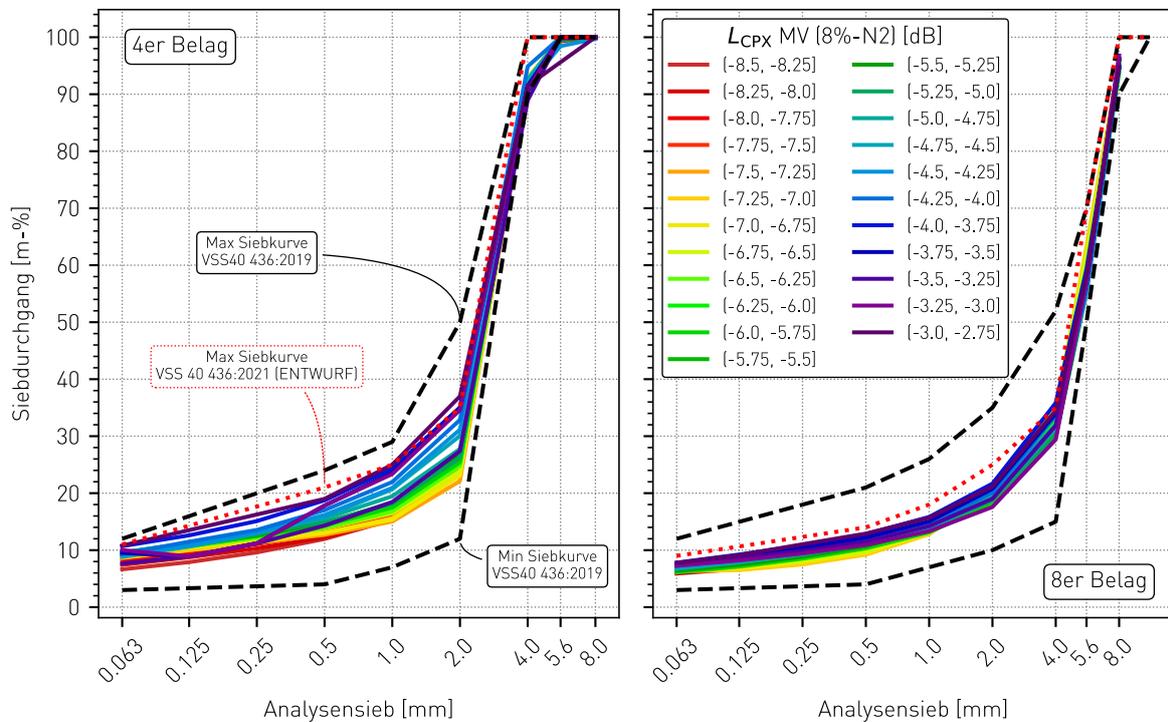


Abbildung 3-7: Mischgutkurven für 4er und 8er Beläge inklusive der Klassierung der akustischen Belagsgüte im Neuzustand (Mischverkehrswert 8% N2-Anteil).

Aus der Abbildung 3-7 lassen sich folgende Erkenntnisse und Folgerungen ziehen:

Tabelle 3-3: Erkenntnisse und Folgerungen aus der Analyse der Siebkurven kombiniert mit der akustischen Belagsgüte.

Erkenntnis	Folgerung
Abhängigkeit Mischgut zur Akustik ist gegeben.	Mit Präzisierung der SDA-Korngrößenverteilung kann die Belagsgüte effektiv gesteuert werden.
Die Varianz (Streuung der eingebauten Deckschichten) bei den Mischgutuntersuchungen ist bei 4er Belägen grösser als bei 8er Belägen	Kleinere statistische Bandbreite, um Präzisierung herbeizuführen.
Sehr breite Normkurven (gilt sowohl für 4er wie auch 8er Beläge)	Eine Einengung der zulässigen Normbereiche ist zielführend.
Keine ausschliessliche Erklärung durch die Siebkurven möglich	Es müssen weitere Parameter berücksichtigt werden.

Anhand der Abbildung 3-7 werden in Abhängigkeit der Akustik verschiedene Parameterbereiche, welche bereits im Kapitel 3.1 als signifikant erschienen, näher untersucht. Dabei sind die einzelnen Bauparameter bivariat mit der Akustik im Neuzustand dargestellt.

14. Februar 2023

3.3.2 Hohlraumgehalt Marshall

Der Marshall-Hohlraumgehalt hat einen grossen Einfluss auf die resultierende akustische Belagsgüte. Die Abbildung 3-8 zeigt, dass sich die akustische Belagsgüte mit abnehmendem Marshall-HR verringert. Ein deutlicher Abfall der akustischen Belagsgüte ist für beide Belagstypen (4er und 8er) im Bereich von einem HR-Gehalt von ca. < 13% zu verzeichnen. Unter diesem Bereich ist es wahrscheinlich, dass die Deckschicht einen Anfangswert von >-5 dB respektive >-3 dB erreicht.

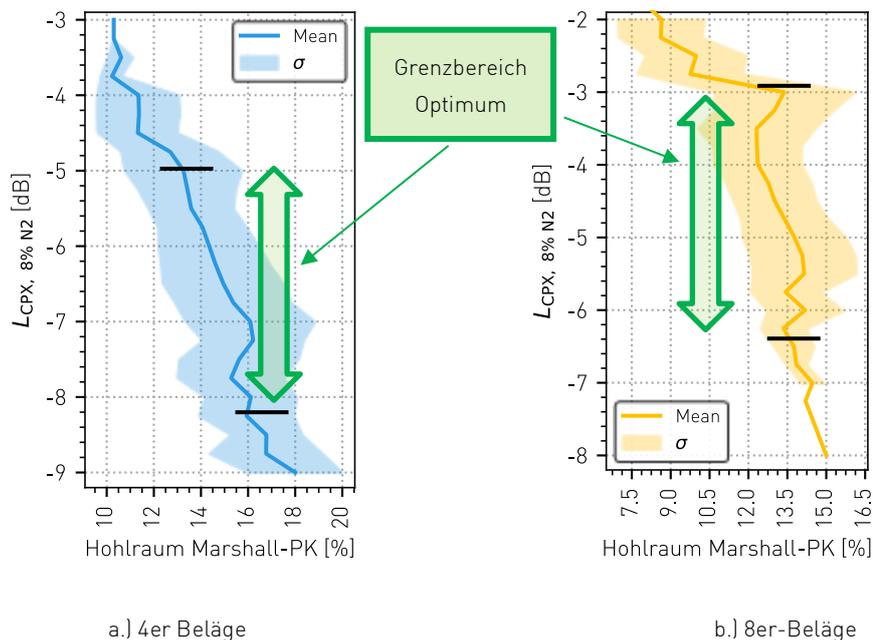


Abbildung 3-8: Verlauf des Marshall-HR-Gehalts in Abhängigkeit des CPX-Pegels (Mischverkehr 8% N2). Dargestellt sind der Mittelwert sowie die mittlere Streuung (Standardabweichung). a.): 4er-Beläge, b.): 8er Beläge.

Folglich können aus der obenstehenden Grafik die folgenden Schlüsse gezogen werden:

Für 4er-Beläge zeigt sich, dass unterhalb der kritischen Schwelle von 13% Marshall – HR ein deutlich erhöhtes Risiko für akustisch nicht optimale Beläge besteht. Folglich weisen die Beläge unterhalb 13% HR-Gehalt hauptsächlich eine Wirksamkeit über die (oberflächennahe-) Entlüftung aus. Bei den Belägen >8% HR-Gehalt, darf von akustisch aktiven Poren und daher Schallabsorbierenden Eigenschaften ausgegangen werden. Somit liegt der Optimalbereich (↔) für die 4er- Beläge im Bereich >13% HR Gehalt.

Bei 8er-Belägen scheint es, dass die Beläge unterhalb von 13% Marshall-HR auch hauptsächlich über die (oberflächennahe) Entlüftung, sowie die Anregung des Reifens agieren. Oberhalb von 13% weisen die Beläge vermehrt Schallabsorbierende Eigenschaften auf. Folglich lässt sich zusammenfassen, dass der Optimumbereich (↔) ebenfalls >13% HR-Gehalt beträgt.

14. Februar 2023

3.3.3 Akustik-Faktor

Der Akustik-Faktor wurde in der Studie *Ausführungsbestimmung Akustik* aus dem Jahr 2017 [11] ermittelt. Abbildung 3-9 zeigt die Abhängigkeit des CPX-Pegels zum Akustik-Faktor. Dabei zeigt sich insbesondere für die 4er-Beläge ein starker Zusammenhang zwischen der Akustik und dem Akustik-Faktor. Mit zunehmendem Akustik-Faktor sind auch höhere CPX-Pegel zu erwarten. Bei den 8er Belägen ist der Zusammenhang weniger ausgeprägt.

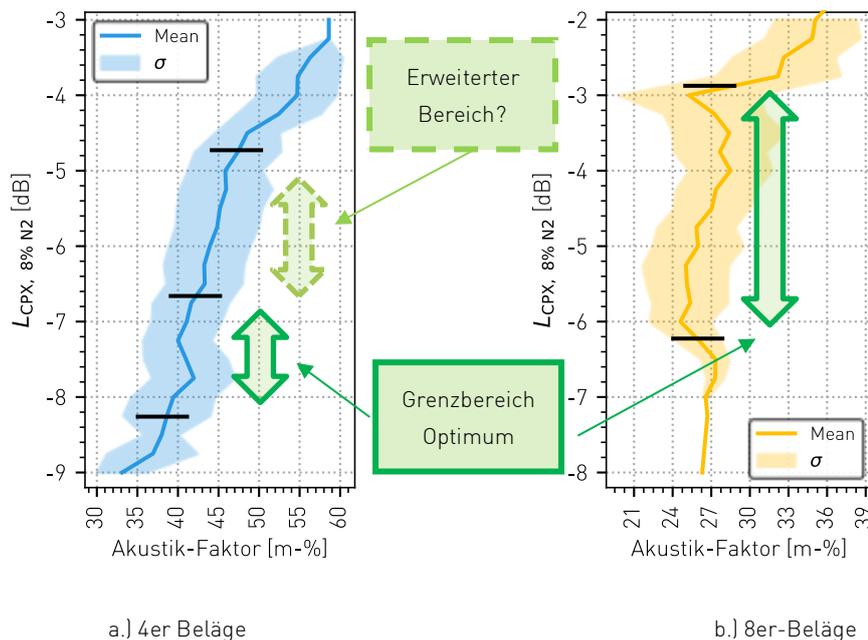


Abbildung 3-9: Verlauf des Akustik-Faktors in Abhängigkeit des CPX-Pegels (Mischverkehr 8% N2). Dargestellt sind der Mittelwert sowie die mittlere Streuung (Standardabweichung). Links: 4er-Beläge, Rechts: 8er-Beläge.

Die Ermittlung des Grenzbereiches ist insbesondere für 4er Beläge nicht ganz einfach. Jedoch zeigte sich in Abbildung 3-4, dass ein Akustik-Faktor von 41.1 für 4er Beläge eher tief angesetzt ist. So zeigt Abbildung 3-9, dass selbst bei höheren Akustik-Faktoren von bis zu 47 noch gute akustische Eigenschaften gemessen werden. Allgemein wird im relevanten Grenzbereich zwischen -7 und -5 dB eine grosse Streuung beobachtet. Was sich aber zeigt, ist dass mit Akustik-Faktoren von < 42 relativ gute Ergebnisse erzielt werden können. Folglich ist der Grenzbereich des Optimums (↔) bei AF-Werten < 42 zu wählen. Da sich aber gezeigt hat, dass es ebenfalls einige Mischungen gibt, welche relativ gute Leistungen zeigen, ist in diesem Fall ein erweiterter Bereich (↔) von 42 – 47 angegeben. Dieser Bereich bedingt allerdings, dass weiteren Mischgutparameter berücksichtigt werden und sich dort die Mischung innerhalb des «sicheren» und somit konservativen Optimalbereichs befinden sollte.

Bei den 8er-Belägen zeigt sich ein starker Anstieg im Bereich eines Akustik-Faktors von rund 27.5. Daher sollte dieser Bereich nicht überschritten werden und der Grenzbereich des Optimums (↔) liegt folglich bei ca. 27.5 %.

Weiter gilt es zu beachten, dass diese Grenzbereiche jeweils in Kombination der anderen Bauparameter berücksichtigt werden sollten. Das heisst, dass die Optimalbereiche möglichst nicht am unteren Ende der akustischen Belagsgüte liegen sollten.

14. Februar 2023

3.3.4 Verdichtungsgrad

Der Verdichtungsgrad ist ein wichtiger Einbauparameter, welcher die Transformation des angelieferten Mischgutes in die effektiv eingebaute Schicht beschreibt. Durch eine hohe Verdichtung kann die Porosität des angelieferten Materials stark limitiert werden. Umgekehrt werden bei zu tiefer Verdichtung vermehrt Hohlraumstrukturen geschaffen. Darunter dürfte jedoch die Langzeitwirkung tendenziell leiden, da die Kornzusammenhaftung unter diesen Voraussetzungen nicht optimal ist.

Folglich ist davon auszugehen, dass sich eine zu hohe Verdichtung negativ auf die Belagsgüte auswirkt. Bei zu tiefer Verdichtung kann zwar die unmittelbare akustische Leistung erhöht sein, die Dauerhaftigkeit der Schicht könnte aber limitiert sein. Folglich ist bei der Verdichtung ein Optimum von 100% anzustreben.

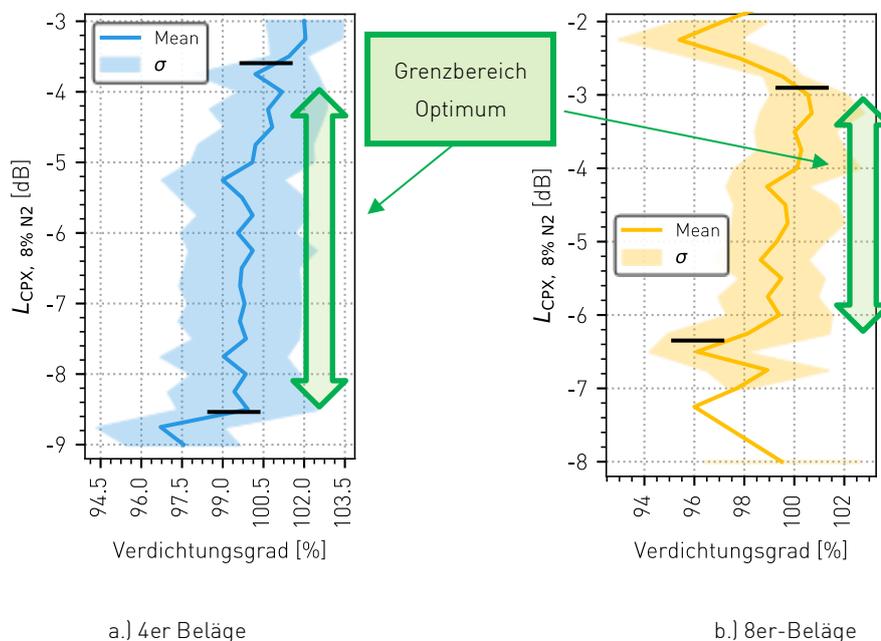


Abbildung 3-10: Verlauf des Verdichtungsgrads in Abhängigkeit des CPX-Pegels (Mischverkehr 8% N2). Dargestellt sind der Mittelwert sowie die mittlere Streuung (Standardabweichung). Links: 4er-Beläge, Rechts: 8er-Beläge.

Die Grafik zeigt für 4er-Beläge, dass der Bereich zwischen 98 – 102% sehr flach verläuft. Folglich ist eine Verdichtung in diesem Optimalbereich (↔) anzustreben. Wobei sicherlich der Zielwert 100% angestrebt werden sollte.

Für 8er-Beläge liegt der (↔) Optimalbereich im selben Rahmen wie beim 4er-Belag.

Grundsätzlich kann es sein, dass bei erhöhter Verdichtung eine Zerstörung des Hohlraumgerüsts resultieren kann.

14. Februar 2023

3.3.5 Sieb 0.063 mm (Füller)

Beim Füller zeigt sich, dass eine sehr gute Belagsgüte nur bei sehr tiefen Füllergehalten erreicht wird. Bei den 4er Belägen sollte ein Wert von 10.0 nicht überschritten werden, bei 8er Belägen von 8.4.

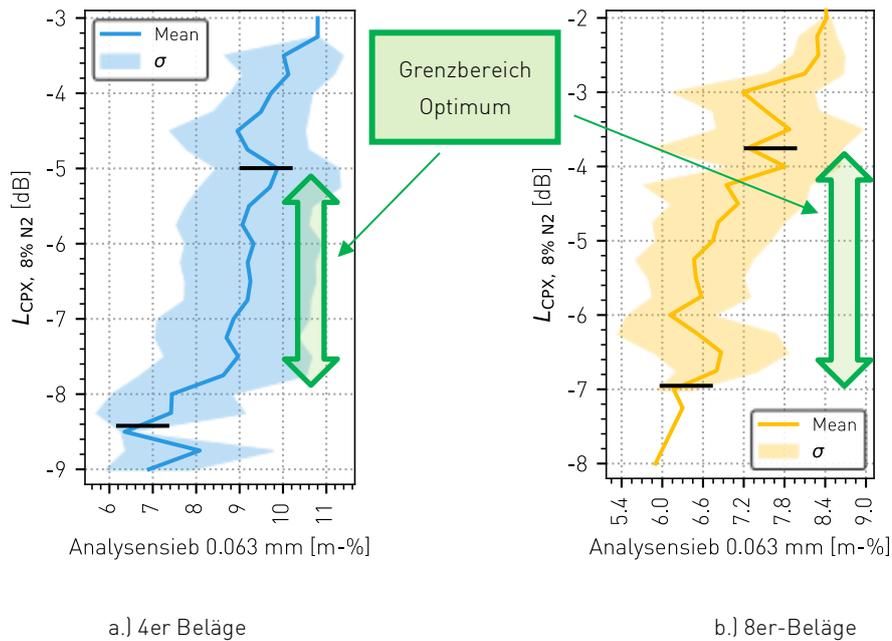


Abbildung 3-11: Verlauf des Füller-Gehaltes (0.063 mm-Sieb) in Abhängigkeit des CPX-Pegels (Mischverkehr 8% N2). Dargestellt sind der Mittelwert sowie die mittlere Streuung (Standardabweichung). Links: 4er-Beläge, Rechts: 8er-Beläge.

Bei den 4er-Belägen verläuft die Kurve im Bereich zwischen 7 und ca 10% sehr flach, was dafür spricht, dass weitere Parameter in Kombination zu dem Füllergehalt entscheidend sind. Allerdings zeigt sich auch, dass diese 10% tendenziell nicht überschritten werden sollten. Folglich liegt der Optimumbereich (↔) zwischen 6.5 – 10% Füllergehalt.

Bei den 8er-Belägen verläuft die Kurve einiges steiler, wobei mit dem Bereich bei ca. 8% eine deutliche Verschlechterung der Belagsgüte einhergeht. Somit liegt der Optimalbereich (↔) zwischen 6 und 8%.

14. Februar 2023

3.3.6 Sieb 2.0 mm (Sand)

Beim Analysensieb 2mm [Sandgehalt] zeigt sich deutlich, dass eine Abhängigkeit zwischen der Akustik und dem Sandgehalt besteht. So sind bei den beiden Belagstypen starke Anstiege im Bereich von ca. 27 % respektive 22% Sandgehalt zu verzeichnen. Darüber erhöht sich das Risiko, dass der Belag nicht mehr optimal funktioniert. Beim 4er Belag sind jedoch auch gute akustische Werte erzielbar, bei Sandgehalten von 30%, dabei müssen aber weitere Parameter berücksichtigt werden.

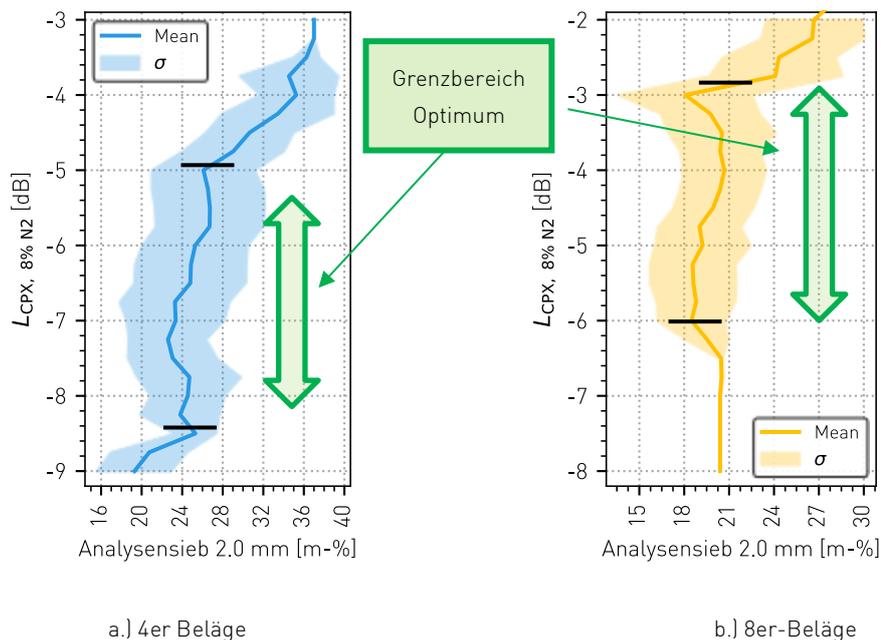


Abbildung 3-12: Verlauf des Sand-Gehaltes (2.0mm-Sieb) in Abhängigkeit des CPX-Pegels (Mischverkehr 8% N2). Dargestellt sind der Mittelwert sowie die mittlere Streuung (Standardabweichung). Links: 4er-Beläge, Rechts: 8er Beläge.

Bei 4er-Belägen zeigt sich, dass ab ca. 27% erhöhte Vorsicht geboten ist. Somit liegt der (↔) Optimalbereich zwischen 20 und 27%. Bei der Berücksichtigung weiterer Parameter kann dieser Bereich auf 30% erweitert werden (Vgl. Abwägungen zu weiteren Parametern im Kapitel 3.3.3). Der Verlauf der akustischen Belagsgüte verläuft im Bereich zwischen 20 und 27% relativ flach. Das bedeutet, dass neben diesem Sieb 2mm- Parameter weitere Parameter berücksichtigt werden müssen.

Für 8er-Beläge ist die Unterscheidung geringfügig einfacher. Der Bereich (↔) für das Optimum dürfte im Bereich zwischen 15 und 22% liegen.

14. Februar 2023

3.3.7 Sieb 0.5 mm

Grundsätzlich müssen für einen funktionierenden Belag viele Faktoren berücksichtigt werden. So zeigt sich auch für das Analysensieb 0.5 mm ein deutlicher Einfluss, obwohl dieses bereits eine recht feine Kategorie darstellt.

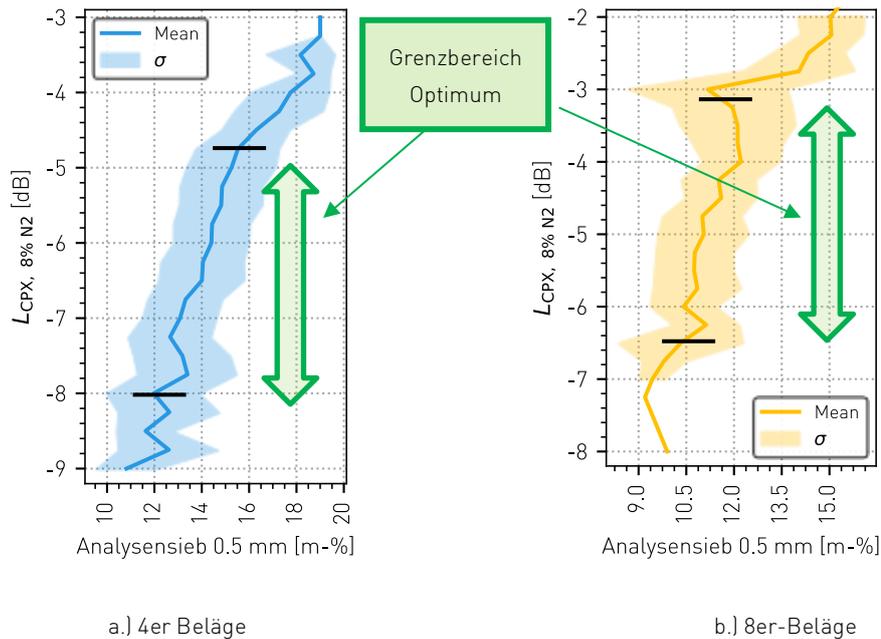


Abbildung 3-13: Verlauf des 0.5 mm-Sieb in Abhängigkeit des CPX-Pegels (Mischverkehr 8% N2). Dargestellt sind der Mittelwert, sowie die mittlere Streuung (Standardabweichung). Links: 4er-Beläge, Rechts: 8er Beläge.

Der Einfluss dieses Siebs ist bei 4er-Belägen relativ gross und daher sollte diesem Parameter beachtung geschenkt werden. Der optimale Bereich (↔) liegt im Bereich zwischen 10 und 16%. Wobei ab erhöhten Anteilen von >16% deutlich schlechtere akustische Belagsgüten resultieren können.

Bei den 8er-Belägen ist der Einfluss etwas weniger ausgeprägt. Der optimale Bereich (↔) dürfte aber im Bereich von 9-12% liegen. Wie bereits beim 4er Belag zeigt sich ab 12% eine deutliche Zunahme des CPX-Pegels.

14. Februar 2023

3.3.8 Sieb 1.0 mm

Als weiterer interessanter Parameter zeigt sich in Abbildung 3-14 zudem, dass bei einem zu hohen Anteil an Sieb 1 mm negative Einflüsse auf die Belagsgüte verzeichnet werden.

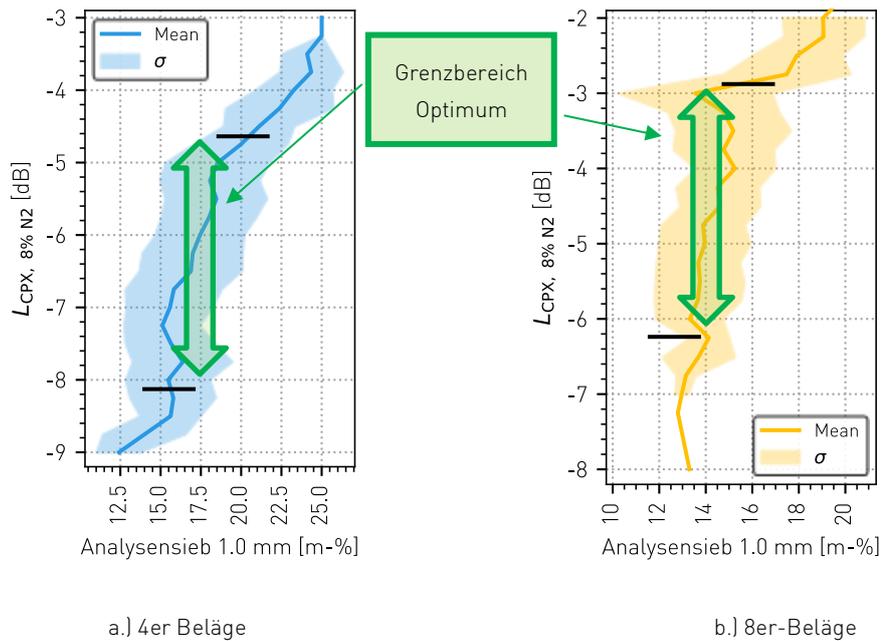


Abbildung 3-14: Verlauf des 1.0 mm-Sieb in Abhängigkeit des CPX-Pegels (Mischverkehr 8% N2) für 4er Beläge (a.) und für 8er Beläge b.). Dargestellt sind der Mittelwert sowie die mittlere Streuung (Standardabweichung). Links: 4er-Beläge, Rechts: 8er Beläge.

Aus der Analyse lässt sich ableiten, dass der Wert von 20% für 4er Beläge und ca. 15% für 8er Beläge ein Grenzbereich (↔) darstellt.

14. Februar 2023

3.3.9 Löslicher Anteil Bindemittel

Der lösliche Anteil am Bindemittel ist stark an die Siebkurve geknüpft. In der Modellierung in Abbildung 3-1 zeigte sich dieser Parameter jeweils als signifikant. Dies äussert sich auch hier:

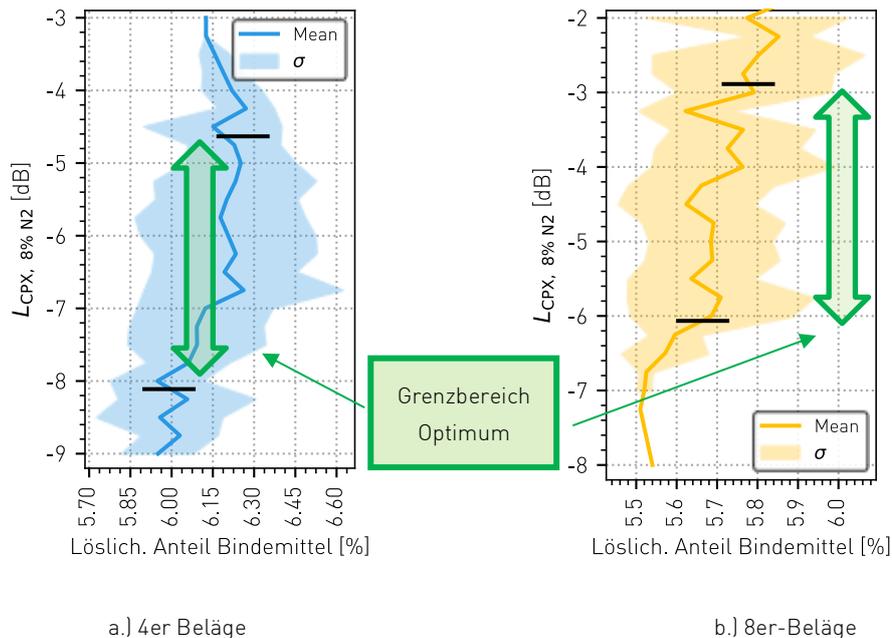


Abbildung 3-15: Verlauf des Löslichen Anteils des Bindemittels in Abhängigkeit des CPX-Pegels (Mischverkehr 8% N2). Dargestellt sind der Mittelwert sowie die mittlere Streuung (Standardabweichung). Links: 4er-Beläge, Rechts: 8er Beläge.

3.3.10 Abgeleitete Grenzbereiche für akustisch Wirksame SDA

Aus den obigen bivariaten Analysen können nun statistischen Grenzwerte oder Grenzbereiche für akustisch wirksame SDA abgeleitet werden. Wird dieser Grenzwert für einem der einzelnen Parameter überschritten muss mit einer stark zunehmenden Blockierung der Porenverbindung oder der Verbindung zur Oberfläche durch die Mastix/Feinanteile und somit mit einer deutlich verschlechterten Lärminderung gerechnet werden.

Für SDA 4: Für SDA 4 scheinen diese kritischen Werte bei etwa 10% für die Füllerfraktion (Sieb 0.063 mm), bei etwa 16% für den Siebdurchgang 0.5 mm, bei etwa 20% für den Siebdurchgang 1.0 mm und bei etwa 27% für Siebdurchgang 2.0 mm bzw. die Sandfraktion. Was die bautechnischen Parameter betrifft, so scheint der Verdichtungsgrad im Hinblick auf die akustische Leistung bei Neubauten sein Optimum bei etwa 100% zu haben. Eine Unterverdichtung (< 98%) kann zwar die akustische Leistung einer SDA im Neubau verbessern, hat aber, wie unsere Daten zeigen, erhebliche negative Auswirkungen auf die akustische Dauerhaftigkeit der Strassenoberfläche.

Für SDA 8: Für SDA 8 zeigt sich, dass ab einem Bereich von ca. 8% bei der Füllerfraktion eine kritische Grenze erreicht wird. Für Siebdurchgänge 0.5 mm liegt dieser Bereich bei ca. 12%, für den Siebdurchgang 1 mm bei ca. 15%. Für die Sandfraktion (Sieb 2 mm) liegt der Grenzbereich bei ca. 22%. Hinsichtlich des Verdichtungsgrades ist in Analogie zum 4er Belag der Optimalbereich um 100% festgelegt worden.

14. Februar 2023

3.4 Klassierung Hohlraumgehalt

Wie bereits in den vorhergehenden Kapiteln deutlich gezeigt, hat der Marshall Hohlraumgehalt einen entscheidenden Einfluss auf die Belagsgüte. Gemäss der Norm VSS 40 436:2019 wird zwischen den Marshall-HR-Kategorien -12 -16 und im Falle des 4er Belags zusätzlich der Kategorie -20 unterschieden.

In der Abbildung 3-16 ist der Zusammenhang des Marshall-Hohlraumgehalts und dem gemessenen CPX-Pegel aufgezeigt.

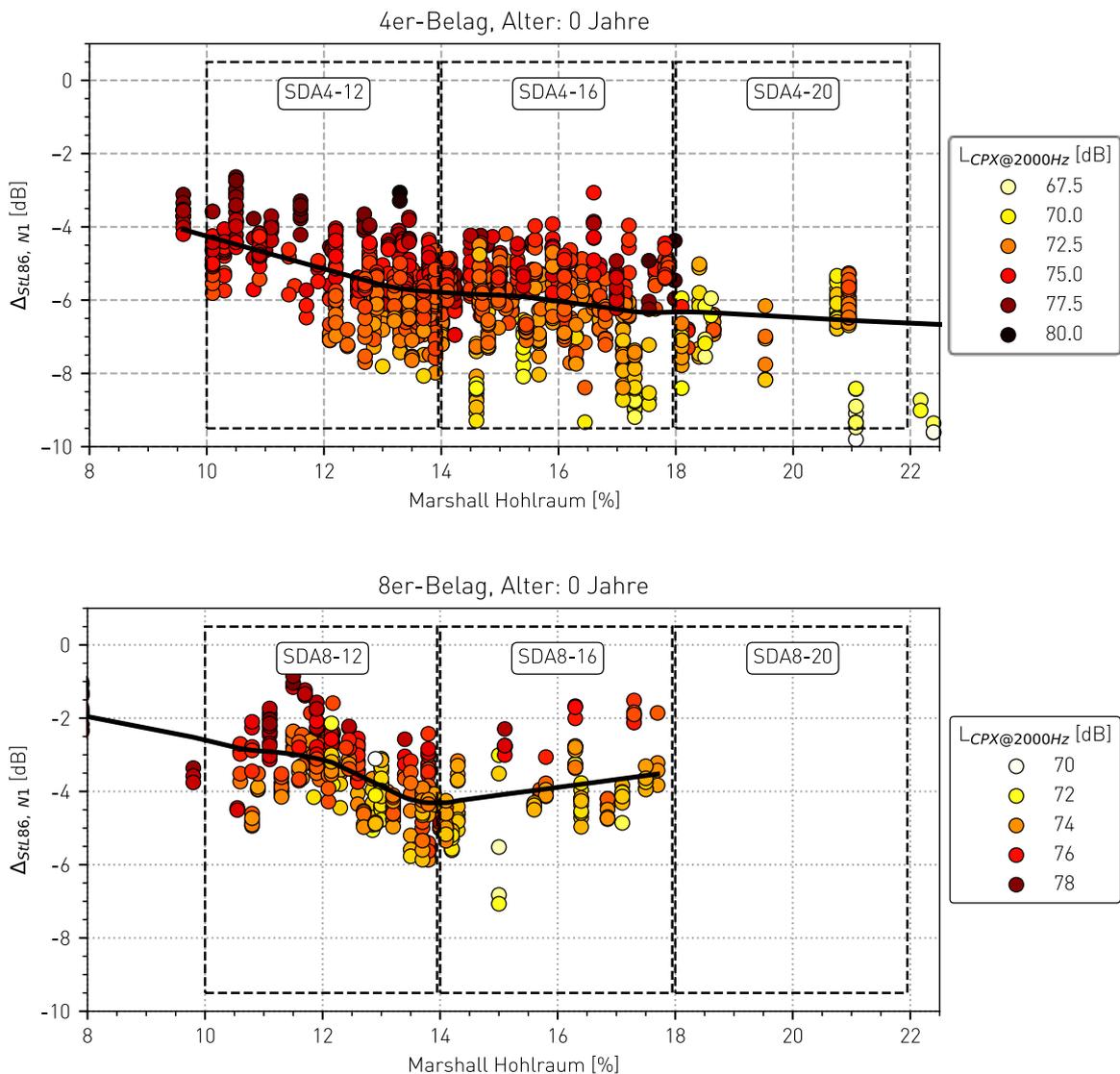


Abbildung 3-16: Kategorisierung Beläge anhand der Norm VSS 40 436:2019, Abhängigkeit zum gemessenen CPX-Pegel (PKW-Pneu, N1). Dabei sind die einzelnen Punkte mit dem CPX-Wert bei 2000 Hz eingefärbt, welche als Indikatorfrequenz für den Luftströmungsschall dient.

14. Februar 2023

Die Abbildung 3-16 verdeutlicht, dass sich die schwarze Lowess-Kurve in der Kategorie -12 jeweils steil absenkt. Das bedeutet, dass es sich bei 12%-HR Gehalt um einen entscheidenden Bereich handelt. Mit zunehmendem Hohlraumgehalt flacht sich die Kurve deutlich ab. Das heisst wiederum, dass man sich am unteren Rand der Kategorie -12 eher in einem Bereich befindet, in welchem die Zugänglichkeit der Poren bereits limitiert sein kann und die Auswirkungen auf die Akustik deutlich ersichtlich sind. Die Kategorie -12 der heutigen Schweizer Norm eignet sich aufgrund der variablen akustischen Leistung in diesem Bereich nicht als eine zuverlässige Rezeptur für lärmindernde SDA für den Einsatz im Lärmvollzug. Eine zufriedenstellende Lärminderung ist jedoch ab ca. 13% Marshall HR sowohl für SDA 4 als auch für SDA 8 zu erwarten. Daher sollte 13% als untere Grenze des Hohlraumgehalts für die Normung von lärmindernden SDA angesehen werden. Der Zielhohlraumgehalt einer entsprechenden Rezeptur läge unter Berücksichtigung heutiger Toleranzbereiche somit wohl bei 15%.

3.5 Einfluss Einbaupraxis

Der Einbau der Deckschicht ist ein sehr delikater Prozess. Das Zusammenspiel der Bauequipe ist entscheidend. Dabei spielen auch äussere Faktoren eine wichtige Rolle. So können im Laufe des Einbaus verschiedene Ereignisse eintreten, welche sich negativ auf die Qualität des Einbaus auswirken können.

Die erfassten Bauparameter (Mischgutuntersuchungen und Bohrkernuntersuchungen) beinhalten niemals die gesamten Details, die die Einzelheiten jedes einzelnen Einbaus ausmachen können. So ist beispielsweise die Mischguttemperatur nur eine Momentaufnahme, die gesamte Vorgeschichte des Mischguts ist unbekannt.

Es hat sich in der Untersuchung jedoch deutlich gezeigt, dass der Verdichtungsgrad eine entscheidende Grösse darstellt. So konnte für 4er und 8er Beläge der Zusammenhang zwischen Verdichtungsgrad, Bohrkern-Hohlraumgehalt und Marshall-Hohlraumgehalt modelliert werden (Vgl. Abbildung 3-17).

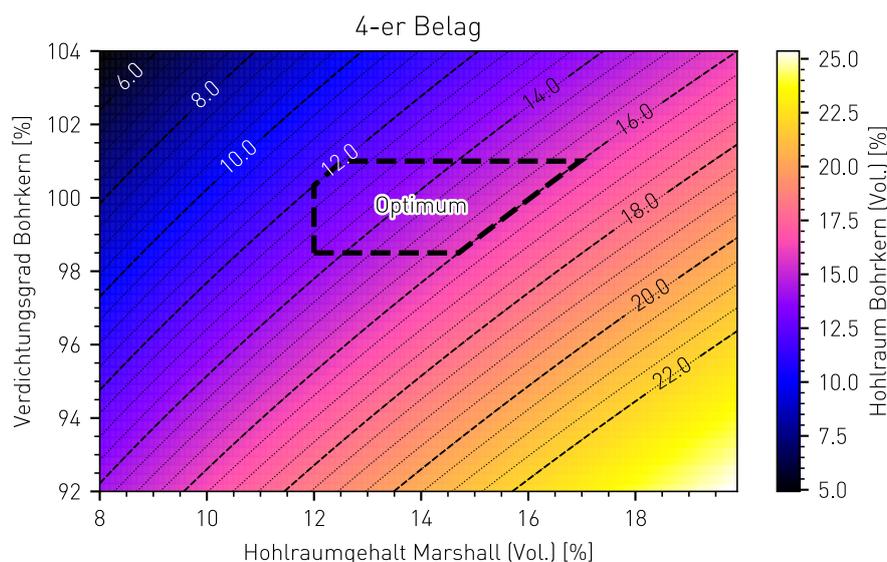


Abbildung 3-17: Zusammenhang zwischen Hohlraumgehalt am Mischgut (Marshall-HR, X-Achse) und Verdichtungsgrad am Bohrkern (Y-Achse) und dem resultierenden Bohrkern-Hohlraumgehalt (Farbe) der eingebauten Deckschicht

14. Februar 2023

Der Zusammenhang zwischen Hohlraumgehalt am Mischgut, Verdichtungsgrad und resultierenden Hohlraumgehaltes and der eingebauten Deckschicht dargestellt in Abbildung 3-17 verdeutlicht, dass unter Berücksichtigung einer optimalen Verdichtung von 99 bis 101% keine grösseren Abweichungen zwischen Zielhohlraumgehalt an der eingebauten Schicht und dem Zielhohlraumgehalt am Mischgut möglich sind.

3.6 Ermittlung Grenzbereich (AVCA)

Mit dem Verfahren AVCA kann die effektiv mit der Oberfläche verbundene Porosität bestimmt werden. Dabei kann auch ein allfällig eingetragener Schmutzeintrag mitberücksichtigt und aus der Bestimmung entfernt werden. In Abbildung 3-18 ist dazu der zugängliche Hohlraumgehalt in Abhängigkeit des Akustikfaktors dargestellt.

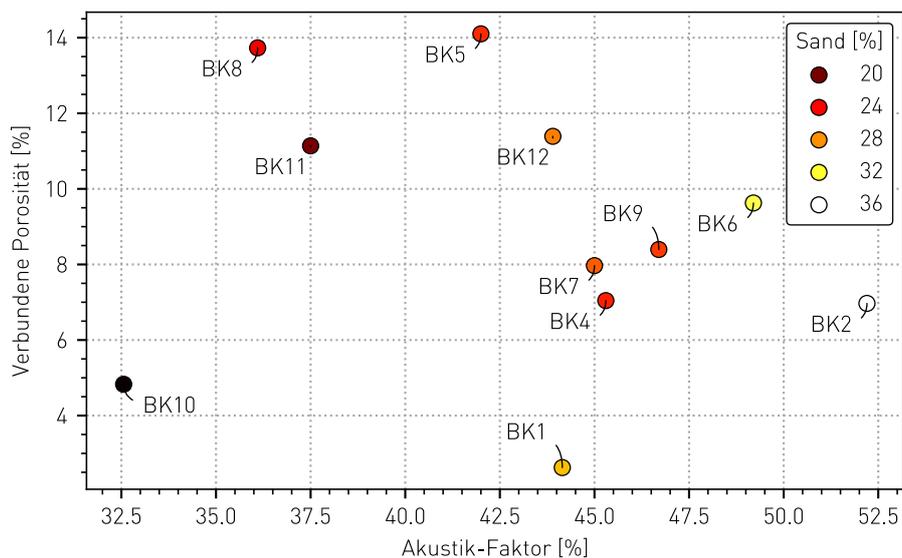


Abbildung 3-18: Ermittlung Grenzbereich verbundene Poren vs. Akustik-Faktor.

Dabei zeigt sich, dass mit zunehmendem Akustik-Faktor in der Tendenz auch weniger effektiv verbundene Poren vorhanden sind. Vergleicht man beispielsweise die Bohrkerne BK2 (AF: 52.2%) mit BK8 (36.1%), kann ein beträchtlicher Unterschied zwischen dem zugänglichen Hohlraumgehalt festgestellt werden. Dabei gibt es aber auch Ausnahmen, wie z. B. der Bohrkern BK10 und der Bohrkern BK1. Der BK10 (Freienbach, Seestrasse, SDA 4-14 2020) weist ein äusserst tiefes Porenvolumen auf. Dies ist ebenfalls in der Abbildung 8-10 ersichtlich. Im Vergleich zu ähnlichen Mischgutzusammensetzungen (z. B. BK11, Abbildung 8-11) lassen sich bereits in der visuellen Inspektion deutlich weniger Hohlräume ausmachen. Ähnliches gilt für den Bohrkern Nr.1.

Insgesamt weist ein Grossteil der untersuchten Beläge mit einem Akustikfaktor >45% eine effektive Porosität von <10% aus. Dies steht im Einklang mit den Erkenntnissen aus dem Kapitel 3.3.3.

Zur Identifikation und der Überprüfung des Grenzbereiches des Füller- und Sandgehaltes wurden die untersuchten Beläge nach ihrem Sand- respektive Füllergehalt gruppiert, um dabei ähnliche Sandgehalte und Füllergehalte mit dem jeweils anderen variierenden Bestandteil zu vergleichen (Beschreibung im Kapitel 2.5).

14. Februar 2023

In der folgenden Abbildung 3-19 ist nun auf der linken Seite die Gesamtporosität, welche effektiv eine Verbindung zur Fahrbahnoberfläche aufweist, gegenüber dem Analysensieb 0.063 mm (Füller) aufgezeigt. Dabei zeigt sich, dass zumindest für die untersuchten Beläge ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Menge an Füller und der effektiv verbundenen Porosität besteht: Je höher der Anteil an zugegebenem Füllergehalt, desto tiefer fällt der Anteil an effektiv zugänglicher Porosität aus.

Auf der rechten Seite der Abbildung 3-19 ist die Gesamtporosität, welche effektiv eine Verbindung zur Fahrbahnoberfläche aufweist gegenüber dem Analysensieb 2.0 mm (Sand) aufgezeigt. Dabei wurde der Füllergehalt möglichst konstant bei ca. 8.3±0.3% gehalten. Die Auswertung zeigt deutlich, dass die Zugänglichkeit massgeblich vom Sandgehalt abhängig ist. Die hypothetische Linie zwischen BK5, BK12, BK6 und BK2 zeigt einen deutlichen Zusammenhang zwischen der effektiven Zugänglichkeit und dem Sandgehalt. Daher sollte der Grenzbereich von 30% Sand-Gehalt möglichst nicht überschritten werden, da die Zugänglichkeit über diesem Wert stark abnehmen kann. Die Bohrkerne BK10 und BK11 passen in dieser Darstellung nicht direkt auf die Linie. Mögliche Gründe sind bereits im oberen Abschnitt erläutert.

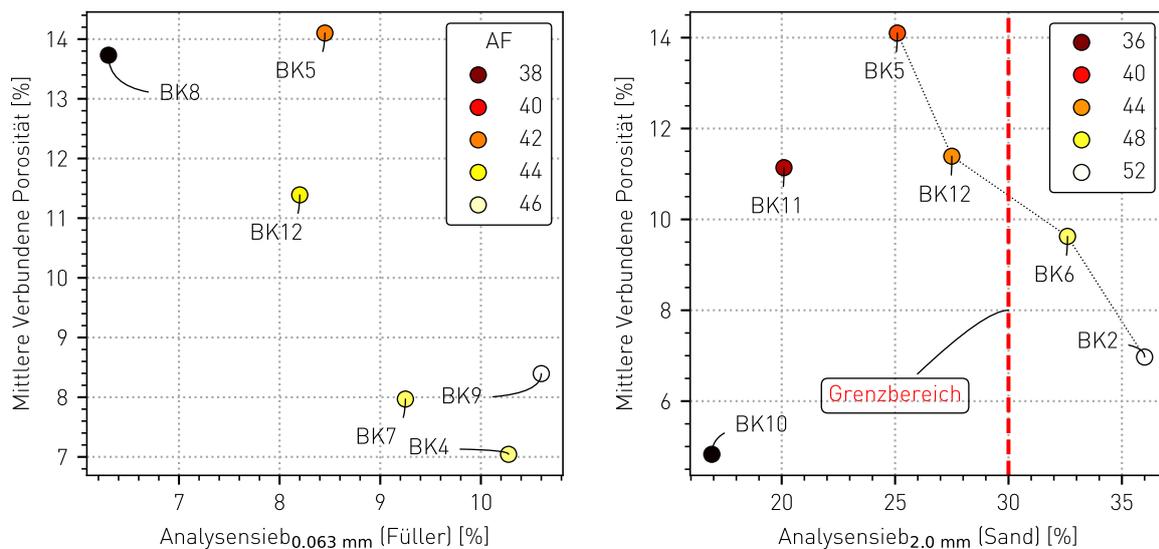


Abbildung 3-19: Identifikation Grenzbereiche Füller- (links) und Sandgehalt (rechts).

3.6.1 Einfluss Porosität auf Akustik

Bezogen auf die Akustik ist der zugängliche HR-Gehalt entscheidend für die Schallabsorptionseigenschaften und somit die akustische Belagsgüte. Dazu ist in der folgenden Abbildung 3-20 der Zusammenhang zwischen der Anzahl an aktiven Poren und dem gemessenen CPX-Pegel bei 1250 Hz dargestellt.

14. Februar 2023

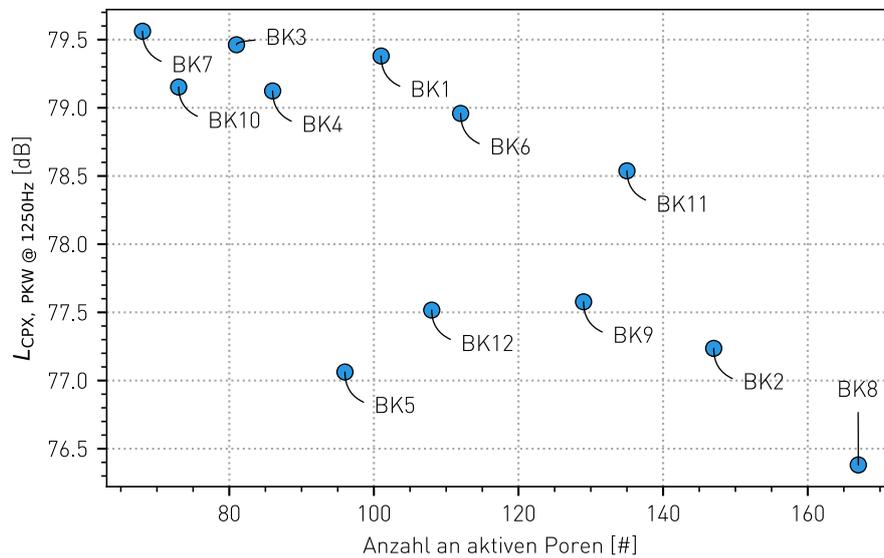


Abbildung 3-20: CPX-Messpegel bei 1250 Hz (PKW-Reifen) und der Anzahl aktiver Poren. Aktive Poren stellen dabei Poren dar, welche von der Oberfläche (Fahrbahn) her zugänglich sind.

3.7 Akustisch optimale Rezepturen

Aus den vorangehenden Erkenntnissen zur Optimierung der Parameterbereiche von SDA Rezepturen in Abschnitt 3.3 lassen sich aus wissenschaftlicher Sicht optimale Rezepturen für lärmindernde SDA ableiten. Diese sind in der Folge beschrieben.

14. Februar 2023

3.7.1 SDA4

Für SDA4-Beläge hat sich gezeigt, dass neben dem Marshall-Hohlraumgehalt auch der Siebkurvenbereich einen wichtigen Einflussfaktor für den Erfolg des lärmarmen Belags darstellt. In der Tabelle 3-4 sind Rezepturvorschläge für eine akustisch optimale Mischung dargestellt. Dieser Belag wird als SDA4-15 bezeichnet. Zum Vergleich sind dazu die bisherigen Kategorien ebenfalls aufgeführt.

Tabelle 3-4: Rezepturvorschläge für optimale Rezepturen für SDA4-Beläge zusammen mit einem Vergleich der verschiedenen Normenvarianten VSS 40 436:2015 und der neuen noch in Vernehmlassung befindlichen VSS 40 436:2021.

Parameter	Vorschlag Rezeptur	VSS 40 436:2019	VSS 40 436:2021 (In Vernehmlassung)	VSS 40 436:2019	VSS 40 436:2021	VSS 40 436:2021*
Bezeichnung	SDA4-15	SDA4-12	SDA4-12	SDA4-16	SDA4-16	SDA4-12/16*
Marshall-HR	13..17	10..14	10..14	14..18	14..18	12..16
Sieb 0.063 mm	6.5..(8.2)..10***	3..12	3..11	3..12	3..11	3..12
Sieb 0.5 mm	10..16	4..24	4..21	4..24	4..21	4..24
Sieb 1 mm	12..20	7..29	7..25	7..29	7..25	7..29
Sieb 2 mm	18..(27)..30****	12..50	12..35	12..50	12..35	12..50
Sieb 4 mm	90..100	90..100	90..100	90..100	90..100	90..100
Akustik-Faktor	< 42** - 47****	-	-	-	-	
BK-HR (Einzelwerte)	12..18%	10..20%		14..24%		
BK-HR (Mittelwerte)	13..17%	10..18%		14..22%		10..18%
Verd-Grad (Einzelwerte)	99 ..102%	≥97%		≥97%		≥97%
Verd-Grad (Mittelwerte)	99 ..102%	≥98%		≥98%		≥98%
Bitmengehalt	≥ 6.0 %	≥ 6.0 %				≥ 6.0 %

* SDA4-12/16: Einbauvariante, welche vor allem in der Ostschweiz als Kompromiss zwischen SDA4-16 und SDA4-12 verwendet wird. Dabei wird die Mischgutkurve eines SDA4-16 eingesetzt und die Toleranzen für die Bohrkerne von SDA4-12 verwendet.

** Optimal

*** Erweiterter Bereich : Nur unter Berücksichtigung der Einschränkungen bezüglich max. Sandgehalt von 27%, sowie Berücksichtigung Marshall-HR-Gehalt. Ggf. Zwischensiebe anzupassen (Sieb 0.5, Sieb 1mm)

**** Nur unter Berücksichtigung der Einschränkungen bezüglich max. Füllergehalt von 8.2%, sowie Berücksichtigung Marshall-HR-Gehalt. Zwischensiebe sind anzupassen (insbesondere Sieb 0.5, Sieb 1mm)

Grafisch dargestellt wird der akustisch optimale Vorschlag (SDA4-15) bei den Siebkurven eine deutliche Einengung nach sich ziehen. Dieser Bereich ist in der folgenden Abbildung 3-21 dargestellt.

14. Februar 2023

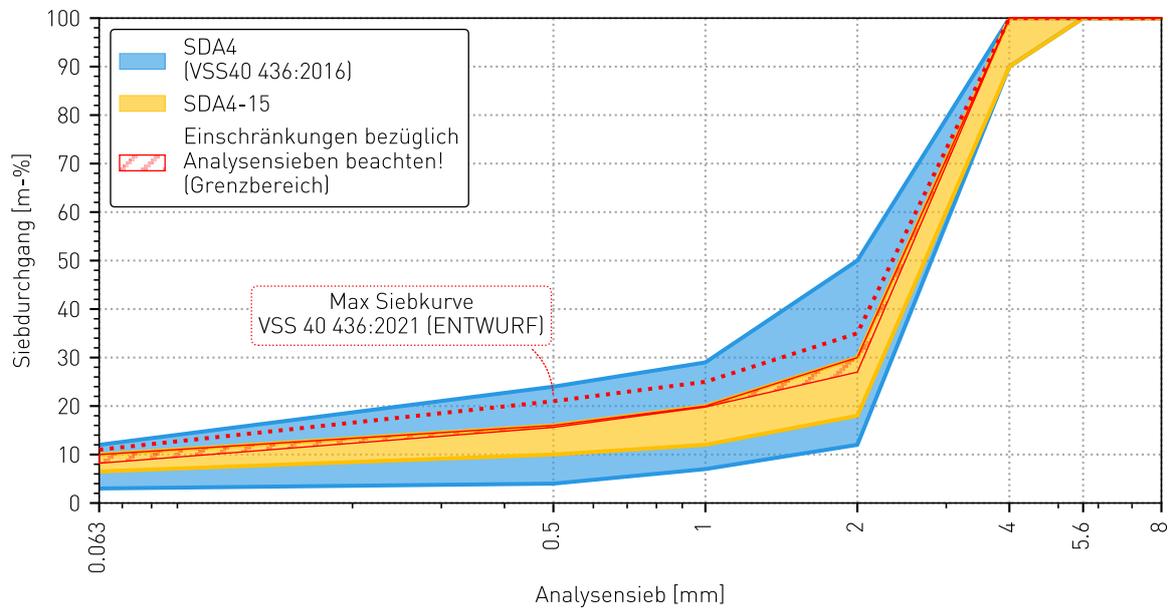


Abbildung 3-21: Illustration Analysensiebe mit angepassten Siebkurvenbereichen des akustisch optimalen SDA4-Belags. Rot gestrichelt ist die vorgeschlagene Normanpassung VSS 40 436:2021 dargestellt, welche sich aktuell noch in der Vernehmlassung befindet.

14. Februar 2023

3.7.2 SDA8

Für die 8er Beläge konnte aus den Erkenntnissen des Kapitels 3 ebenfalls gezeigt werden, dass eine akustisch optimale Mischung eher einen höheren Marshall-HR aufweisen sollte. Um dies zu erreichen, wird die folgende und in Tabelle 3-5 dargestellte Mischung vorgeschlagen.

Tabelle 3-5: Rezepturvorschläge für optimale Rezepturen für SDA8-Beläge.

Parameter	Vorschlag Rezeptur	VSS 40 436:2019	VSS 40 436:2021*	VSS 40 436:2015	VSS 40 436:2021*
Bezeichnung	SDA8-15	SDA8-12	SDA8-12	SDA8-16	SDA8-16
Marshall-HR	13..17	10..14	10..14	14..18	14..18
Sieb 0.063 mm	4..8	3..12	3..11	3..12	3..11
Sieb 0.5 mm	6..12	4..21	4..14	4..21	4..14
Sieb 1 mm	7..17	7..26	7..18	7..26	7..18
Sieb 2 mm	10..22	10..35	10..25	10..35	10..25
Sieb 4 mm	20..33	15..52	15..35	15..52	15..35
Sieb 5.6 mm	50..70	50..70	50..70	50..70	50..70
Sieb 8 mm	90..100	90..100	90..100	90..100	90..100
Akustik-Faktor	<27.5	-	-		-
BK-HR (Einzelwerte)	12..18%	10..20%		13..23%	
BK-HR (Mittelwerte)	13..17%	10..18%		14..20%	
Verd-Grad (Einzelwerte)	98 ..102%	≥97%		≥97%	
Verd-Grad (Mittelwerte)	98 ..102%	≥98%		≥98%	
Bitmengehalt	≥ 6.0%	≥ 6.0 %		≥ 5.8%	

* In Vernehmlassung

Die Anpassung der Siebkurve ist in Abbildung 3-22 graphisch dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die vorgesehene Anpassung der Norm VSS 40 436:2021, welche sich noch in der Vernehmlassung befindet, eigentlich den Bereich des SDA8-15-Belages abdeckt. Der Unterschied der vorgeschlagenen Mischung ist somit gering und beschränkt sich im Wesentlichen auf eine Anpassung des Mischgut-Hohlraumgehaltes sowie der Toleranzen beim Einbau (Verdichtungsgrad/ Bohrkern- Hohlraumgehalte).

14. Februar 2023

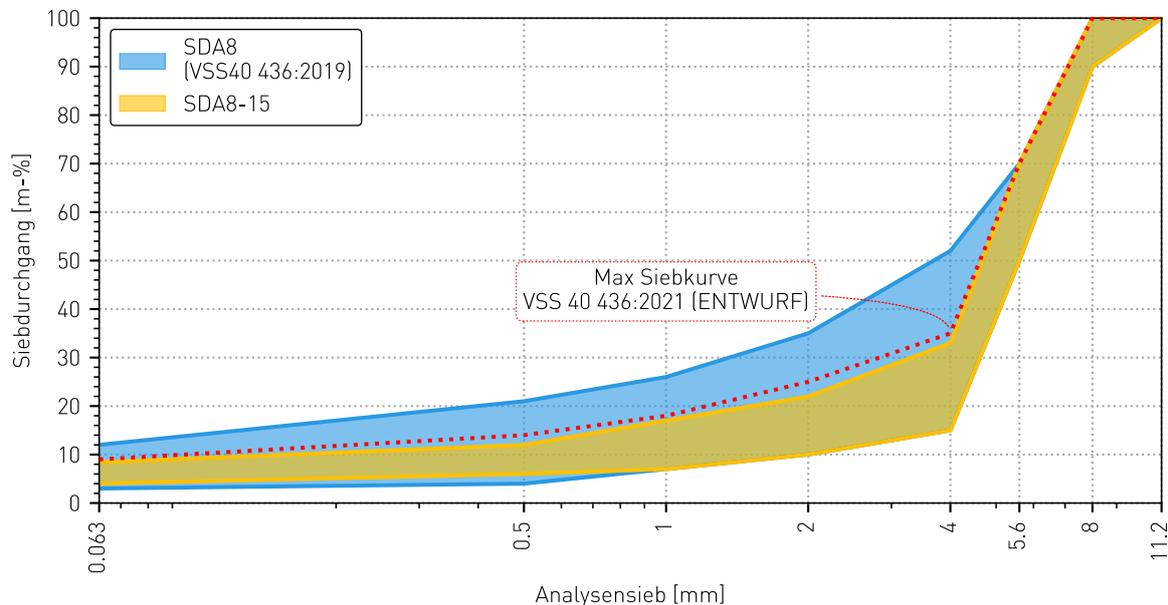


Abbildung 3-22: Vorschlag für die Anpassung Siebkurvenbereiche für 8er Beläge. Die bisher gültigen Norm-Kurven (VSS 40 436:2019) sind dabei in blau dargestellt. Der Vorschlag zur Norm VSS 40 436:2021 ist in Rot dargestellt.

3.8 Präzisierung Grenzbereiche

Wie bereits in der Regel VSS 40 436:2015 definiert, sind auch die vorgeschlagenen Mischgutmaturen im Kapitel 3.7 relativ breit gehalten. Für den akustischen Erfolg der Schicht sollten aber zusätzlich die Parameter gemäss Tabelle 3-4 respektive Tabelle 3-5 umgesetzt werden. Dabei sollte das ein günstiges Verhältnis zwischen den einzelnen Kornfraktionen eingehalten werden. Die Analyse gemäss Abbildung 3-6 zeigte, dass für 4er-Beläge ein Verhältnis von 2:1 (Füller-Sand) gute akustische Ergebnisse verspricht. Das bedeutet aber auch, dass man sich nicht komplett frei in den vorgeschlagenen Mischgutkurven bewegen sollte. Denn es ist auch mit den vorgeschlagenen Mischgutkurven möglich einen Marshall-HR-Gehalt zwischen 12.9% und 19.5% zu erzielen. Folglich muss die Mischgutkurve z.B. beim maximalen Füllergehalt in den grösseren Kornfraktionen angepasst werden, um den Ziel-HR-Gehalt am Marshall Prüfkörper zu erfüllen. Dieser Umstand ist für 4er Beläge in der folgenden Abbildung 3-23 dargestellt. Aus dieser Abbildung 3-23 kann abgeleitet werden, dass mit einem erhöhten Füllergehalt eine Anpassung der höheren Kornfraktionen erforderlich ist. Andernfalls können die Bedingungen für den akustische optimierten Belag (SDA4-15) nicht eingehalten werden. Umgekehrt ist ebenso bei maximalem Sandgehalt eine deutliche Einschränkung im Füllergehalt nötig (Maximum ca. 8.2%).

14. Februar 2023

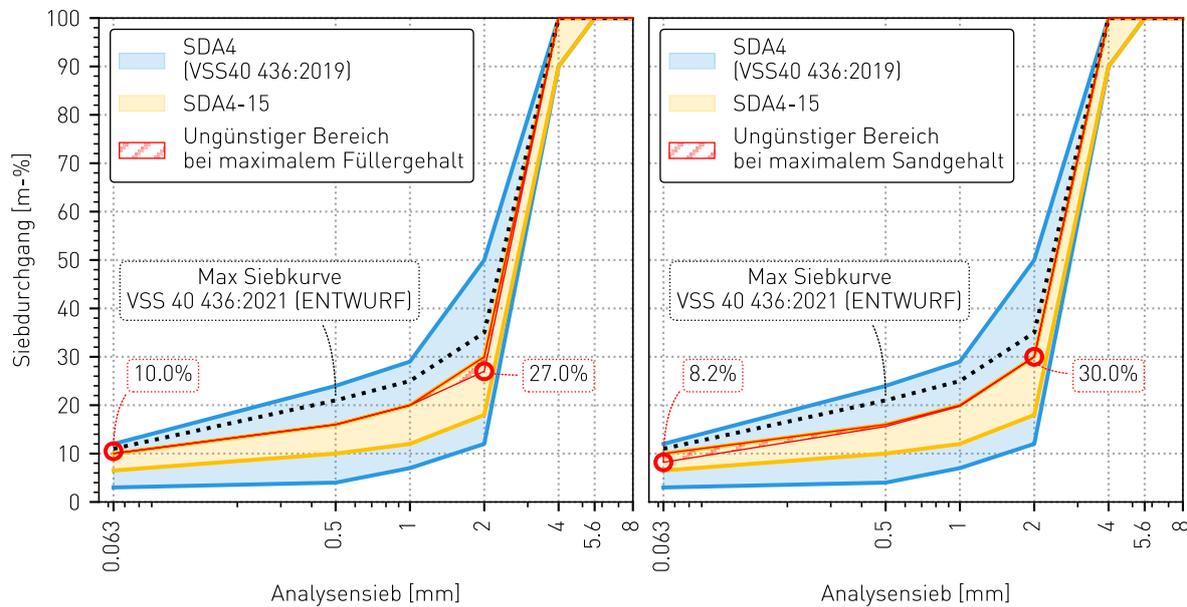


Abbildung 3-23: Links: Maximal mögliche Siebkurve bei maximale Füllergehalt. Rechts: Maximal mögliche Siebkurve bei maximalen Sandgehalt für 4er Beläge.

Umgerechnet auf den Akustik-Faktor entsprechen diese beiden Kurven einem Akustik-Faktor von einem Bereich knapp unter 47. Diese beiden Zahlen stellen somit einen Grenzbereich dar, in welchem erhöhte Vorsicht bei der Zusammensetzung des Mischguts geboten ist, um verbundene Poren in der eingebauten Deckschicht immer noch garantieren zu können.

14. Februar 2023

4. Variantenstudium Normierung

Der Einsatz von lärmindernden Deckschichten hat den Schutz der Bevölkerung vor übermässigem Lärm zum Ziel. Damit der gezielte Einsatz der Deckschichten zum gewünschten Ergebnis führt, ist sicherzustellen, dass die eingebauten Deckschichten auch das halten, was sie versprechen. Denn als Massnahme an der Quelle sind lärmarme Deckschichten ein zentrales Element in der Schweiz und ist als solches auch im nationalen Massnahmenplan verankert. [13] Daher wird in diesem Kapitel eine Erfolgswahrscheinlichkeit für diese normierten Deckschichten berechnet. Dabei soll insbesondere aufgezeigt werden, dass die akustisch optimalen Mischungen, welche in dem vorhergehenden Kapitel 3 ermittelt wurden, auch wirklich funktionieren.

4.1 Kategorisierung SDA-Belägen und Erfolgswahrscheinlichkeiten

Für die Auswirkungen der angepassten Normbereiche wurden die Beläge im Neuzustand anhand der Norm VSS SNR 640 425:2013 [10] respektive der Vorgabe in Tabelle 2-1 klassiert. Das heisst, dass es sich bei eingebauten Deckschichten um Beläge der Kategorie *Erfolgsversprechend* handeln sollte. Alle diese Beläge wurden als akustisch gut behandelt. Die restlichen Beläge, welche nicht diesem Kriterium entsprechen, werden als *Lärminderung unzureichend* behandelt. Damit lassen sich verschiedene Varianten direkt miteinander vergleichen.

4.1.1 4er Beläge

Bereits in den früheren Kapiteln konnte aufgezeigt werden, dass die akustische Leistung der Beläge in der Kategorie SDA4-12 nicht optimal sein kann. Die Auswertung anhand der Klassierung der Deckschichten in die beiden Kategorien «gut» und «Lärminderung unzureichend» offenbart diesen Sachverhalt sehr deutlich und wird in der Abbildung 4-1 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass in der Kategorie SDA4-12 nur etwas mehr als die Hälfte der Beläge (56.6%) das Kriterium erfüllen konnten. Bei der hohlraumreicheren Variante SDA4-16 ist der Anteil der akustisch guten Beläge etwas höher (65.5%). Mit der akustisch optimierten Variante konnte der Anteil sogar auf 72.4% erhöht werden. Somit konnte die Versagenswahrscheinlichkeit im Vergleich zur konventionellen Kategorie SDA4-12 um gut die Hälfte reduziert werden.

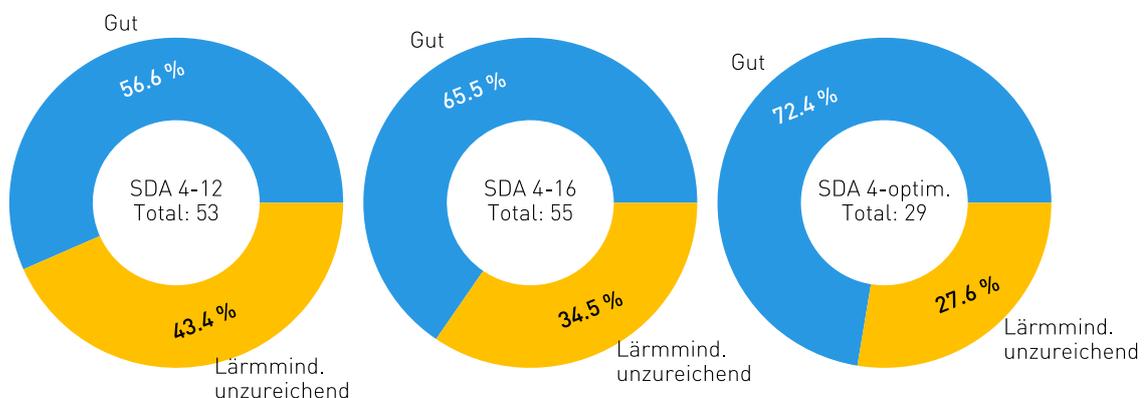


Abbildung 4-1: Vergleich der Erfolgswahrscheinlichkeiten verschiedener 4er – Belagsrezepturen.

Dennoch gibt es auch in der «optimierten Mischung» immer noch knapp 27.6% der Beläge, welche die akustische Leistung nicht wunschgemäss erfüllen. Diesem Umstand wurde näher nachgegangen, und

14. Februar 2023

es wurde untersucht, ob noch weitere zur Verfügung stehende (Bau-) Parameter eine Erklärung dafür liefern könnten. Dazu wurden zwischen den beiden Gruppen «Gut» und «Lärminderung unzureichend» ein statistischer t-Test mit zwei Stichproben durchgeführt. Bei diesem Test werden die beiden Gruppen miteinander verglichen und allfällige statistisch signifikante Unterschiede werden aufgezeigt. In der Tabelle 4-1 ist das Resultat dieses Tests aufgezeigt.

Tabelle 4-1: Statistischer Zwei-Stichproben T-Test zwischen den Gruppen *Bewährt (unzureichende Beläge)* und *Gut* der optimierten 4er-Beläge zur Prüfung der Signifikanz verbleibender Parameter.

Parameter	pvalue	Mittelwert Gut	Mittelwert Bewährt (unzureichende Beläge)	Signifikanz?
MV8	0.002	-6.7	-5.5	True
CPXcar315TK	0.477	61.4	61.6	False
CPXcar1000TK	0.000	75.7	77.5	True
CPXcar800TK	0.000	75.5	77.6	True
CPXcar2000TK	0.050	73.2	74.5	True
CPXcar2500TK	0.050	69.1	70.5	True
CPXcarTK	0.000	85.0	86.0	True
Sieb_0063	0.783	8.2	8.1	False
Sieb_1	0.823	17.0	16.8	False
Sieb_2	0.626	25.4	24.6	False
Sieb_4	0.185	91.0	88.0	False
MarshallHR	0.839	14.8	14.7	False
AF	0.507	41.9	40.7	False
Löslicher_Anteil_Bindemittel	0.715	6.1	6.2	False
BKHR	0.524	15.2	14.7	False
VerdGrad	0.648	100.0	99.9	False
Sieb2_1	0.569	8.4	7.8	False
Sieb1_05		3.4	3.4	False
Sieb4_2	0.419	65.5	63.4	False
Sieb05_0063		5.4	5.3	False
Sieb2_0063	0.709	17.2	16.5	False
Mischguttemperatur		161.8	159.0	False

Dabei zeigt sich deutlich, dass sich zwar akustisch signifikante Unterschiede finden lassen, sich diese aber nicht in jedem Frequenzbereich zeigen. Besonders deutlich zeigt sich die akustische Wirkung der Beläge im mittleren und hohen Frequenzbereich. So beträgt der Mittelwert bei der mittleren CPX-Frequenz von 1000 Hz in der Kategorie «gut» nur gerade 75.7 dB, während sie in der Kategorie «Lärminderung unzureichend» 77.6 dB beträgt. Somit fällt die akustische Lärminderung in dieser Kategorie knapp 2 dB besser aus. Interessant ist, dass in der tiefsten CPX-Frequenz kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Gruppen gefunden werden konnte. Das heisst, dass sich in Bezug auf die Textur keine markanten Unterschiede zeigen.

14. Februar 2023

Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, sind in Bezug auf die verfügbaren Bauparameter keine Unterschiede feststellbar. Das wiederum bedeutet, dass die verbleibenden Unterschiede noch nicht abschliessend geklärt werden konnten.

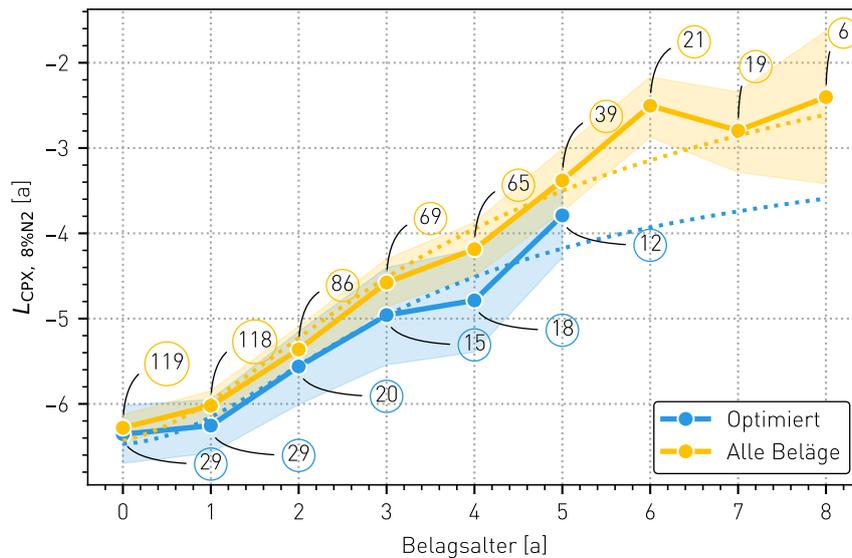


Abbildung 4-2: Alterungsverhalten der optimierten Beläge im Vergleich zu allen Belägen. In den Kreisen ist die zur Verfügung stehende Anzahl an Belägen abgebildet.

4.1.2 8er Beläge

Wie bereits für die 4er Beläge wurde auch für die 8er Beläge der «Erfolgsfaktor» für die unterschiedlichen Mischungen untersucht. Für 8er Beläge ist allerdings ein Anfangswert von -6 dB gemäss der Norm VSS SNR 640 425:2013 [10] respektive der Vorgabe in Tabelle 2-1 unrealistisch. Somit wurde dieser Grenzwert so angesetzt, dass der Anfangswert (PKW-Pneu) mindestens -3 dB betragen sollte. Die Auswertung anhand dieser Kriterien zeigte, dass – ähnlich wie bei den 4er Belägen – im Neuzustand knapp 40% die gewünschte Leistung nicht erfüllen können. Die Situation verbessert sich bei den beiden Kategorien SDA8-16 respektive *SDA8-optim* jedoch markant. Interessanterweise ist der Prozentsatz der *guten* Beläge für die optimierte Mischung bei der Kategorie SDA8-16 geringfügig höher als bei der eigentlich optimierten Kategorie. Da die Datenlage in dieser Kategorie eher dünn ist, unterscheiden sich diese beiden Gruppen um nur gerade einen Belag, der in die jeweilige andere Kategorie fällt.

14. Februar 2023

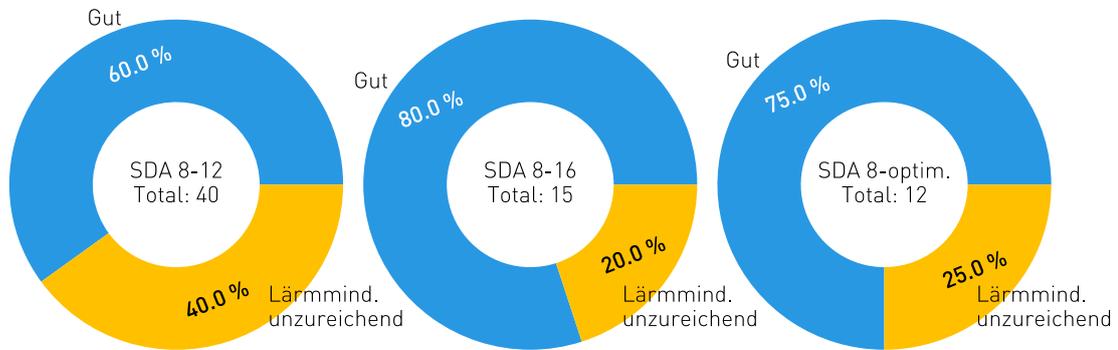


Abbildung 4-3: Illustration der Erfolgswahrscheinlichkeit der verschiedenen Mischungen im Neuzustand für SDA8-12, SDA8-16, sowie der optimierten Kategorie SDA8-optim.

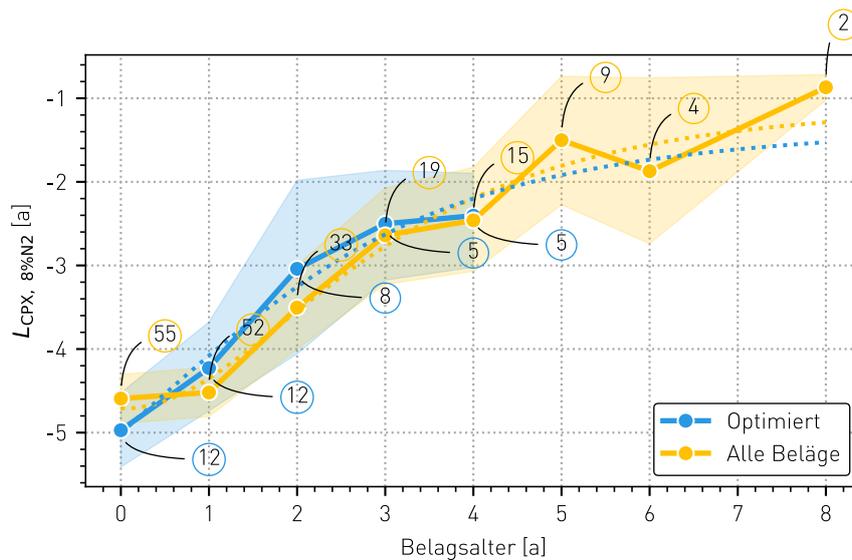


Abbildung 4-4: Alterungsverhalten der optimierten 8er Beläge im Vergleich zu allen Belägen. In den Kreisen ist die zur Verfügung stehende Anzahl an Belägen abgebildet.



4.2 Alternative SDA4-14

In einigen Kantonen kam in den letzten Jahren vermehrt der Einbau einer Zwischenvariante von SDA4-14 Belägen auf. Diese Belagssorte stellt einen Kompromiss zwischen den jetzigen gültigen Normenkategorien von SDA4-12 und SDA4-16 dar. Dabei sollte der Marshall-HR Gehalt am Mischgut zwischen 12 und 16% betragen. Vielfach wird dabei auch gefordert, dass der Belag bei den Bohrkernuntersuchungen in den Toleranzen des SDA4-12 liegt, also der Hohlraumgehalt am Bohrkern (Einzelwerte) zwischen 10 und 20% betragen soll (Mittelwerte: 10-18%). Damit werden etwas strengere Anforderungen an die Verdichtung gestellt und stark unterverdichtete Beläge verhindert.

Aus wissenschaftlicher Sicht geht diese Variante sicherlich in die richtige Richtung, da die 4er-Beläge mit tiefem Hohlraumgehalt (10-12% Marshall-Hohlraumgehalt) nicht mehr erlaubt wären. Gerade diese

14. Februar 2023

Beläge weisen gemäss den Auswertungen der vorhergehenden Kapitel eine hohe «Versagenswahrscheinlichkeit» auf. Allerdings konnte auch gerade in der Abbildung 3-16 (Kapitel 3.4) aufgezeigt werden, dass die Wahrscheinlichkeit für akustisch nicht optimale Beläge im Bereich eines Hohlraumgehalts von ca. 13% immer noch erhöht ist. Deshalb ist auch die Variante der optimierten SDA4-optim. Rezeptur mit einem Marshall-HR-Gehalt von 13-17% entstanden (vgl. Kapitel 4.1.1). Mit der Variante SDA4-14 ist davon auszugehen, dass im unteren Bereich (Marshall-HR Gehalt von 12%) eine etwas erhöhte Wahrscheinlichkeit besteht, einen nicht komplett optimalen SDA4 Belag zu erhalten.

Im Vergleich zwischen dem SDA4-14 und dem *SDA4-optim* sind in der optimierten Variante noch etwas mehr Anforderungen an die Verdichtung gestellt worden. Mit der eingangs erwähnten Forderung, beim *SDA4-14* den Toleranzen eines SDA4-12 am Bohrkern zu entsprechen, geht die Variante SDA4-14 in eine ähnliche Richtung zur in diesem Bericht präsentierten Variante *SDA4-optim*. Diese Forderung deckt sich mit den Erkenntnissen aus diesem Bericht, dass weder eine zu hohe noch eine zu tiefe Verdichtung für die Akustik förderlich ist.

14. Februar 2023

5. Einflussfaktoren Langzeitwirkung

Um die Langzeitwirkung von Belägen besser zu verstehen, ist es wichtig, die grundlegenden Prozesse der Alterung näher zu untersuchen. Die Erfahrung hat gezeigt, dass die Deckschichten ihre akustische Leistung relativ schnell verlieren können. Dies ist die Folge von verschiedenen Prozessen, die ablaufen. Grundsätzlich wirken die lärmarmen Beläge über das aktive Porengefüge, in dem der entstehende Schall durch die Absorptionsmöglichkeit im porösen Gefüge des Belags reduziert wird. Zusätzlich stellt sich, gerade bei den 4er Belägen mit der feinen Oberflächentextur anfänglich ein akustisch gutes Anreungsverhalten des Reifens ein. Mit der Zeit allerdings werden die Poren durch Schmutzeintrag allmählich verstopft. Ebenso ist zu beobachten, dass sich gerade in den Radspuren Kornausbrüche ereignen. Diese führen dazu, dass sich die Radspuren visuell deutlich vom Bereich zwischen den Rädern unterscheiden. Texturmässig führt dies dazu, dass die Belagsoberfläche deutlich rauer wird. Dies führt akustisch zu deutlichen Zunahmen im Bereich der tiefen Frequenzen, was auf Zunahmen hinsichtlich des Vibrationsschalls zurückzuführen ist.

5.1 4er - Beläge

In der Abbildung 4-3 wird das Alterungsverhalten der untersuchten 4er-Beläge dargestellt. Dabei werden die Alterungskurven anhand ihres Marshall-HR Gehalts dargestellt. Ebenfalls ist schwarz gestrichelt der Verlauf des 4er Belags in Muttentz dargestellt. Dieser Belag wurde im *Rahmen des Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts, TP3: Langzeitmonitoring* eingebaut [7]. Es ist deutlich ersichtlich, dass der Anfangswert stark vom Marshall-HR Gehalt abhängt. So erreichen sehr dichte Schichten, wie z. B. die gelbe Linie SDA4-10 (Marshall-HR Gehalt von 8-12 %) im Mischverkehr deutlich schlechtere akustischen Belagsgütwerte als z. B. ein hohlraumreicher SDA4-20. Mit fortschreitendem Alter weisen alle Beläge einen Verlust an akustischer Belagsgüte auf. Dieser Verlust schreitet zwischen den einzelnen HR-Gehaltsklassen bis ca. 6 Jahre nach Einbau mehr oder weniger parallel voran. Nach 6 Jahren zeigte sich für die hohlraumreichen SDA4-16 und SDA4-20 eine starke Zunahme, und die Kurven z. B. von SDA4-14 werden gekreuzt. Allerdings dürfte sich von diesem Punkt an die Zunahme deutlich verlangsamen: Nach 7 Jahren konnte Netto sogar wieder eine Abnahme verzeichnet werden. Dieser Umstand lässt sich dadurch beschreiben, dass in diesem Zustand kaum mehr Poren zur Schallabsorption zur Verfügung stehen dürften. Ebenso gibt es hinsichtlich der Kornausbrüche (tieffrequenter Bereich) eine Stabilisierung.

Im tieffrequenten Bereich zeigt sich, dass die hohlraumreichen Schichten in der Tendenz bereits zu Beginn die höchsten Pegel verzeichnen. Dies dürfte aufgrund der erhöhten Vibrationsanregungen durch die sichtbaren Poren geschehen. Gegen Ende des Belagsalters weisen auch die hohlraumreichen Schichten die schlechtesten Eigenschaften auf. Dies dürfte damit zu erklären sein, dass der Angriff auf die einzelnen Körner bei hohlraumreichen Schichten einfacher geschehen kann, da das bindende Mastixgefüge mit mehr Hohlräumen durchsetzt ist. Mit zunehmenden Kornausbrüchen dürften diese Schichten auch die Tendenz ausweisen, die etwas raueren Oberflächen auszubilden, was sich wiederum negativ auf die tieffrequenten Pegel auswirkt. Umgekehrt ist in den hohen Frequenzen eher der gegenteilige Effekt beobachtbar. Bedingt durch die etwas rauere Oberflächen dürfte die Texturentlüftung etwas begünstigt sein, was sich auf eine gute Entwicklung in den hohen Frequenzbereichen auswirkt.

14. Februar 2023

Insgesamt zeigt sich, dass alle Beläge (auch hohlraumarme, wie z. B. das Beispiel aus Muttentz zeigt) für welche bereits Daten verfügbar sind, spätestens nach 6 Jahren die Grenze von -3 dB überschreiten. Dabei gilt es allerdings zu berücksichtigen, dass die Datengrundlage gerade in diesem Bereich noch relativ dünn ist und um abschliessende Aussagen zu treffen noch weiterer Untersuchungen bedarf. Es wird somit spannend zu beobachten sein, wie sich die Kurven in Zukunft weiterentwickeln. Allerdings gibt es gerade in den einzelnen Frequenzbändern deutliche Anzeichen für eine Stabilisierung oder sogar eine leichte Verbesserung.

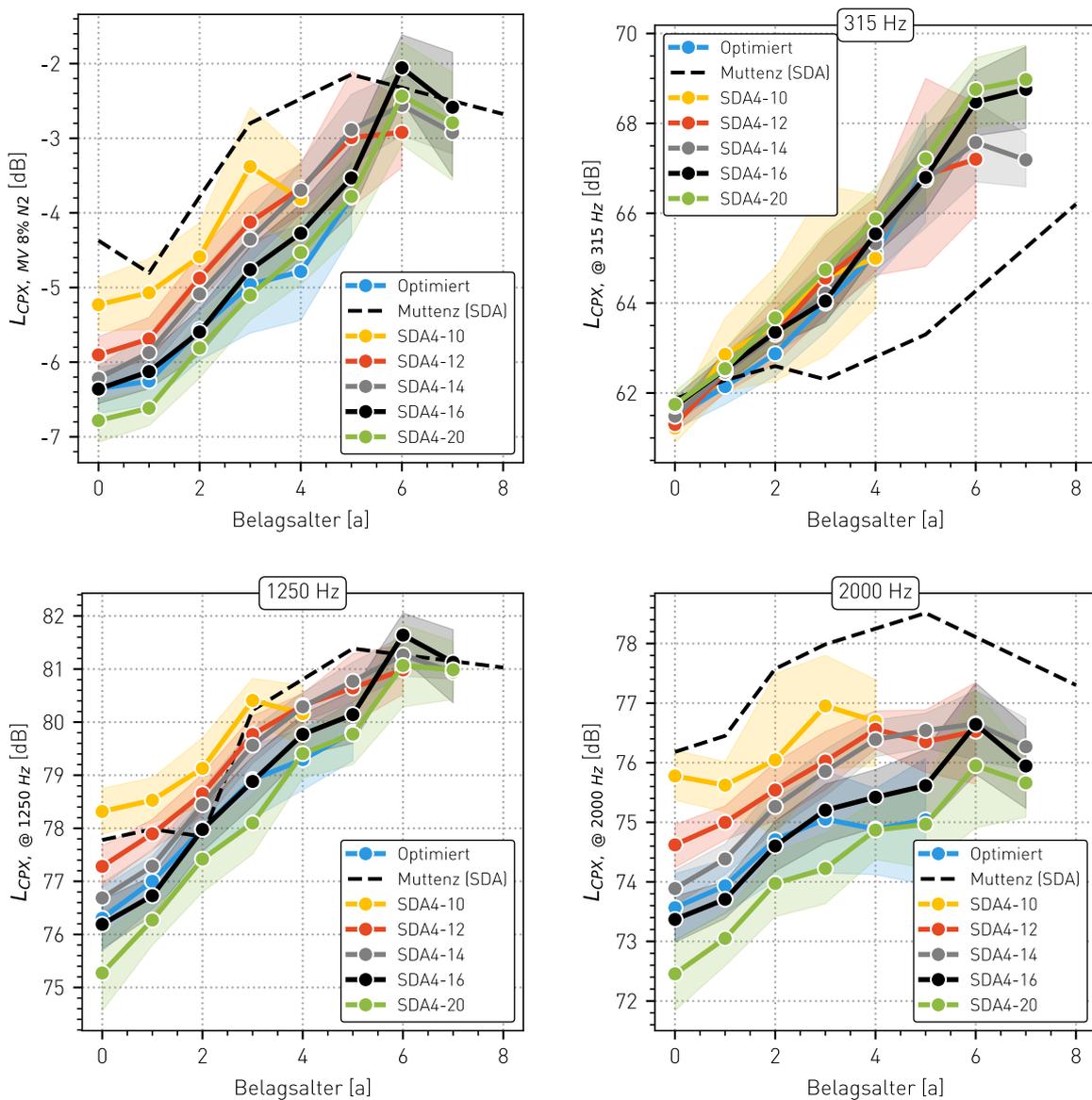


Abbildung 5-1: Zeitliche Entwicklung verschiedener Belagstypen (4er-Beläge) für Mischverkehr (8% N2-Anteil) verschiedene CPX-Frequenzen (315, 1250 und 2000 Hz)

14. Februar 2023

5.2 8er-Beläge

In den folgenden Abbildung 5-2 ist die zeitliche Entwicklung der verschiedenen Belagstypen für 8er Beläge dargestellt. Hier gilt es gleichermassen, wie bei den 4er -Belägen, dass sich in den Anfangsjahren die Belagsgüte in Abhängigkeit der Hohlraumklasse verhält. So sind beispielsweise die hohlraumreichen SDA8-16 Schichten tendenziell die leisesten, während die Schichten mit der Bezeichnung SDA8-10 die höchsten Pegel aufweisen. Dieses Ranking bleibt über die Jahre mehr oder weniger konstant, sodass auch die SDA8-14 respektive SDA8-16 langfristig die besten akustische Belagsgüte verspricht.

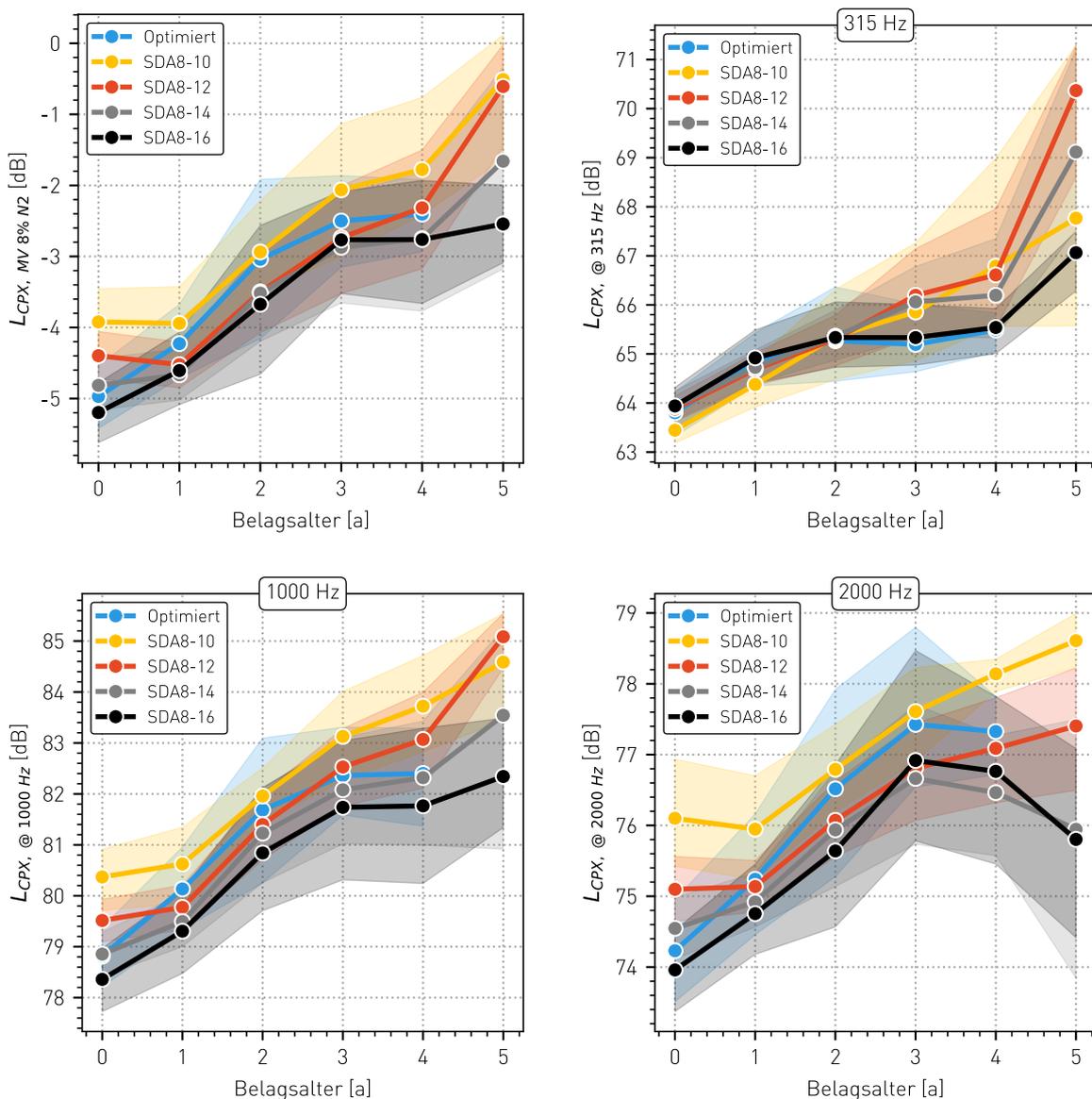


Abbildung 5-2: Zeitliche Entwicklung verschiedener Belagstypen (8er-Beläge) für Mischverkehr (8% N2-Anteil) verschiedene CPX-Frequenzen (315, 1250 und 2000 Hz)

Auffallend ist die starke Zunahme bei ca. 5 Jahren. Diese Zunahme deutet auf grosse Schäden hin.

14. Februar 2023

5.3 Einflussfaktor Höhenlage

Die Datengrundlage erlaubt eine Untersuchung von verschiedenen Einflüssen auf die Belagsalterung. In der Abbildung 5-3 sind für die beiden Belagstypen SDA4 und SDA8 eine Alterungsfunktion für 3 verschiedene Höhenklassen abgebildet. Dabei zeigt sich insbesondere für die 4er Beläge, dass die akustische Alterung in hohen Lagen (>650 M.ü.M.) deutlich schneller voranschreitet. Die typische Stabilisierung setzt dafür auch früher ein.

Für 8er Beläge zeigt sich keine so deutliche Alterungsfunktion, da in dieser Höhenlage im Datensatz nur wenige Daten vorlagen. Allgemein zeigt sich, dass gerade in der Höhenklasse 650 – 1500 m eher wenige Datenpunkte verfügbar sind. Für die 4er Beläge sind es 7 verschiedene Stecken, während es bei 8er Belägen nur gerade eine ist.

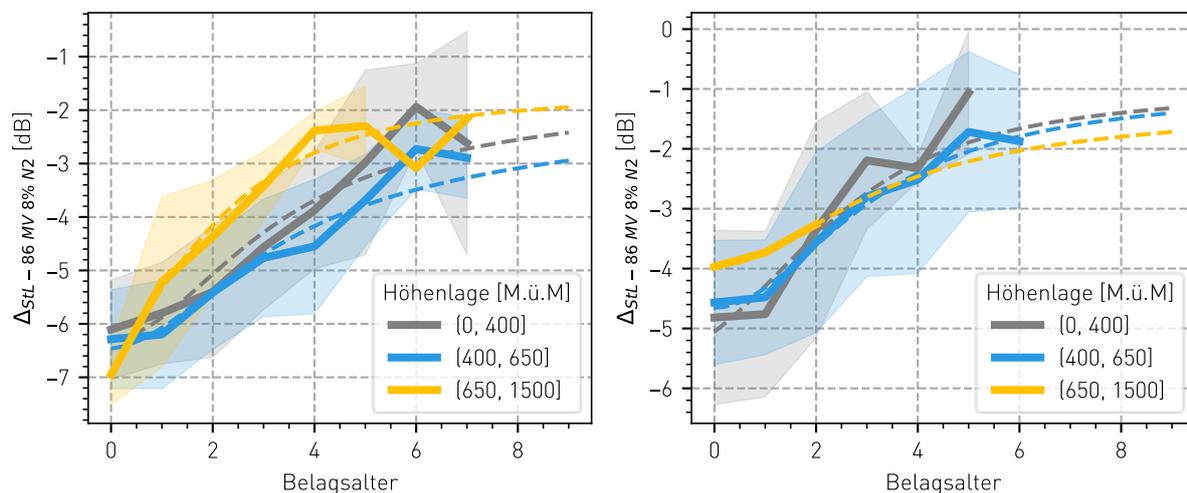


Abbildung 5-3: Einfluss Höhenlage auf die akustische Belagsgüte für 4er Beläge (links) und die 8er Beläge (rechts). Dabei wird die Alterung für verschiedene Höhenstufen dargestellt.

Interessanterweise zeigen sich zwischen den Belägen in der Höhe 0-400m und 400-650m etwas gegenläufige Trends, die die vorhin postulierte Aussage «je höher, desto schneller die Alterung», nicht direkt zulassen. Vielmehr müssen weitere Faktoren einbezogen werden. So konnte zum Beispiel gezeigt werden, dass nicht nur die Höhe selber für die schnelle Alterung verantwortlich ist [14], sondern zum Beispiel auch umliegende hohe Berge/erhöhte Schneelast und damit verbunden ein vermehrter Schneeketteneinsatz auch im Tal.

Ebenso dürfte das lokale Klima und der damit verbundene Einsatz von unterschiedlichen Winterdienstformen (Salzen, Split, Schneeräumung) einen lokal unterschiedlichen Effekt auf die Beläge haben. Dieser Einfluss dürfte sich aber auch auf konventionellen Belägen so abspielen.

5.4 Einflussfaktor Belastungssituation

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor für die Entwicklung der Beläge ist neben ihrer geographischen Lage auch die Belastungssituation. Alle Strassenbeläge sind einer gewissen Alterung ausgesetzt. Diese Alterung wird durch die Beanspruchung durch den Verkehr verstärkt. Dabei spielt es gerade für 4er Beläge eine Rolle, wie sich der Verkehr zusammensetzt. In Abbildung 5-4 ist die akustische

14. Februar 2023

Belagsalterung (Mischverkehr) für 4er Beläge in Abhängigkeit der täglichen Überrollungen von LKW's für SDA4-12-Beläge dargestellt. Dabei zeigt sich deutlich, dass die Alterung bei einer hohen Schwerverkehrsbelastung ebenfalls stark zunimmt.

Bei den SDA8 – Belägen lässt sich eine solche Tendenz nur schwächer erahnen. Aber es zeigt sich dennoch, dass die Beläge mit der höchsten Belastung tendenziell ebenfalls am schlechtesten abschneiden. (Vgl. Abbildung 5-5).

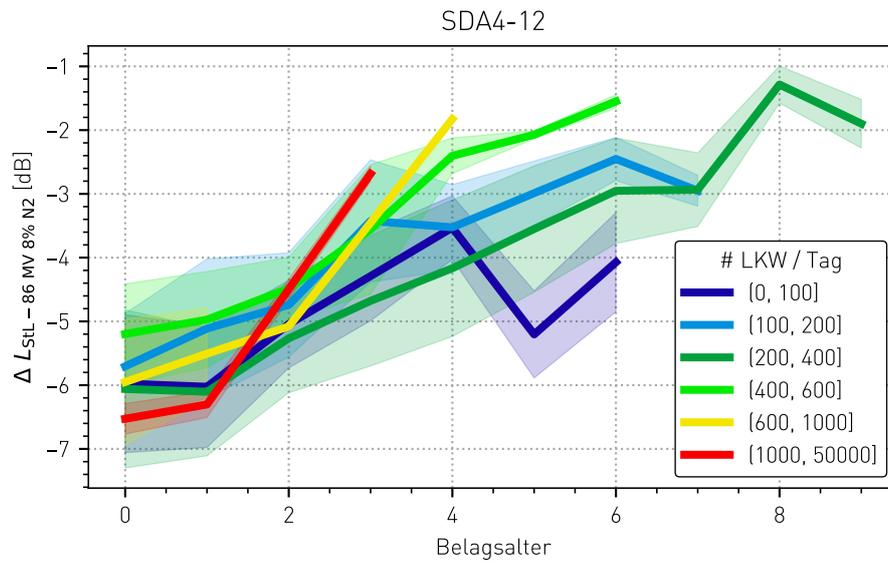
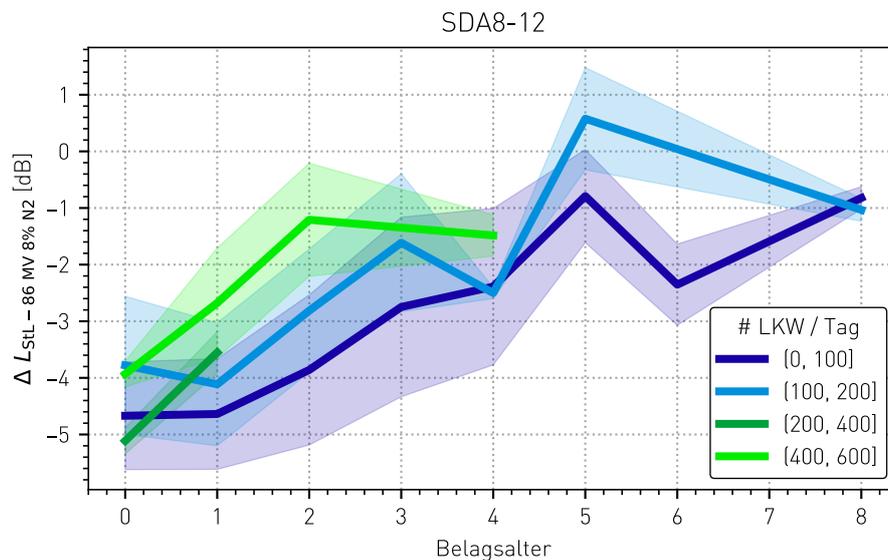


Abbildung 5-4: Alterungsverhalten von SDA4-12 Deckschichten in Abhängigkeit ihrer Belastung, ausgedrückt in Überrollungen von Schwerverkehr (N2).

Ähnlich, wenn auch nicht so ausgeprägt, lässt sich dies für 8er Beläge aufzeigen. Dort zeigt sich ebenfalls, dass die Alterung bei tiefer Schwerverkehrsbelastung weniger schnell voranschreitet.



14. Februar 2023

Abbildung 5-5: Alterungsverhalten von SDA8-12 Deckschichten in Abhängigkeit ihrer Belastung, ausgedrückt in Überrollungen von Schwerverkehr (N2).

5.5 Mittlere Wirkung

Die Erfahrung mit lärmarmen Belägen hat gezeigt, dass die anfängliche Wirkung mit der Zeit relativ schnell abnehmen kann. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass mit den lärmarmen Deckschichten aktiv Lärmschutz betrieben werden kann. Das heisst, dass neben dem Endwert (am Ende der Lebensdauer) auch die mittlere Wirkung während der Lebensdauer berücksichtigt werden sollte. Die Berechnung der mittleren Wirkung erfolgte in der folgenden Abbildung 5-6, wobei sich die mittlere Wirkung auf die Lebensjahre 0 bis und mit 7 des Belags beziehen.

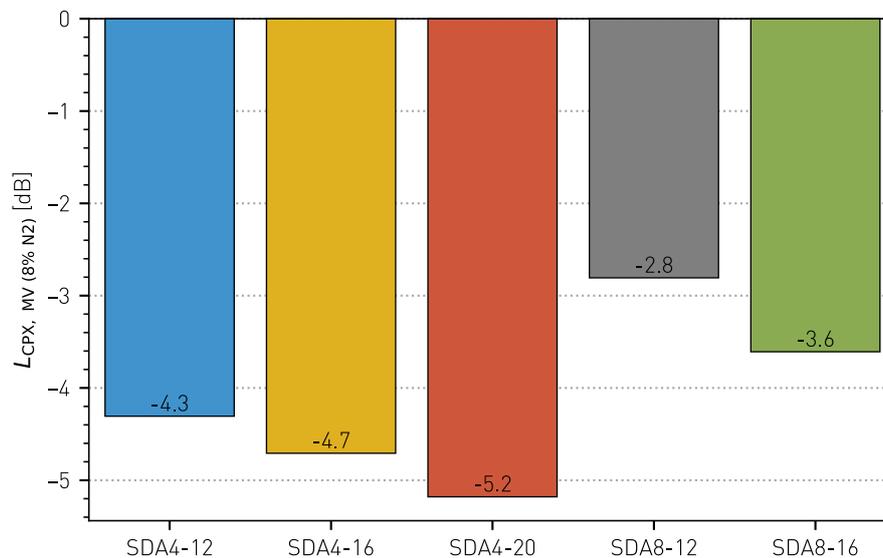


Abbildung 5-6: Mittlere Belagswirkung verschiedener SDA-Beläge über die ersten 7 Jahre.

Wie in der Grafik ersichtlich, zeigt sich wiederum je nach Hohlraumklasse eine unterschiedliche mittlere Belagswirkung über die ersten 7 Jahre. Dabei nimmt die mittlere Wirkung mit zunehmendem Hohlraumgehalt zu (ca. 0.4 dB / 4% Marshall-HR Gehalt). Dies deckt sich mit den Erkenntnissen aus den vorhergehenden Kapiteln betreffend Alterung.

Damit diese Art der Betrachtung einer mittleren Wirkung allerdings weitergeführt werden kann, ist es zwingend nötig, auch ältere Beläge weiter im Belagsmonitoring zu untersuchen.

14. Februar 2023

6. Auswirkungen der Norm VSS 40 436:2021

Im November 2021, und damit während der Laufzeit dieses Projektes, ist die neue Norm VSS40 436:2021 zur Prüfung vorgelegt worden. Darin sind die breit definierten Mischgutkurven deutlich eingengt worden. Dies ist bereits in der Abbildung 3-4 dargestellt worden. Aus der Sicht der Erkenntnisse dieses Projektes geht diese Anpassung sicherlich in die richtige Richtung und dürfte dazu beitragen, nicht wunschgemäss funktionierende Beläge zu verhindern.

Wie in diesem Projekt gezeigt werden konnte, ist eine weitere Eingrenzung für die Siebkurven durchaus angebracht um die akustische Zielerreichung der SDA-Beläge sicherzustellen. Für diese erneute Eingrenzung braucht es aber zusätzliche Untersuchungen zur technischen Machbarkeit und der Normverträglichkeit in Bezug auf die gültigen EU-Normen unter Berücksichtigung der Toleranzen. Ebenso haben die Einschränkungen auch Auswirkungen in Bezug auf die Langlebigkeit der Beläge. Die Daten in diesem Projekt deuten allerdings auf eine verbesserte akustische Leistung in der ersten Lebensphase der Beläge hin. Wie sich diese akustische Leistung aber in der zweiten Lebensphase entwickelt, ist jetzt noch nicht klar.

14. Februar 2023

7. Schlussfolgerungen

Im Rahmen des Projekts «Präzisierung Akustik SDA-Beläge» wurden verschiedene interessante Zusammenhänge der Bautechnik und der Akustik verbunden. So konnten die nachfolgenden Empfehlungen für die weitere Präzisierung lärmarmen SDA Rezepturen für den Einsatz im Innerortsbereich herbeigeführt werden. Für den Einsatz von SDA als lärmindernde Deckschicht auf Autobahnen wird eine gezielte Optimierung der Rezepturen für diesen Geschwindigkeitsbereich empfohlen.

Einbauparameter entscheidend: Die Untersuchung hat gezeigt, dass die resultierende akustische Belagsgüte primär von der Mischung und der Einbaupraxis abhängt. Mit der Kontrolle und dem Fokus auf das Mischgut und die Einbauparameter kann also präzisiert werden, welche Eigenschaften ein Belag aufweisen sollte.

Ebenso konnte gezeigt werden, dass die Schichtdicke einen Einfluss auf die resultierende Belagsgüte hat. Dieser Einfluss zeigte sich vor allem im hochfrequenten Bereich.

Dabei konnte aufgezeigt werden, dass die **Verhältnisse des Akustik-Faktors** eine **sinnvolle Annäherung** für das optimale Verhältnis zwischen Füller und Sand darstellen.

Anpassungen Siebkurven sinnvoll: Die Untersuchung konnte aufzeigen, dass die normierten Kurven (zumindest VSS 40 436:2019) deutlich zu breit sind. Mit der sich in der Vernehmlassung befindlichen Norm VSS 40 436:2021 ist jedoch eine Norm in Vorbereitung, welche die Siebkurvenbereiche deutlich einschränkt und aus wissenschaftlicher Sicht in die richtige Richtung geht. Die Analysen dieser Studie zeigten aber, dass die geplante Einschränkung der Siebkurvenbereiche nicht komplett ausreicht, um einen akustisch optimalen Belag herzustellen und die akustische Erfolgsquote zu erhöhen.

Einfluss Hohlraumgehalt: Die Analyse der Bauparameter gekoppelt mit der Akustik konnte aufzeigen, dass es in den jetzigen Normkategorien (SDAX-12) gerade im unteren Hohlraumbereich deutliche Tendenzen zu «akustischem Versagen» eines Belags gibt. Dies bedeutet, dass ein Belag sein Potential nicht optimal ausschöpfen kann und auch unter die Definition gemäss VSS SNR 640 425:2013 [10] fällt. Dabei ist sowohl für 4er- wie auch 8er-Beläge der kritische Hohlraumgehalt von ca. 13%-Marshall-HR Gehalt (gemessen mit dem volumetrischen Verfahren) als Grenze ausgemacht worden, bei welcher die «Versagenswahrscheinlichkeit» deutlich abnimmt. Für lärmarme SDA im Innerortsbereich wird empfohlen in der Normierung 13% als untere Grenze für den Hohlraumgehalt am Mischgut festzulegen.

Die aktuelle Praxis einiger Kantone mit dem Einbau von **SDA4-14 (auch bekannt unter SDA4-12/16)** Belägen geht aus wissenschaftlicher Sicht folglich in die richtige Richtung, um akustisch optimale Bedingungen zu erhalten. Dabei handelt es sich um Beläge mit einem Mischgut, das den Anforderungen eines SDA4-16, aber den Bohrkernanforderungen eines SDA4-12 entspricht. Diese nicht normierte Lösung müsste aber dauerhaft mit der vorliegend ermittelten optimierten Siebkurve in der Norm abgebildet werden, damit dies auch flächendeckend umgesetzt werden kann und nicht nur dort, wo es die administrativen/politischen Umstände ermöglichen. Denn nicht jeder Strasseneigentümer kann von den Normvorgaben abweichen.

Akustisch optimale SDA-Beläge: Im Projekt konnte gezeigt werden, dass die «Erfolgswahrscheinlichkeit» von Belägen deutlich erhöht werden kann, wenn neben den Einschränkungen der Mischgutkurven zusätzlich die Bedingungen zum Marshall-HR-Gehalt geändert werden. So ist ein akustisch optimaler

14. Februar 2023

Belag *SDAX-15*, oder *SDAX-optim*. definiert worden. Diese Beläge charakterisieren sich hauptsächlich durch ihren Marshall-Hohlraumgehalt von 13- 17%, welche damit ebenfalls zwischen den jetzigen Kategorien von 12 und 16 zu liegen kommen.

Langzeitwirkung Beläge: Hinsichtlich der Langzeitwirkung der Beläge konnte gezeigt werden, dass die Beläge allesamt einer gewissen Alterung unterliegen. Dabei sind unterschiedliche Alterungsprozesse für die Alterung verantwortlich. Bei den porenreichen Belägen spielt die Verstopfung eine massgebliche Rolle beim Verlust der Belagsgüte. Es zeigte sich jedoch, dass auch sehr dichte und hohlraumarme SDA-Beläge mit der Zeit deutlich an akustischer Belagsgüte einbüßen. Dies geschieht in allen CPX-Terzbändern. Es konnte zudem festgestellt werden, dass hohlraumreiche Schichten im Vergleich zu ihren dichteren Alternativen im Mittel über eine längere Zeit die bessere akustische Belagsgüte aufweisen. Die Langzeitwirkung der Beläge dürfte sich gemäss den Erkenntnissen dieser Studie für 4er Beläge im Mittel zwischen -2 und -3 dB (Mischverkehr, 8% N2-Anteil) einpendeln. Die SDA8 – Beläge kommen dabei wohl auf eine Endwirkung zwischen -1 und -2 dB.

Es zeigte sich, dass eine erhöhte Verkehrsbelastung (vor allem die Befahrung von schweren Fahrzeugen, N2) den Alterungsprozess der lärmarmen Deckschichten zu beschleunigen scheint. Ebenso ist die geographische Lage für die Alterung entscheidend. Dabei konnte vor allem für die SDA4-Beläge aufgezeigt werden, dass Deckschichten in höheren Lagen (>650 M.ü.M.) tendenziell schneller altern. Allerdings zeigte sich auch bei diesen Deckschichten eine Stabilisierung nach einer gewissen Zeit.

Weiterer Forschungsbedarf: Wie bereits mehrfach aufgezeigt, ist die Basis der Untersuchungen jeweils die Weiterführung der akustischen Messungen der verschiedenen Belagsmonitorings. Denn nur so kann die bereits gut verfügbare Datengrundlage optimal genutzt und erhalten werden. Dies ist insbesondere auch bei älteren Belägen äusserst wertvoll, da diese in diesem Projekt eher wenig vertreten waren. Das Resultat dieses Monitorings lässt deutlich umfangreichere Datenauswertungen zu. Vorstellbar wären dabei sicherlich die akustischen Messungen mindestens nach Einbau und dann in mehr oder weniger regelmässigen Abständen durchzuführen. Zum Beispiel in 0, 1, 3, 5, 7, 10 und 15 Jahren.

Digitalisierung und konsequente Erfassung Bauparameter: Diese Studie, und dabei insbesondere die Datenaufbereitung, hat aufgezeigt, dass eine systematische und digitalisierte Erfassung der Belagsuntersuchungen von grossem Wert ist. Dabei ist eine bereits digitalisierte und georeferenzierte Erfassung anzustreben. Am besten wird dafür eine Datenbank geschaffen, welche aktuell gehalten und kontinuierlich nachgeführt wird.

14. Februar 2023

8. Literatur

- [1] SNR 640 436:2015, "Semidichtes Mischgut und Deckschichten, Festlegungen, Anforderungen und Konzeption." p. 16, 2013.
- [2] VSS 40 436:2019, "Semidichtes Mischgut und Deckschichten, Festlegungen, Anforderungen und Konzeption." .
- [3] U. Bafu, "Lärmbelastung in der Schweiz Lärmbelastung in der Schweiz," 2018.
- [4] Die Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft, *Bundesgesetz über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz, USG)*. 1983.
- [5] H. Pestalozzi, H.-J. Grolimund, and C. Angst, "Lärmarme Strassenbeläge innerorts Statusbericht 2003," 2004.
- [6] C. Angst, F. Beltzung, D. Bosshardt, H.-J. Grolimund, and H. Pestalozzi, "Lärmarme Strassenbeläge innerorts Schlussbericht 2007," Bern, 2007.
- [7] E. Bühlmann, P. Bürgisser, T. Ziegler, C. Angst, and T. Beckenbauer, "Forschungspaket lärmarme Beläge Innerorts - Teilprojekt (TP) 3: Langzeitmonitoring," 2017.
- [8] C. Angst, P. Bürgisser, and T. Beckenbauer, "Forschungspaket Lärmarme Beläge innerorts EP 2 Labortechnische Bestimmung der Dauerhaftigkeit lärmarmen Beläge," 2016.
- [9] P. Rychen, M. Pittet, M.-A. Féart, and A. G. Dumont, "Paquet de recherche : Revêtements peu bruyants EP1 : Formulation des revêtements peu bruyants," 2016.
- [10] VSS, "VSS-640425 Lärmindernde Decken - Grundlagen." 2013.
- [11] E. Bühlmann, E. Hammer, N. Bueche, and J. Perret, "Ausführungsbestimmungen Akustik für semidichte Asphalte - Auswertung physischer Parameter (in German and French)," 2017.
- [12] ASTRA und BAFU, "Leitfaden Strassenlärm," p. 46, 2006.
- [13] Schweizerischer Bundesrat, "Nationaler Massnahmenplan zur Verringerung der Lärmbelastung Bericht des Bundesrats in Erfüllung des Postulats 15 . 3840 Barazzone," no. September 2015, pp. 1–39, 2017.
- [14] E. Bühlmann, M. Dias, and S. Steiner, "Influence of environment- and traffic-related factors on acoustic ageing of low-noise road surfaces in Switzerland," in *Proceedings of Euronoise 2015, Maastricht*, 2015, pp. 1321–1326.

Grolimund + Partner AG



Felix Schlatter



Erik Bühlmann

14. Februar 2023

Anhang

I AVCA-Analysen

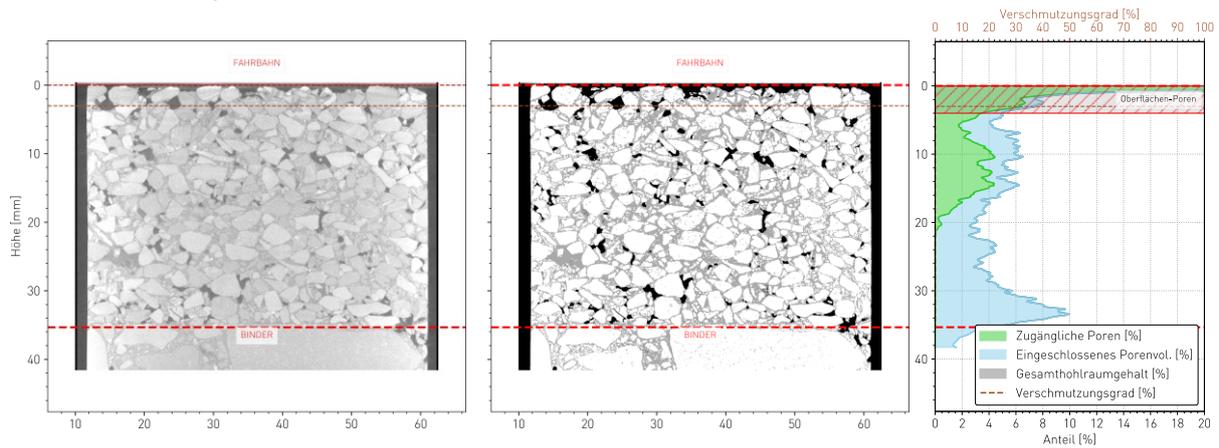


Abbildung 8-1: AVCA-Analyse, BK1.

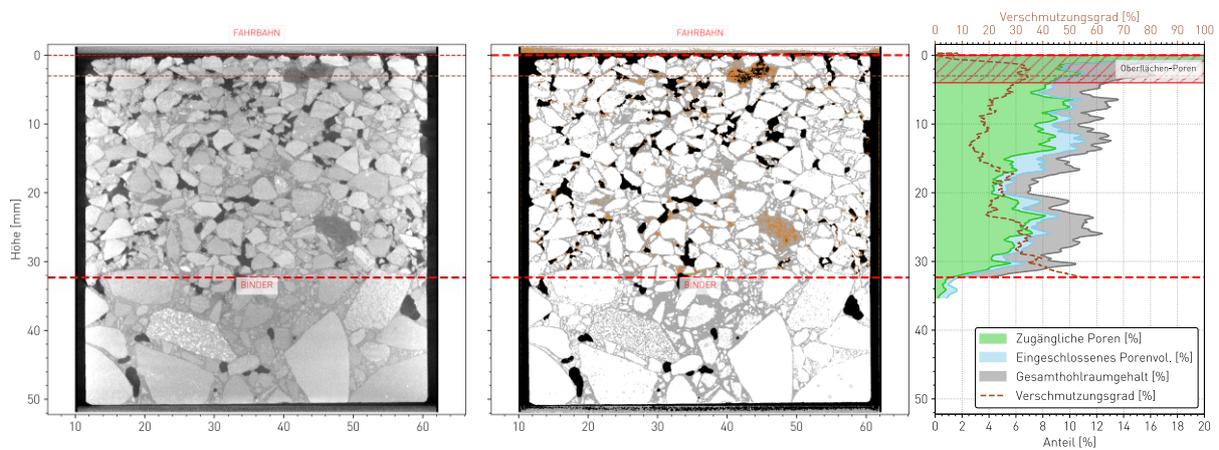
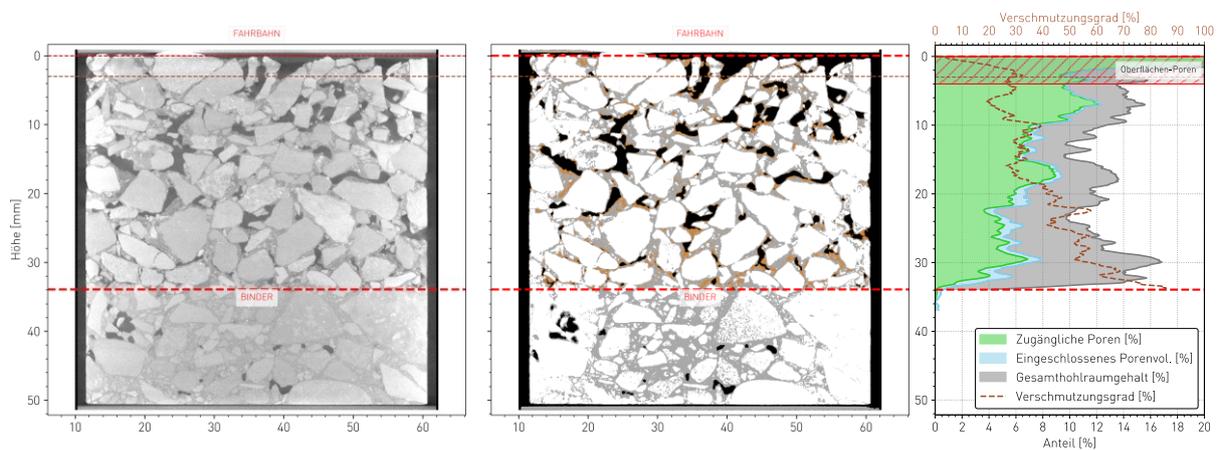


Abbildung 8-2: AVCA-Analyse, BK2



14. Februar 2023

Abbildung 8-3: AVCA-Analyse, BK3

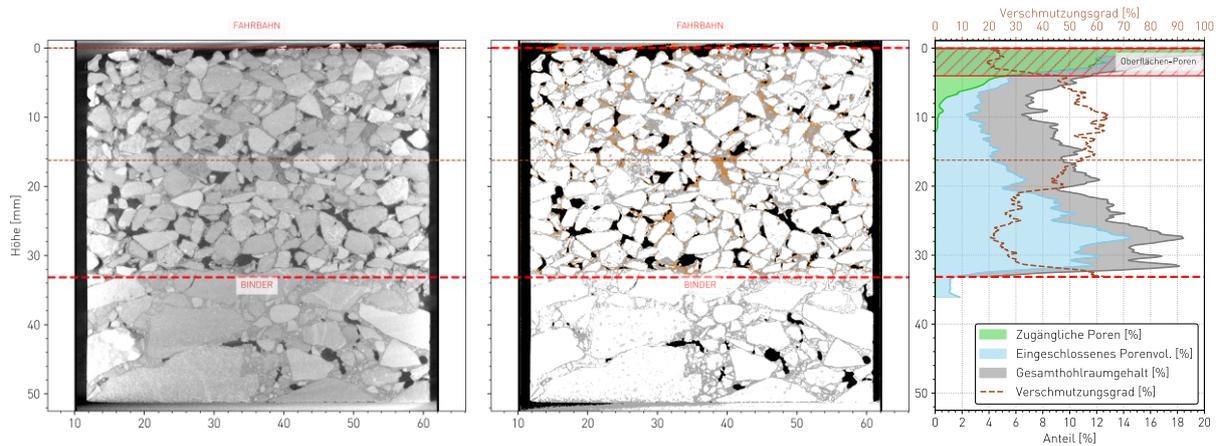


Abbildung 8-4: AVCA-Analyse, BK4

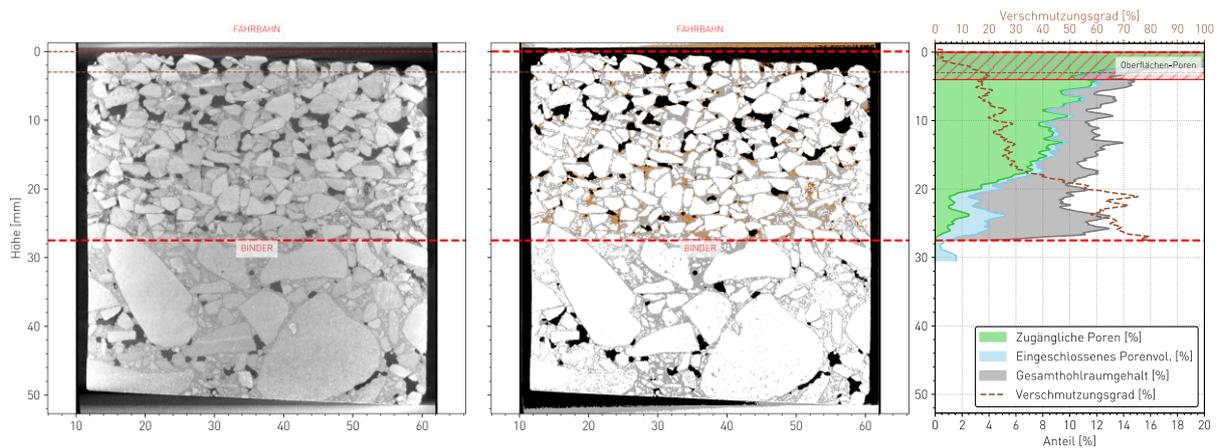


Abbildung 8-5: AVCA-Analyse, BK5

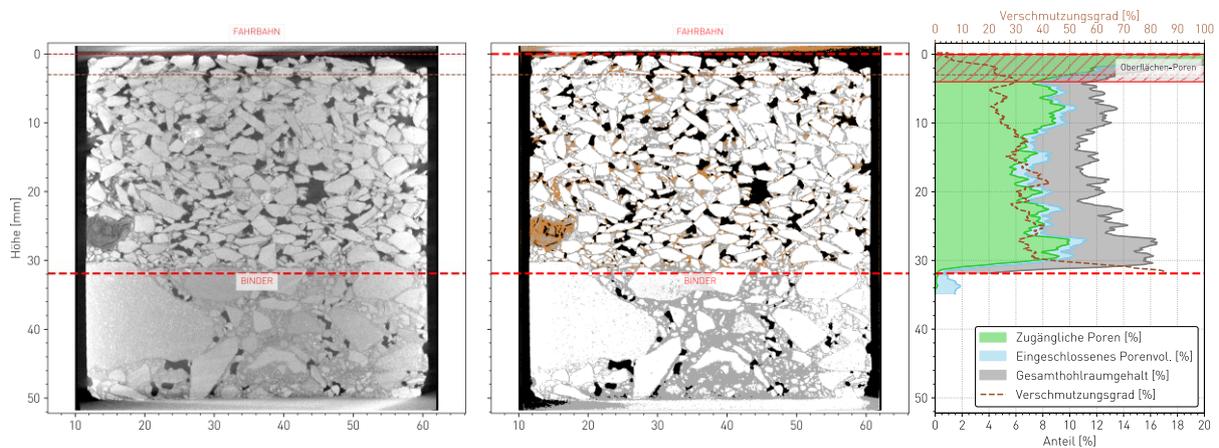


Abbildung 8-6: AVCA-Analyse, BK6

14. Februar 2023

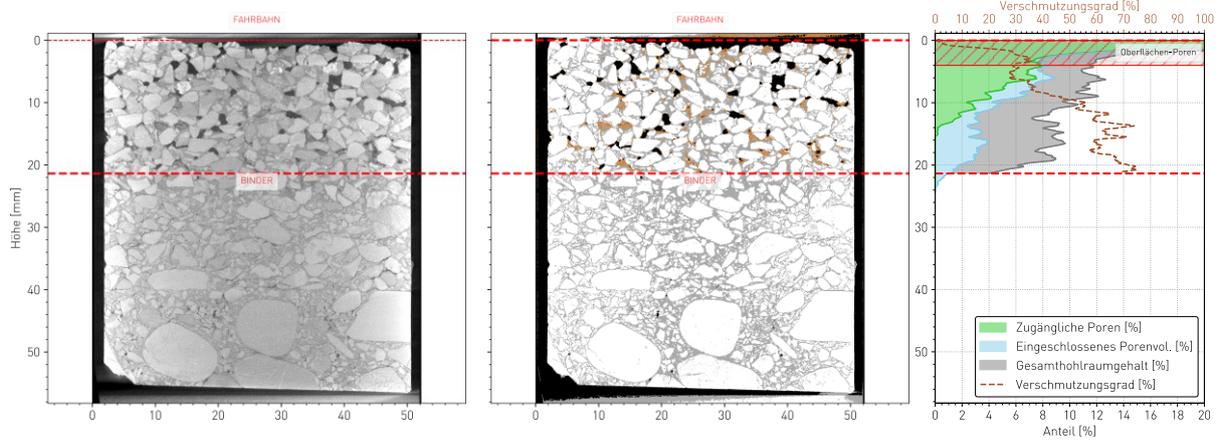


Abbildung 8-7: AVCA-Analyse, BK7

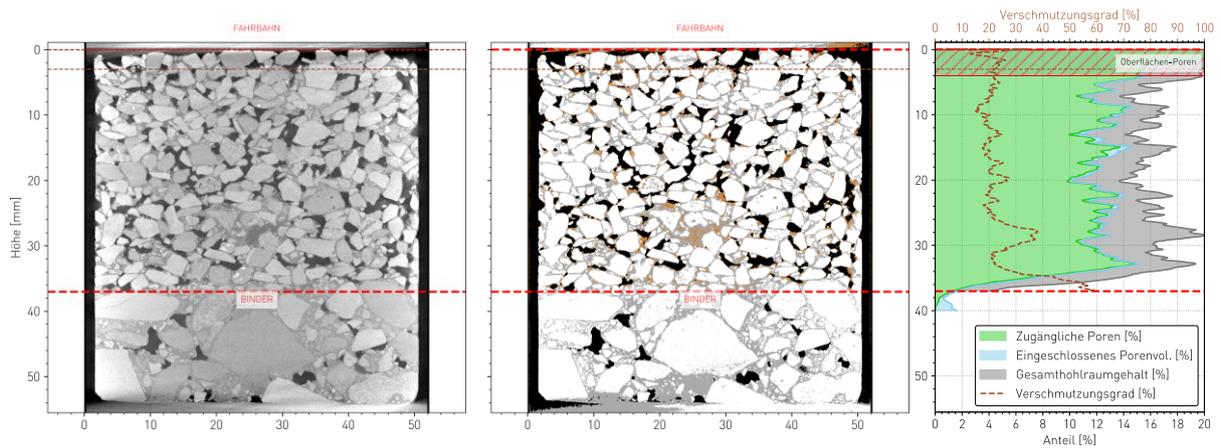


Abbildung 8-8: AVCA-Analyse, BK8

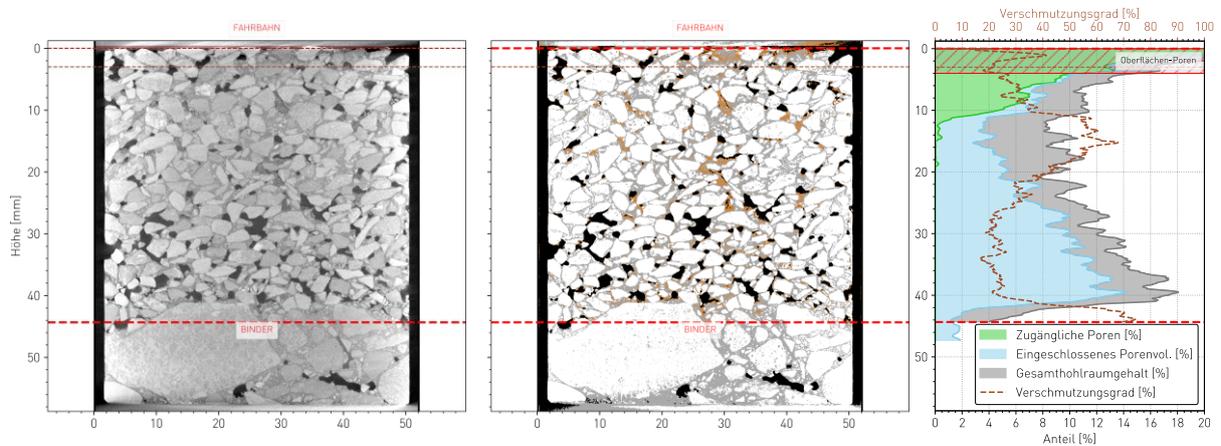


Abbildung 8-9: AVCA-Analyse, BK9

14. Februar 2023

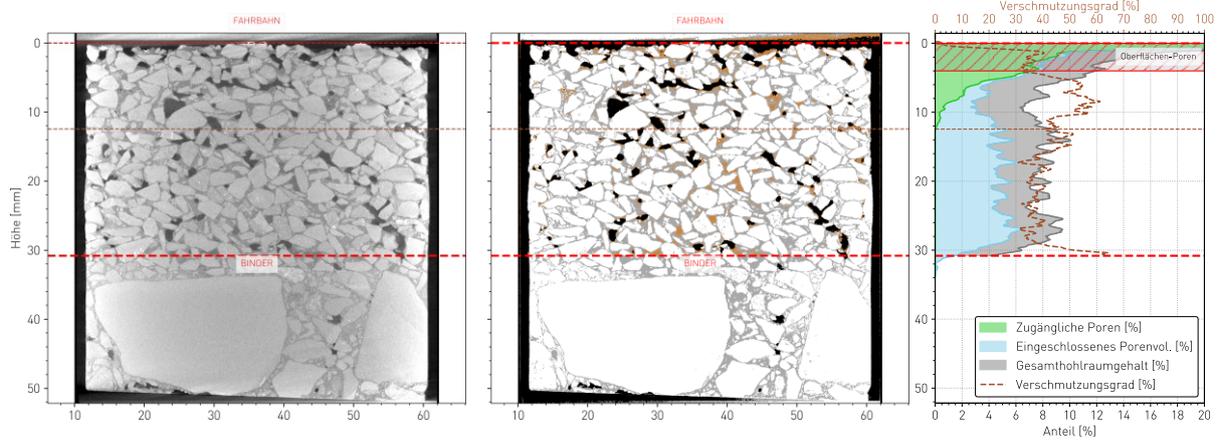


Abbildung 8-10: AVCA-Analyse, BK10

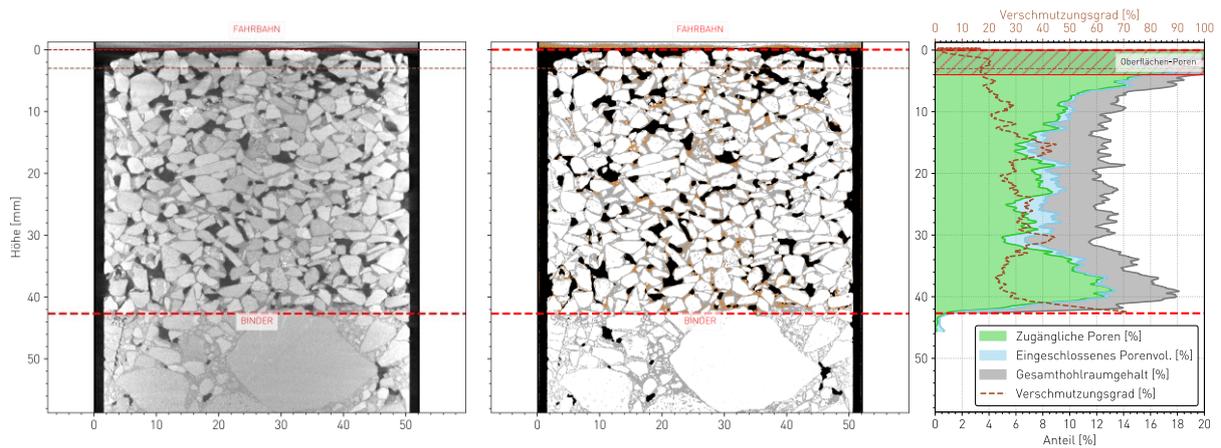


Abbildung 8-11: AVCA-Analyse, BK11

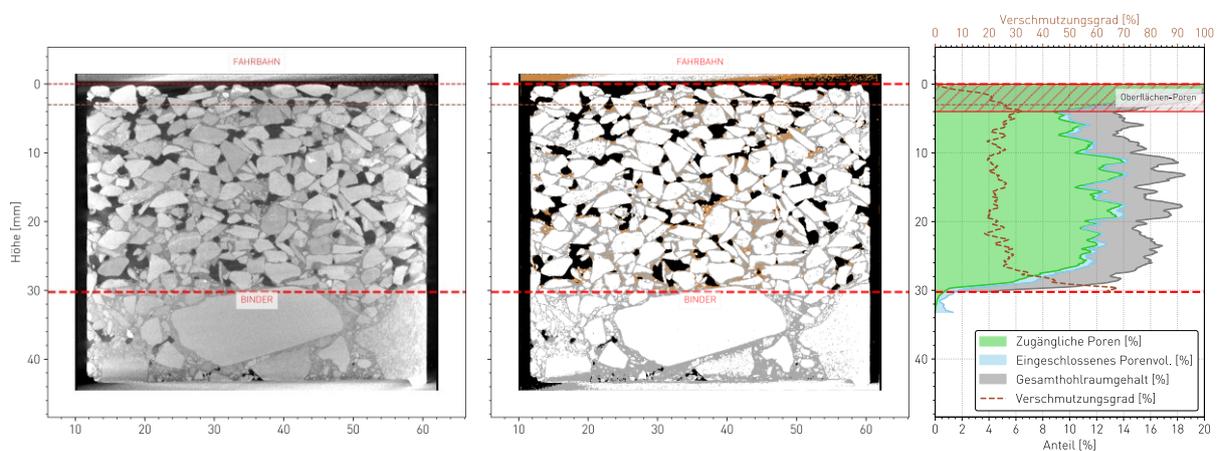


Abbildung 8-12: AVCA-Analyse, BK12

14. Februar 2023

II Modellierung weiterer Hohlraumgehalte

Zur Illustration über die Wirkungsweise des Modells gemäss dem Kapitel 3.3.1 ab Seite 27 ff. ist in der Folge die Modellierung mit HR-Gehalt von 11% (Abbildung 8-13) und von 14% (Abbildung 8-14) durchgeführt worden. Dabei ist die Farbskalierung gleich gehalten.

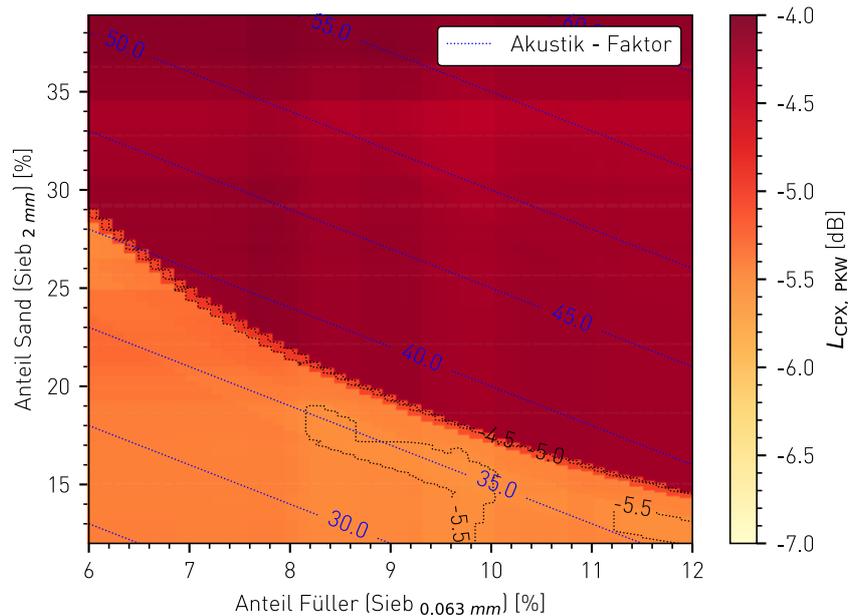


Abbildung 8-13: Modellierung 4er Beläge mit HR-Gehalt 11%.

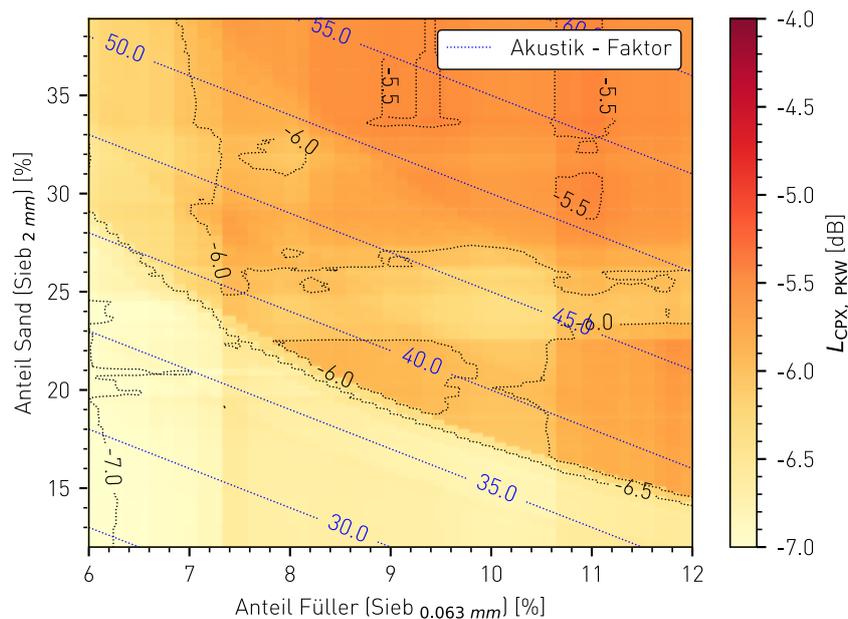


Abbildung 8-14: Modellierung 4er Beläge mit HR-Gehalt 14%.