



## Schleifen von lärmarmen Belägen in der Schweiz Erkenntnisse aus Monitoring bis 2023

A6279

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

15.04.2024

## **Impressum**

### **Disclaimer**

*Diese Studie wurde im Auftrag des BAFU verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.*

### **Auftragnehmer**

*Weibel AG  
Grolimund + Partner AG*

### **Auftraggeber**

*Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Lärm und NIS*

### **Projektteam**

Tobias Balmer (Weibel AG)  
Felix Schlatter (G+P)

<b>Version</b>	<b>Datum</b>	<b>Editoren</b>	<b>Beschrieb</b>	<b>Verteiler</b>
V0.9	06.10.2023	fs, tb	Entwurf	Bundesamt für Umwelt
V1.0	13.12.2023	fs, tb	Schlussbericht	Bundesamt für Umwelt
V2.0	15.04.2024	fs, tb	Schlussbericht inklusive Korrekturen	Bundesamt für Umwelt

## Zusammenfassung

Dieser Bericht untersucht die Effektivität von Schleifmassnahmen für den akustischen Unterhalt auf lärmarmen Strassenbelägen in der Schweiz. Die Untersuchung fasst alle bisherigen in der Schweiz ausgeführten Schleifmassnahmen auf lärmarmen Belägen zusammen mit dem Ziel eine gesamtheitlich und statistische Betrachtung des Schleifens von Belägen als Belagsunterhaltmassnahme zu ermöglichen. Die Analysen basieren auf total 17 realisierten Teststrecken mit offenporigen Belägen vom Typ SDA 4, firmeneigenen SDA 4-analogen Produkten, SDA 8 sowie dichten Belägen des Typs ACMR 8, ACMR 11, AC 11 und MA 11 (Gussasphalt).

Im Rahmen der Studie wurden sowohl alte Messdaten zusammengetragen und neu aufbereitet und damit homogenisiert, so wie auch neue Messdaten erhoben. Dabei standen die akustischen CPX-Messungen (Close-Proximity nach ISO-11819-2/3) im Vordergrund. Zur Beschreibung der Oberflächenbeschaffenheit wurden weitere Verfahren, wie Texturmessungen, visuelle Beurteilung, Lufttopfmessungen, Permeabilitätsmessungen und Schallabsorptionsmessungen kombiniert. Ebenfalls wurden an einigen ausgewählten Strecken Bohrkerns gezogen, um mit dem AVCA-Verfahren (Acoustic-Void Content Analysis) die Porenstruktur und den Verschmutzungsgrad zu ermitteln.

Die Ergebnisse zeigen, dass Schleifmassnahmen initial eine deutliche akustische Verbesserung bewirken können. Bei 4er-Belägen wurde im statistischen Mittel eine initiale Verbesserung von -2 bis -3 dB und bei 8er-Belägen eine Verbesserung von gut -3 dB erzielt. Auf dichten Belägen konnte mit dem Verfahren ebenfalls eine Verbesserung von rund -2 dB erreicht werden. Aus den Daten ist zudem ersichtlich, dass die Initial-Wirkung abhängig vom Ausgangszustand ist. D.h. je schlechter die akustische Belagsgüte vor der Massnahme, desto mehr Effekt ist durch das Schleifen zu erwarten.

In Bezug auf die Dauerhaftigkeit der Massnahme zeigte sich, dass die regenerative akustische Wirkung auf lärmarmen 4er-Belägen nach 2-4 Jahren wiederum auf den Ausgangszustand zurückgeht, während die gröberen 8er-Beläge mit tendenziell 4 Jahren etwas länger profitieren. Interessanterweise zeigte sich auf den dichten 11er-Belägen eine Regenerationszeit von zum Teil mehr als 4 Jahren. Grundsätzlich ist zu berücksichtigen, dass die Wirkung im Vergleich zu einem unbehandelten und ebenfalls alternden Referenzabschnitt in allen Fällen auch nach der oben angegebenen Zeit noch nachweisbar ist. Das bedeutet konkret, dass über den aktuellen Monitoringzeitraum hinaus ein positiver akustischer Effekt über >4 Jahren feststellbar ist.

Hinsichtlich der Wirkungsmechanismen des Schleifens zur Verbesserung der Belags-Akustik können grundsätzlich zwei Prinzipien unterschieden werden: Zum einen kann durch die Wahl der richtigen Werkzeuge eine feinere und homogenere Oberfläche geschaffen werden. Diese ist förderlich für die Lärminderung was die Anregung durch Vibrationen und die Entlüftungseigenschaften entlang der Oberfläche betrifft. Zum anderen können bei offenporigen Belägen unter Umständen ebenfalls verschlossene Hohlräume reaktiviert werden, was einen signifikanten akustischen Nutzen mit sich bringt. Dazu muss allerdings mit höheren Abtragstiefen die vorhandene Schmutzschicht in der Porenstruktur durchgeschliffen werden. Grundsätzlich konnte in der Studie für die offenporigen 4er Beläge statistisch nachgewiesen werden, dass bei erhöhter Schleiftiefe die initiale Wirkung sowie die Wirkung über die Zeit in der Tendenz besser ausfiel. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die beobachtete Streuung zwischen



einzelnen Strecken relativ gross ist und in dieser Metastudie bei diversen Beispielen auch mit geringer Schleiftiefe gute Ergebnisse erzielt werden konnten. Anhand der verfügbaren Datengrundlage ergibt sich die Schlussfolgerung, dass der Wirkmechanismus über die Textur eine wichtigere Bedeutung hat als die Reaktivierung der Poren. Dies gilt insbesondere im Zusammenhang mit einer besseren Langzeitwirkung.

Das Ergebnis der Schleifmassnahme hängt massgeblich vom Ausgangszustand sowie der eingesetzten Schleifmethode ab, welche letztendlich mit der resultierende Oberflächentextur und Abtragstiefe im Zusammenhang steht. Daher ist es wichtig, im Vorfeld über die Möglichkeiten und das Ziel der Massnahme Bewusstheit zu schaffen. So kann z.B. bei einem stark verstopften SDA 4-Belag mit tief liegender Schmutzschicht auch mit einer grossen Schleiftiefe kaum sinnvoll Porenraum zurückgewonnen werden und der Nutzen einer erhöhter Schleiftiefe hinsichtlich akustischer Verbesserung wird begrenzt sein. Umso mehr macht es in diesem Fall Sinn, eine homogene Textur bei geringer Schleiftiefe anzustreben, um der Ausgangssituation entsprechend optimale Ergebnisse zu erzielen.

Insgesamt zeigt sich, dass Schleifmassnahmen auf Strassenbelägen eine effektive Methode zur Verbesserung der akustischen Belagsgüte darstellen. Durch Schleifen kann die akustische Lebensdauer von lärmarmen Belägen verlängert werden und die Massnahme eignet sich somit für den akustischen Unterhalt lärmsanierter Streckenabschnitte. Des Weiteren lassen sich ebenfalls auf dichten und grobkörnigen Belägen beachtliche Resultate erzielen. Damit kommt die Methode auch als weiteres Instrument für die Strassenlärmsanierung in Frage.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>3</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>10</b>
1.1 Akustische Alterung und Unterhalt lärmarmer Beläge	10
1.2 Schleifen als Unterhaltmassnahme	11
1.3 Über diesen Bericht	12
<b>2 Messprogramm &amp; Datenquellen</b>	<b>13</b>
2.1 Teststrecken	13
2.1.1 Umwelteinflüsse	16
2.2 Messmethoden	16
2.2.1 CPX-Belagsgütemessung	16
2.2.2 Schallabsorptionsmessung	17
2.2.3 Bohrkernanalyse, Imprägnierung	18
2.2.4 Bohrkernanalyse, CT-Analyse (AVCA)	18
2.2.5 Sandfleckmethode	18
2.2.6 Texturmessungen	18
2.2.7 Permeabilitätsmessungen	18
2.2.8 Lufttopfmessungen (Luftströmungswiderstand)	19
2.2.9 Visuelle Beurteilung	20
2.3 Messprogramm	20
2.4 Methodik der Datenanalyse	21
2.5 Belagskategorien	22
<b>3 Resultate</b>	<b>24</b>
3.1 Initialwirkung und Belagsgüte nach Schleifen	24
3.1.1 Akustische Initialwirkung der einzelnen Strecken (absolut, vorher vs. nachher)	25
3.1.2 Initialwirkung der einzelnen Abschnitte im Vergleich zum Referenzabschnitt	28
3.2 Regenerative Wirkung auf einzelnen Strecken	29
3.3 Dauerhaftigkeit der akustischen Wirkung	32
3.3.1 Einflussfaktoren Schleifen	35
3.3.2 Einflussfaktor Schleiftiefe und Belagstyp	35
3.3.3 Dauerhaftigkeit der Massnahme in Abhängigkeit der Schleiftiefe	37
3.4 Wirkungsmechanismen	41
3.4.1 Visuelle Inspektion	42
3.5 Lufttopf und Texturmessungen	43
3.5.1 Texturmessungen	45
3.5.2 Bohrkernanalysen	46
<b>4 Schlussfolgerungen &amp; Empfehlungen</b>	<b>47</b>
4.1 Dauerhaftigkeit der Massnahme	47
4.2 Einflussfaktoren	47
4.3 Wirkmechanismen	48



4.4 Empfehlungen .....	48
<b>5 Literatur</b>	<b>50</b>
<b>Anhang</b>	<b>52</b>
<b>A Messzeitpunkte akustische Messungen</b>	<b>52</b>
<b>B Messabschnitte</b>	<b>55</b>
<b>C Corserey</b>	<b>57</b>
C.1 Übersichtskarte .....	58
C.2 Akustische Resultate .....	59
C.2.1 CPX-Streckenverlauf .....	59
C.2.2 CPX- Zeitverlauf .....	60
C.2.3 Regenerations-Plot .....	61
C.2.4 Wirkungs-Plot .....	62
C.2.5 Spektralanalyse .....	62
<b>D Dittingen</b>	<b>65</b>
D.1 Übersichtskarte .....	66
D.2 Akustische Resultate .....	66
D.2.1 CPX-Streckenverlauf .....	67
D.2.2 CPX-Zeitverlauf .....	68
D.2.3 Akustische Regeneration .....	68
D.2.4 Spektralanalyse .....	70
<b>E Farvagny</b>	<b>75</b>
E.1 Übersichtskarte .....	75
E.2 Akustische Resultate .....	77
E.2.1 CPX-Streckenverlauf .....	77
E.2.2 CPX- Zeitverlauf .....	78
E.2.3 Akustische Regeneration .....	79
E.2.4 Spektralanalyse .....	80
E.3 AVCA .....	84
<b>F La Verrerie</b>	<b>89</b>
F.1 Übersichtskarte .....	90
F.2 Akustische Resultate .....	91
F.2.1 CPX-Streckenverlauf .....	91
F.2.2 CPX- Zeitverlauf .....	92
F.2.3 Akustische Regeneration .....	92
F.2.4 Akustische Wirkung .....	93
F.2.5 Spektralanalyse .....	93

<b>G Landerswil, BE</b>	<b>95</b>
G.1 Übersichtskarte .....	95
G.2 Akustische Resultate .....	96
G.2.1 CPX-Streckenverlauf .....	96
G.2.2 CPX- Zeitverlauf .....	97
G.2.3 Akustische Regeneration .....	97
G.2.4 Spektralanalyse .....	97
<b>H Muri b. Bern</b>	<b>100</b>
H.1 Übersichtskarte .....	101
H.2 Akustische Resultate .....	102
H.2.1 CPX-Streckenverlauf .....	102
H.2.2 Akustische Regeneration .....	103
H.2.3 Akustische Wirkung .....	103
H.2.4 Spektralanalyse .....	104
<b>I Muttenz, BL</b>	<b>108</b>
I.1 Übersichtskarte .....	109
I.2 Akustische Resultate .....	109
I.2.1 CPX-Streckenverlauf .....	110
I.2.2 CPX- Zeitverlauf .....	111
I.2.3 Akustische Regeneration .....	111
I.2.4 Akustische Wirkung .....	112
I.2.5 Resultate AeBo .....	112
I.3 Texturanalysen .....	114
I.3.1 Spektralanalysen .....	114
I.3.2 Spektralanalyse .....	117
<b>J Remigen, AG</b>	<b>121</b>
J.1 Übersichtskarte .....	122
J.2 Akustische Resultate .....	123
J.2.1 CPX-Streckenverlauf .....	123
J.2.2 CPX- Zeitverlauf .....	124
J.2.3 Akustische Regeneration .....	125
J.2.4 Akustische Wirkung .....	126
J.2.5 Spektralanalyse .....	126
J.3 Texturmessungen .....	129
J.4 Schallabsorptionsmessungen .....	132
J.5 Lufttopfmessungen .....	134
J.6 Bohrkernuntersuchungen .....	134
J.6.1 AVCA .....	134
<b>K Romont, FR</b>	<b>140</b>
K.1 Übersichtskarte .....	140

K.2	Akustische Resultate .....	141
K.2.1	CPX-Streckenverlauf .....	141
K.2.2	CPX- Zeitverlauf .....	142
K.2.3	Akustische Regeneration .....	142
K.2.4	Akustische Wirkung .....	143
K.2.5	Spektralanalyse .....	143
<b>L</b>	<b>Rüthi, SG</b> .....	<b>145</b>
L.1	Übersichtskarte .....	146
L.2	Akustische Resultate .....	147
L.2.1	CPX- Zeitverlauf .....	147
L.2.2	Akustische Regeneration .....	148
L.2.3	Akustische Wirkung .....	148
L.2.4	Spektralanalyse .....	149
L.3	Texturanalysen .....	152
L.3.1	Spektralanalysen .....	152
<b>M</b>	<b>Stadt Genf, Quai Ansermet</b> .....	<b>155</b>
M.1	Übersichtskarte .....	156
M.2	Akustische Resultate .....	157
M.2.1	CPX-Streckenverlauf .....	157
M.2.2	CPX- Zeitverlauf .....	158
M.2.3	Akustische Regeneration .....	158
M.2.4	Akustische Wirkung .....	159
M.2.5	Spektralanalyse .....	159
<b>N</b>	<b>Sugiez</b> .....	<b>161</b>
N.1	Übersichtskarte .....	162
N.2	Akustische Resultate .....	162
N.2.1	CPX-Streckenverlauf .....	163
N.2.2	CPX- Zeitverlauf .....	164
N.2.3	Akustische Regeneration .....	164
N.2.4	Akustische Wirkung .....	165
N.2.5	Spektralanalyse .....	165
<b>O</b>	<b>Tafers</b> .....	<b>168</b>
O.1	Übersichtskarte .....	169
O.2	Akustische Resultate .....	170
O.2.1	CPX-Streckenverlauf .....	170
O.2.2	CPX- Zeitverlauf .....	171
O.2.3	Akustische Regeneration .....	172
O.2.4	Akustische Wirkung .....	172
O.2.5	Spektralanalyse .....	173

<b>P Uznach, SG</b>	<b>178</b>
P.1 Übersichtskarte .....	179
P.2 Akustische Resultate .....	180
P.2.1 CPX-Streckenverlauf .....	180
P.2.2 CPX- Zeitverlauf .....	180
P.2.3 Akustische Regeneration .....	181
P.2.4 Akustische Wirkung .....	181
P.2.5 Spektralanalyse .....	182
P.2.6 Akustische Regeneration .....	185
P.3 Texturanalysen .....	185
P.3.1 Spektralanalysen .....	185
<b>Q Veyrier, GE</b>	<b>188</b>
Q.1 Übersichtskarte .....	189
Q.2 Akustische Resultate .....	190
Q.2.1 CPX-Streckenverlauf .....	190
Q.2.2 CPX- Zeitverlauf .....	191
Q.2.3 Akustische Regeneration .....	191
Q.2.4 Akustische Wirkung .....	192
Q.2.5 Spektralanalyse .....	192
<b>R Villarod, FR</b>	<b>196</b>
R.1 Übersichtskarte .....	197
R.2 Akustische Resultate .....	198
R.2.1 CPX-Streckenverlauf .....	198
R.2.2 CPX- Zeitverlauf .....	199
R.2.3 Akustische Regeneration .....	199
R.2.4 Spektralanalyse .....	200
<b>S Zofingen</b>	<b>203</b>
S.1 Übersichtskarte .....	203
S.2 Akustische Resultate .....	205
S.2.1 CPX-Streckenverlauf .....	205
S.2.2 CPX- Zeitverlauf .....	206
S.2.3 Akustische Regeneration .....	207
S.2.4 Akustische Wirkung .....	207
S.2.5 Spektralanalyse .....	208
S.3 Lufttopfmessungen .....	213
S.4 Texturmessungen .....	213
S.4.1 Mittlere Profiltiefe .....	214
S.4.2 Effektive Rauigkeitstiefe .....	215
S.5 Schallabsorptionsmessungen .....	217
S.6 Bohrkernanalysen 2022 .....	218
S.6.1 AVCA .....	218
S.6.2 Imprägnierung .....	224

## 1. Einleitung

Lärmarme Beläge werden in der Schweiz vermehrt seit 2010 als Lärmschutzmassnahme an der Quelle eingesetzt. Zum Einsatz kommt dabei meist semidichtes Mischgut vom Typ SDA 4 und SDA 8 mit einem Porengehalt von 12 oder 16 %. Insbesondere in der Westschweiz sind auch firmeneigene Produkte wie Famsiphonogrip 4, Nanosoft 4 oder Sapaphone 4 üblich. Diese haben ebenfalls eine offenporige Struktur und sind grundsätzlich mit der Klasse der SDA 4-16 vergleichbar. Die Erfahrung der letzten 10 Jahre zeigt, dass die akustische Leistung von lärmarmen Belägen anfänglich sehr gute Werte von typisch besser -6 dB(A) aufweist. [1, 2]. Diese Wirkung geht jedoch im Verlauf der Zeit unter Belastung des Verkehrs (mechanische Beschädigung und Veränderung der Makrostruktur), sowie durch Schmutzeintrag (Verstopfen der offenen Poren) allmählich verloren [3, 4, 5, 6]. Die Abnahme der Lärminderung über die Zeit wird als akustische Alterung bezeichnet und diese folgt gegenüber der mechanischen Alterung des Belags einer anderen Zeitskala. Dabei beträgt die Anfangs-Lärminderung bei SDA 4 im statistischen Mittel -7 bis -6 dB(A) nach und fällt nach rund 5-6 Jahren auf unter -3 dB(A) [3].

### 1.1. Akustische Alterung und Unterhalt lärmarmer Beläge

Die akustische Alterung kann in drei Stadien eingeteilt werden. In einem ersten Stadium kommt es durch die Verkehrsbelastung zum Abtrag der Bitumenummhüllung auf den Gesteinskörner der Oberfläche. Je nach Rezeptur ist ebenfalls eine initiale Veränderung des Korngefüges möglich. Beides wirkt sich, wenn auch limitiert, auf die akustischen Eigenschaften aus. Im zweiten Stadium kommt es durch Verschleiss (Abtrag der Mörtel-Matrix und Ausbrüche einzelner Körner durch lokale mechanische Überbelastung wie z.B. durch Schneeketten) zu einer Veränderung der Makrostruktur. Gleichzeitig kommt es durch stetigen Schmutzeintrag zu einer fortschreitenden Verschmutzung der offenen Porengänge, welche nach einer bestimmten Zeit zu einer kompletten Verstopfung der akustisch wirksamen Porenstruktur führt. Diese beiden Mechanismen dominieren die akustische Alterung bei SDA Belägen und sind verantwortlich für den markanten Verlust der lärmindernden Wirkung über die ersten 1-6 Jahre.

Im dritten Stadium schlussendlich kommt es durch Alterung des Bindemittels zu einer Abnahme der mechanischen Stabilität auf Stufe der Belagstruktur. Starker Kornausbruch und Rissbildung sind die Folge davon. Akustisch gesehen ist die relative Veränderung der lärmindernden Eigenschaften aber nicht mehr so gross und der Belag befindet sich akustisch sowie mechanisch im Endstadium. Die hier aufgeführten Erkenntnisse basieren auf eigenen, mehrjährigen Beobachtungen im Feld und akustischen Daten aus Monitoring-Projekten (Publikation in Planung).

Insbesondere im zweiten der oben aufgeführten Stadien klafft die Kurve der akustischen und mechanischen Alterung auseinander und in diesem Zeitraum ist ein akustischer Unterhalt der Strasse sinnvoll. Es ist inzwischen anerkannt, dass die akustische Lebensdauer von SDA-Belägen stark von der Verschmutzung abhängt. So wurden in verschiedenen Versuchen, mit Reinigung versucht die Verschmutzung aus dem Belag zu entfernen [7]. Dabei konnten mit den Reinigungsversuchen hinsichtlich des Lärmpegels je nach Reinigungsverfahren 'geringfügige bis keine' Wirkung festgestellt werden. Jüngste nicht öffentlich publizierte Resultate zeigen jedoch, dass eine periodische Reinigung von lärmarmen Belägen deren Verstopfungen teilweise verzögern kann und dies grundsätzlich zu einer längeren akustischen Lebensdauer führen sollte. Es zeigte sich aber auch, dass hartnäckige Verstopfungen bzw. solche, die sich über längere Zeit aufgebaut und teilweise tiefer liegen, mit der gelegentlichen konventionellen Reinigung nicht entfernt werden können. Eine periodische Reinigung macht daher nur Sinn, wenn direkt nach Einbau

damit begonnen wird und nur solange die offenen Poren noch nicht komplett verstopft sind.

## 1.2. Schleifen als Unterhaltmassnahme

Ein anderer Ansatz für die Wiederherstellung der akustischen Lebensdauer stellt das Abschleifen des Deckbelages dar. Bei diesem Verfahren wird die Belagsoberfläche entweder leicht angeschliffen, oder mehrere Millimeter davon abgetragen. In der Schweiz wurden erste Versuche mit Schleifen erstmals 2017 durch die Weibel AG gemacht. Seither wurde das Verfahren von verschiedenen Kantonen (Freiburg, Aargau, Basel-Landschaft, St. Gallen, Genf) auf designierten Teststrecken in grösserer Skala angewandt und weiter getestet. Im Gegensatz zum Fräsen bewegt sich beim Schleifen das Werkzeug horizontal und man erreicht durch entsprechend hohe Drehzahlen einen vertikalen Abtrag. Je nach Werkzeug, Vorschub und Härte des Belags ergibt sich ein Abtrag von bis zu 5 mm in einem Arbeitsgang. Für tiefere Abträge sind beim Schleifen, im Gegensatz zum Fräsen, mehrfach Überfahrten nötig. Dafür ist mit Schleifen auf grosser Arbeitsbreite mit einem Durchgang eine homogenere Textur möglich, was für die akustischen Eigenschaften ein wesentlicher Vorteil ist.

Die im vorliegenden Bericht berücksichtigten Teststrecken wurden allesamt mit dem Schleif-Verfahren behandelt. Dazu kam eine Spezialmaschine zum Einsatz, welche mit 5 Schleifköpfen ausgerüstet ist und damit eine ganze Fahrbahnbreite in einem Schritt behandeln kann (siehe Abbildung 1.1). Dies ist ein wichtiger Aspekt in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit und Umsetzbarkeit der Methode.



**Abbildung 1.1:** Spezialschleifmaschine im Einsatz in in Veyrier, GE

Bei den Teststrecken handelt sich vorwiegend um Beläge vom Typ SDA. An einigen Orten wurden aber auch angrenzende Beläge vom Typ AC, ACMR und MA geschliffen. Dies mit dem Zweck, die Wirkung des Verfahrens ebenfalls auf dichten Deckschichten zu prüfen.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde im Zeitraum 2021-2022 auf den Teststrecken weitere Messungen durchgeführt. Ziel ist es nun diese Daten übergreifend zusammenzustellen und hinsichtlich der



akustischen Wirkung und der Dauerhaftigkeit der Massnahme zu analysieren. Weiter sollen die zugrundeliegenden Wirkmechanismen des Schleifverfahrens für lärmarmen Strassenbeläge eruiert werden.

### **1.3. Über diesen Bericht**

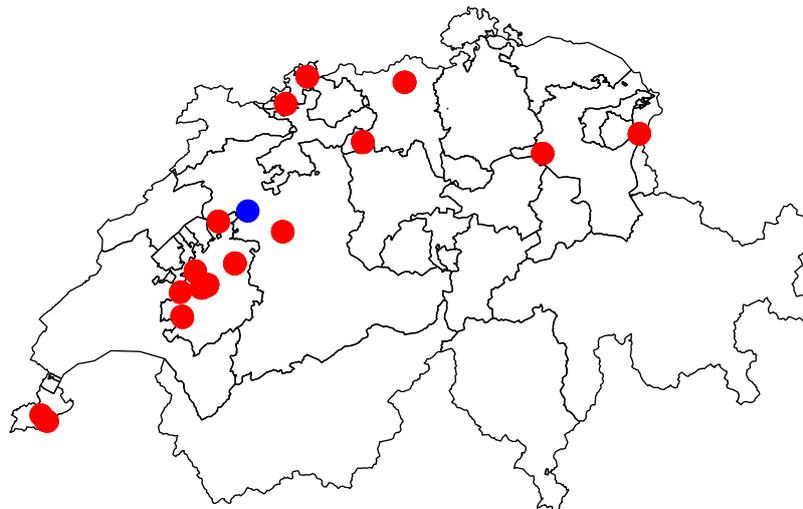
In diesem Bericht werden verschiedene bereits realisierte Teststrecken evaluiert und die bestehenden sowie neuen Ergebnisse zusammengetragen. Da es sich dabei um eine Meta-Studie handelt, mussten die Messdaten homogenisiert und neu aufbereitet werden, um eine möglichst gemeinsame Vergleichsgrundlage zu schaffen. Der Bericht ist gegliedert in einen Hauptteil, in welchem die globalen und allgemein gültigen Erkenntnisse aus den verschiedenen Strecken aufgeführt werden. Übersichten und Details zu den einzelnen Strecken sowie Resultate zu speziellen Messungen können dem ausführlichen Anhang ab Seite 52 entnommen werden.

## 2. Messprogramm & Datenquellen

### 2.1. Teststrecken

Als Basis für das Monitoring dienten jährliche CPX-Messungen der Schleif-Teststrecken, welche ab 2018 in der Schweiz realisiert wurden [8, 9]. Diese Messungen wurden durch die jeweiligen Kantone in Auftrag gegeben. Sämtliche Kantone die zurzeit über Teststrecken verfügen, haben sich auch bereit erklärt die nötigen CPX-Messungen für diese Studie zur Verfügung zu stellen. Zudem konnten im August 2021 zwei weitere Teststrecken in der Stadt Genf und im Kt. Genf (siehe Abbildung 2.1) erfolgreich realisiert und ebenfalls in diese Studie integriert werden. Ein weiterer Datensatz stammt von einer Strecke in Landerswil, BE. Dort wurden 2017 die Pilotversuche mit unterschiedlichen Schleif- und Fräsverfahren durchgeführt, welche die Grundlage bildeten für alle weiteren Teststrecken.

Damit umfasst diese Studie total 17 Teststrecken, die über weite Teile der Schweiz verteilt sind (Abbildung 2.1). Die vor dem Start des aktuellen Monitoring-Projekts bereits vorhandenen Messdaten werden mitberücksichtigt. Zusammen ergibt sich daraus eine Datengrundlage über einen Zeitraum von 2017 – 2022, zur Beurteilung der Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit des Verfahrens. Namentlich sind folgende Strecken Teil der Studie (Vgl. Abbildung 2.1 und Tabelle 2.1):



**Abbildung 2.1:** Geografische Übersicht der 17 Schleif-Teststrecken in der Schweiz (inklusive Pilotstrecke in Landerswil, blauer Punkt)

Die 17 Teststrecken lassen sich insgesamt in 83 einzelne Abschnitte unterteilen. Diese Abschnitte sind durch unterschiedliche Verfahrensparameter (Belagstyp, Schleiftiefe, Vorschub, Anzahl Übergänge und Werkzeugtyp) definiert. Als Hauptfaktoren gelten der Belagstyp und die Schleiftiefe, wobei letztere immer in Abhängigkeit des Vorschubs und der Anzahl Übergänge steht. Eine detaillierte Zusammenstellung der Verfahren pro Strecke findet sich im Anhang in Tabelle B.1 Seite 56 ff. Die folgende Tabelle 2.1 zeigt eine Auflistung der Strecken mit Aufschlüsselung nach Belagstyp und Angaben zur Anzahl der Abschnitte. Dabei ist ersichtlich, dass auf einigen Strecken relativ viele unterschiedliche Verfahren angewendet wurden und auf anderen nur ein einzelnes und somit die gesamte zur Verfügung stehende Fläche gleich



bearbeitet wurde. Es hat sich als aufschlussreich herausgestellt, wenn zur Überprüfung der Wirksamkeit des Verfahren jeweils ein unbehandelter Referenzabschnitt desselben Belagstyps vorhanden ist. Damit kann die Alterung des behandelten Abschnitts in Relation zum ebenfalls alternden Referenzabschnitt gesetzt werden.

**Tabelle 2.1:** Beschreibung der Messstrecken inklusive Schleifdatum, Belagstypen, Belagsalter bei welcher die Massnahme vorgenommen wurde und die Anzahl der Abschnitte innerhalb des Belages inklusive Angabe zur Variation der Prozessparameter.

Strecke	Schleifdatum	Zeitraum Monitoring	Belag	Belagsalter b. Massnahme	Anzahl Abschnitte
Landerswil, BE	Juni 2017	5 Jahre	LNA 4 (2011)	6 Jahre	Vorversuch
			LNA 2 (2011)	6 Jahre	Vorversuch
Romont, FR	06.11.2018	4 Jahre	Famsi 4 (2011)	6 Jahre	1 (keine Referenz)
Corserey, FR	07.11.2018	4 Jahre	Famsi 4 (2012)	6 Jahre	2 Abschnitte, Variation Vorschub (keine Referenz)
			Famsi 4 (2013)	6 Jahre	4 Abschnitte, Variation Abtragstiefe
Tafers, FR	21.05.2019	3 Jahre	ACMR 11 (2013)	6 Jahre	2 Abschnitte
			MA 11 (1998)	21 Jahre	3 Abs., Variation Abtragstiefe
La Verrerie, FR	22.05.2019	3 Jahre	Famsi 4 (2012)	7 Jahre	2 Abschnitte
Villarod, FR	23.05.2019	3 Jahre	ACMR 11 (2011)	8 Jahre	3 Abschnitte, Variation Vorschub
			ACMR 8 (2011)	8 Jahre	2 Abschnitte
Farvagny, FR	23.05.2019	3 Jahre	AC 11 (19??)	>20 Jahre	3 Abschnitte, Variation Vorschub
			Famsi 4 (2017)	2 Jahre	2 Abschnitte
			LNA 2 (2017)	2 Jahre	2 Abschnitte
Muri b. Bern, BE	24.09.2019	3 Jahre	SDA 4-16	8 Jahre	4 Abschnitte, Variation Abtragstiefe
Zofingen, AG	25.09.2019	3 Jahre	SDA 4-12 (2012)	7 Jahre	Je 4 Abschnitte, Var. Abtragstiefe
			SDA 4-16 (2012)	7 Jahre	
MuttENZ, BL	24.06.2020	2 Jahre	SDA 4 A (2013)	7 Jahre	2 Abschnitte
			SDA 8 A (2013)	7 Jahre	4 Abschnitte, Variation Abtragstiefe
Dittingen, BL	25.06.2020	2 Jahre	SDA 4 A (2013)	7 Jahre	3 Abschnitte, Variation Abtragstiefe
			SDA 8 A (2013)	7 Jahre	2 Abschnitte
			ACMR 8 (2014)	6 Jahre	4 Abschnitte, Variation Abtragstiefe
Rüthi, SG	25.08.2020	2 Jahre	SDA 8 A (2014)	6 Jahre	5 Abschnitte, Variation Abtragstiefe
Uznach, SG	26.08.2020	2 Jahre	SDA 8-12 (2017)	3 Jahre	4 Abschnitte, Variation Abtragstiefe
Remigen, AG	27.08.2020	2 Jahre	SDA 4-12 (2016)	4 Jahre	5 Abschnitte, Variation Abtragstiefe
Genf, GE	04.08.2021	1 Jahr	Nanosoft (2011)	10 Jahre	3 Abschnitte, Variation Abtragstiefe
Veyrier, GE	05.08.2021	1 Jahr	Sapaphone (2009)	12 Jahre	5 Abschnitte, Variation Vorschub

## 2.1.1 Umwelteinflüsse

Bei der Analyse der einzelnen Strecken gilt es zu berücksichtigen, dass jede Strecke eigenen Umwelteinflüssen ausgesetzt ist. So gibt es Strecken, die eher in ländlichem Gebiet sind, andere sind urbaner, was in der Regel Einfluss auf die lokale Schmutzeinwirkung hat. Ebenso sind die Strecken in unterschiedlichen Höhenlagen zu finden, was sich auf die Witterung (Temperatur, Schnee, Eistage) auswirkt. Weiter sind alle Strecken unterschiedlich stark befahren. Tabelle 2.2 gibt Angaben zu den beiden am einfachsten quantifizierbaren Umwelteinflüsse der Höhenlage und Verkehrsbelastung.

**Tabelle 2.2:** Erfasste Einflussfaktoren der Messstrecken.

Strecke	Höhe ü. M. [m]	Verkehrsbelastung [DTV]
Landerswil, BE	680	<1000
Romont, FR	720	8'000
Corseroy, FR	670	2'500
Sugiez, FR	430	12'600
Tafers, FR	660	5'800
La Verrerie, FR	840	1'600
Villarlod, FR	800	2'600
Farvagny, FR	700	3'400
Muri b. Bern, BE	565	8'500
Zofingen, AG	436	10'000-12'000 <sup>1</sup>
MuttENZ, BL	280	12'200
Dittingen, BL	360	2'000-3'000 <sup>1</sup>
Rüthi, SG	426	3'500
Uznach, SG	410	14'000
Remigen, AG	390	6'000
Genf, GE	375	8'000 <sup>1</sup>
Veyrier, GE	430	12'000 <sup>1</sup>

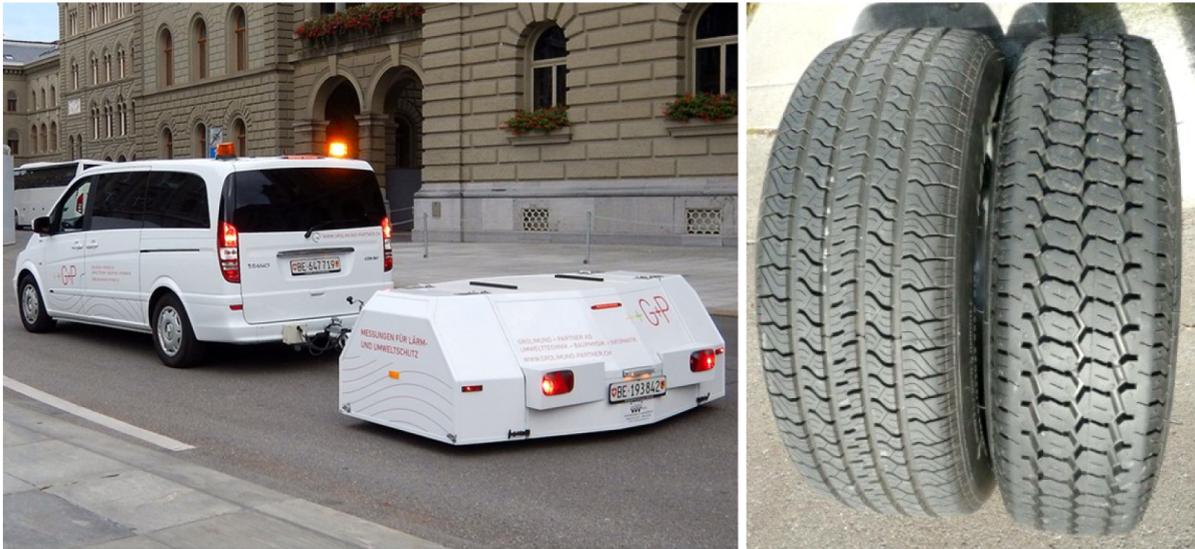
## 2.2. Messmethoden

In den folgenden Unterkapitel werden die Messmethoden kurz beschrieben, welche zur Charakterisierung der Deckschichten und insbesondere deren Oberflächen angewendet wurden.

### 2.2.1 CPX-Belagsgütemessung

Die akustische Belagsgüte der Beläge wurde mit dem Close-Proximity-Verfahren (CPX-Messungen) [8, 9] erhoben. Bei dieser Methode werden die akustischen Eigenschaften von Strassenbelägen durch eine kontinuierliche und direkte Messung der Reifen-Fahrbahngeräusche mit einem Messanhänger ermittelt. Beim CPX-Messsystem wird der Schallpegel in zwei separaten schallgedämmten Kammern innerhalb des Messanhängers in unmittelbarer Reifennähe mit je zwei Mikrofonen gemessen. Der eingesetzte G+P Anhänger erfüllt die in der ISO 11819-2:2017 festgelegten Kriterien betreffend Beeinflussung der Messergebnisse durch geräteeigene Schallreflexionen sowie durch interne und externe Schallgeräusche. Die verwendeten Teststreifensätze sind in Abbildung 2.2 (rechts) dargestellt und entsprechen der Empfehlung der ISO TS 11819-3:2017 [9]: Uniroyal Tigerpaw (SRTT) 225/60-R16 (Testreifen P1 für Personenwagen/Cars) und Avon AV4 195-R14C (Testreifen H1 für Lastwagen/Trucks).

<sup>1</sup>Schätzwerte.



**Abbildung 2.2:** G+P Messsystem und CPX-Testreifen P1 (links) und H1 (rechts) gemäss ISO/CD TS 11819-3:2017.[9]

## 2.2.2 Schallabsorptionsmessung

Die Schallabsorptionseigenschaften eines Strassenbelages sind stark frequenzspezifisch und abhängig von dessen Schichtdicke, der Porosität, der Porenform, deren Verbindungsgrad untereinander und des spezifischen Strömungswiderstands. Die Schallabsorptionseigenschaften eines Strassenbelages können einen grossen Einfluss auf das Ausmass des Horneffekts und auf die Schallausbreitung haben. [10] Der Horneffekt umfasst die Mehrfachreflexionen zwischen dem rollenden Reifen und dem Strassenbelag. Die Schallabsorption hat deshalb einen grossen Einfluss auf die Reduktion des Horneffekts, weshalb deren messtechnische Bestimmung bei der näheren Analyse der akustischen Wirksamkeit von semidichten und porösen Belägen von grosser Wichtigkeit ist.

Die Messung der Schallabsorptionseigenschaften erfolgte in dieser Studie mit dem PU-Verfahren<sup>2</sup> in-situ. Bei diesem Messverfahren wird ein Schallsignal auf die Testfläche ausgesendet. Neben dem Schalldruck wird zusätzlich die Schallschnelle aufgezeichnet. Daraus wird die Impulsantwort des abgestrahlten Signals und dessen Reflexion berechnet und daraus der Schallabsorptionsgrad der Testfläche bestimmt. Im Vergleich zur Bestimmung des Absorptionsgrades mit der Impedanzrohrmethode kann mit dem PU-Verfahren der Schallabsorptionsgrad für einen breiteren Bereich des Lärmspektrums bestimmt werden. Ausserdem ist es möglich, verhältnismässig geringe Schallabsorptionseigenschaften in-situ mit hoher Genauigkeit zu bestimmen.

Die schallabsorbierenden Eigenschaften eines Strassenbelages sind dann am besten, wenn ein möglichst hoher Schallabsorptionsgrad in demjenigen Frequenzbereich realisiert wird, in welchem beim Überrollen des Strassenbelages mit Fahrzeugreifen auch am meisten Schallenergie entsteht. Dies ist typischerweise im mittleren Frequenzbereich zwischen 800 Hz und 1250 Hz der Fall.

<sup>2</sup>Das PU-Verfahren misst die Druck- und Geschwindigkeitskomponenten des Schalls, um die Schallabsorptionseigenschaften von Materialien zu bestimmen.

### 2.2.3 Bohrkernanalyse, Imprägnierung

Hierbei wird die abgetrennte Deckschicht eines Bohrkerns von beiden Seiten mit eingefärbtem (fluoreszierendem) Epoxid-Harz imprägniert. Anschliessend wird am Querschnitt durch visuelle Betrachtung das Porennetzwerk im Belag analysiert. Dies erlaubt qualitative Aussagen über das Ausmass der Verschmutzung und Zugänglichkeit der kommunizierenden Poren von der Belagoberfläche her. In dieser Studie wurden aus auserwählten Strecken mit SDA Belägen Querschnitte aus Bohrkernen mit Durchmesser 150 mm analysiert.

### 2.2.4 Bohrkernanalyse, CT-Analyse (AVCA)

Mit dem Verfahren der *Acoustic Void Content Analysis* (AVCA) werden mithilfe Computertomographie von Asphaltbohrkernen (CT-Scans) die Poren, sowie Verschmutzungen innerhalb der Deckschicht visualisiert [5]. In der Regel werden zylindrische Proben mit einem Durchmesser von 50 mm untersucht. Das Resultat der Analyse zeigt quantitative Tiefenprofile des Porenvolumens, Verschmutzungsgrades und der von der Oberfläche zugängliche Porenanteil. Die von der Oberfläche her zugänglichen Poren sind wichtig für die schallabsorbierenden Eigenschaften eines Belages.

### 2.2.5 Sandfleckmethode

Die Sandfleckmethode nach DIN EN 13036-1:2010-10 ist eine einfache Messmethode um die mittlere Profiltiefe (MPD, mean profile depth) des Belages zu ermitteln. Dabei wird eine definierte Menge Quarzsand auf die Belagsoberfläche kreisrund verteilt und anschliessend der Durchmesser dieses „Sandflecks“ gemessen. Eine grosse Texturtiefe ergibt dabei einen kleinen Durchmesser, während er bei einer feinen Oberfläche gross wird. Mit der in Gleichung 2.1 wird danach die mittlere Profiltiefe in mm ermittelt.

$$R_t = \frac{40 \cdot V}{\pi \cdot d^2} \quad (2.1)$$

mit

- $R_t$  mittlere Rautiefe in mm
- $V$  Volumen des verteilten Sandes in  $\text{cm}^3$
- $d$  Durchmesser der Sandfläche in cm

### 2.2.6 Texturmessungen

Mit den Texturmessungen (Lasertexturmessungen) kann die Belagsoberfläche anhand verschiedener Kennzahlen beschrieben werden. Dabei richtet sich die Auswertung nach der ISO 13473. [11]. Bei den Texturmessungen wurden zwei verschiedene Verfahren angewendet. Zum einen das dynamische Verfahren mit Anhänger (Greenwood-Messung) und zum anderen das statische Verfahren mit dem sogenannten Laserbalken. Ersteres liefert ein kontinuierliches Längenprofil über die abgefahrte Länge, letzteres ein hochaufgelöstes Profil von 2 m Länge an ausgewählten Standorten.

### 2.2.7 Permeabilitätsmessungen

Mit den Luft-Permeabilitätsmessung nach Methode der Weibel AG (Vgl. Abbildung 2.3) kann in-situ untersucht werden, in welchem Mass ein Belag kommunizierende Poren aufweist. Dabei wird über einen

Stempel Luft durch den Belag gesogen und dabei die strömende Luftmenge bestimmt. Daraus lässt sich eine 'offene' Äquivalenzfläche berechnen, welche als Quotient zur Prüffläche angegeben wird. Je grösser dieser Wert ausfällt, desto durchlässiger ist der Belag. Das Ergebnis kann anhand von Erfahrungswerten einfach klassifiziert werden. Die Methode unterscheidet sich insofern von der Lufttopfmessung, dass zwischen Luftströmung durch den Belag (offenporige Struktur) und Luftströmung entlang der Oberfläche (Makrotextur) unterschieden werden kann. Bei SDA-Belägen kann damit in-situ der Grad der Verstopfung klassifiziert und überwacht werden. Das ist z.B. wichtig im Zusammenhang mit akustischen Unterhalt durch periodische Reinigung der Beläge, weil damit der Zeitpunkt bestimmt werden kann, ab welchem eine Reinigung nicht mehr sinnvoll ist (Vgl. Tabelle 2.3).



**Abbildung 2.3:** Messmethode der Permeabilitätsmessung

**Tabelle 2.3:** Bewertungsschema Luftdurchlässigkeit für SDA 4-16.

Luftdurchlässigkeit	Bewertung SDA 4-16
>7‰	sehr gut / neuwertig
5 - 7‰	gut / keine Sperrschicht
2 - 5‰	reduziert / Sperrschicht teilweise
0 - 2‰	schlecht / Sperrschicht komplett

### 2.2.8 Lufttopfmessungen (Luftströmungswiderstand)

Mit dem Strömungsmessgerät oder Lufttopf nach ISO 9053 (Abbildung 2.4) werden sowohl der texturinduzierte und der hohlrauminduzierte Strömungswiderstand gemessen [12]. Diese Messart ist in der Regel immer eine Kombination von beiden Strömungswiderständen.



**Abbildung 2.4:** Lufttopfmessgerät der IMP Bautest AG.

### **2.2.9 Visuelle Beurteilung**

Um die Strecken hinsichtlich ihrem Zustand und dessen Veränderung über die Zeit zu beschreiben wurden Begehungen mit visueller Inspektion durchgeführt. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der Erscheinung und Veränderungen der Makrotextur und auf mögliche, zeitlich verzögerte Einflüsse des Schleifverfahrens auf den mechanischen Zustand der Oberfläche.

### **2.3. Messprogramm**

Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Messungen gezielt ausgewählt und durchgeführt, um ein möglichst gutes Bild über die Messstrecken zu erhalten. Tabelle 2.4 gibt einen Überblick zu den durchgeführten Messungen nach Strecke.

**Tabelle 2.4:** Messprogramm innerhalb dieses Projekts mit den verschiedenen Messmethoden. In der Tabelle findet sich jeweils das Jahr der Durchführung wieder. Nicht aufgeführt sind vorhergehende Messungen, welche für die Studie ebenfalls berücksichtigt wurden.

Teststrecke	Schleifen	CPX-Belagsgüte (2.2.1)	Schallabsorption (2.2.2)	Bohrkerne, Impräg. (2.2.3)	BK, CT-Analyse (2.2.4)	Permeabilität (2.2.7)	Luftopfmessungen (2.2.8)	Visuell (2.2.9)	Rautiefe SF (2.2.5)	Lasertextur (2.2.6)
Landerswil, BE	17	22	-	-	-	22	-	22	-	-
Romont, FR	18	21/22	-	-	-	22	-	22	-	-
Corserey, FR	18	21/22	-	-	-	22	-	22	-	-
Sugiez, FR	19	21/22	-	-	-	22	-	22	22	-
Tafers, FR	19	21/22	-	-	-	22	-	22	22	-
La Vererie, FR	19	21/22	-	-	-	22	-	22	22	-
Villarlod - Farvagny, FR	19	21/22	-	22 (6 Stk.)	22 (2 Stk.)	22	-	22	22	-
Muri b. Bern, BE	19	21/22	-	-	-	22	-	22	-	-
Zofingen, AG	19	21/22	21	22 (2 Stk.)	22 (2 Stk.)	22	21/22	22	22	21/22
Muttenz, BL	20	21/22	-	-	-	22	-	22	22	21/22
Dittingen, BL	20	21/22	-	-	-	22	-	22	22	-
Rüthi, SG	20	21/22	-	-	-	?	-	22	22	21/22
Uznach, SG	20	21/22	-	-	-	?	-	22	22	21/22
Remigen, AG	20	21/22	21/22	2 Stk	2 Stk	22	22	22	22	21/22
Q. Ansermet, Stadt Genf	21	21/22	-	-	-	21/22	-	21/22	21/22	-
Veyrier, GE	21	21/22	-	-	-	21/22	-	21/22	21/22	-

## 2.4. Methodik der Datenanalyse

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Datenquellen systematisch analysiert. Jedoch standen dabei immer die akustischen Messungen mit dem CPX (Close-Proximity-Verfahren) im Vordergrund [8, 9]. Die Hauptgrösse bildet dabei der akustische Gesamtpegel und dessen zeitliche Entwicklung, ausgewertet nach der akustischen Belagsgüte als Abweichung zum Referenzmodell StL-86+. Ein detaillierter Beschrieb zur Auswertung von Strassenbelagsmessungen findet sich im Leitfaden Strassenlärm [13], respektive dem Anhang 1c des Leitfadens [14]. Sofern nicht anders beschrieben beziehen sich die CPX-Werte in dieser Studie jeweils auf einen Mischverkehr mit LKW-Anteil von 8 % was der jeweiligen Vorgaben der Kantone im allgemeinen am nächsten kommt. Sämtliche Datensätze sind als CPX-Streckenverläufe zusammen mit einer Übersichtskarte der einzelnen Abschnitte für jede Strecke im Anhang dieses Berichts zu sehen. Mit Darstellung der örtlichen sowie zeitlichen Verläufe der akustischen Messungen vor und nach der Massnahme können die Messwerte einzelner Messungen besser beurteilt und damit präzisere Erkenntnisse zur Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit der Schleifmassnahme abgeleitet werden. Je nach Strecke liegen vor der Massnahme mehr oder weniger kontinuierliche Datensätze vor.

In einem ersten Schritt wurden dann jeweils die zeitlichen Verläufe für die vordefinierten Abschnitte einer Teststrecke beurteilt. Hierbei wurde der akustische Zustand (Mittelwert) des Belags vor der Massnahme

mit dem Zustand nach der Massnahme verglichen und daraus die Initialwirkung der Massnahme (Effekt durch Schleifen) auf die akustische Güte des Belags ermittelt. Sofern ein Referenzabschnitt vorhanden ist, kann ebenfalls die Differenz zwischen ungeschliffener Referenz und geschliffenem Abschnitt zur Beurteilung des Initialeffekts mitberücksichtigt werden. Dies ist insbesondere bei Strecken relevant, wo die letzte Messung vor der Massnahme zeitlich weiter zurück liegt.

Der Effekt durch Schleifen kann auch als „regenerative Wirkung„ (oder Regenerationswirkung) bezeichnet werden. Hierbei wird implizit angenommen, dass dieser Effekt einer Reduktion des Lärms entspricht. Eine Abnahme der CPX-Werte auf der dBA Skala entspricht daher einer *positiven* Regenerationswirkung. Die regenerative Wirkung bezieht sich immer auf den Zustand vor der Massnahme des akustischen Unterhalts. Der zeitliche Verlauf davon ab dem Zeitpunkt der Massnahme wird im sogenannten Regenerations-Plot dargestellt. Diese Darstellung ist nützlich zur Beurteilung der Methode in Bezug zu geltenden Grenzwerten beim Lärmschutz.

In einem zweiten Schritt wurde zusätzlich die Wirkungen der Massnahme im Vergleich zum ebenfalls alternden Referenzabschnitt in Abhängigkeit der Zeit bestimmt. Diese Art der Darstellung wird als Wirkungsplot bezeichnet. In der Regel verschlechtert sich die akustische Belagsgüte des ungeschliffenen Belags weiter über die Zeit. Der Wirkungsplot unterscheidet sich diesbezüglich vom Regenerationsplot und dient insbesondere zur Bestimmung der Dauerhaftigkeit der akustischen Wirkung durch die Massnahme, von welcher Anwohnern unabhängig von Grenzwert im Endeffekt profitieren.

Die Kombination verschiedener Analysemethoden trägt dazu bei, ein umfassendes Bild von der Wirkung der Massnahme auf die akustische Güte des Belags zu erhalten. Dies hilft, die Wirksamkeit von Massnahmen zu bewerten und Entscheidungen über weitere Massnahmen oder Verbesserungen zu treffen.

## 2.5. Belagskategorien

Innerhalb dieser Studie wurden verschiedenste Belagstypen untersucht. Eine Auflistung der Belagstypen findet sich in der Tabelle 2.5. Die Tabelle zeigt eine Gruppierungen für die Beläge nach verschiedenen Belagseigenschaften in Bezug auf Korngrösse, Hohlraum und Textur.

**Tabelle 2.5:** Klassifizierung der Beläge nach Korngrösse, Hohlraum-typ und Textur-Typ.

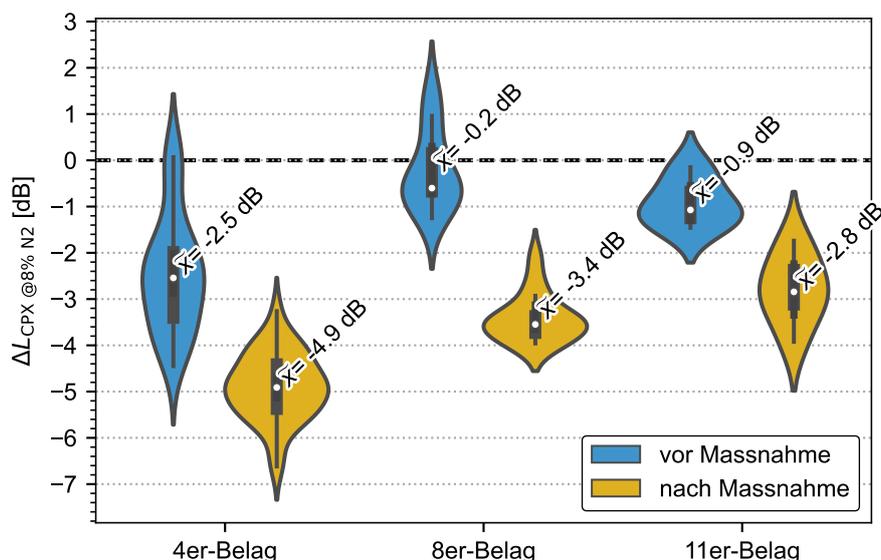
Belag	Korngrösse	Hohlraum-Typ	Textur-Typ
LNA 2	2 mm		
SDA 4 A			
SDA 4-12			
Famsi 4			
Nanosoft 4	4 mm	offenporig	
Sapaphone 4			makro-rau
SDA 4-16			
SDA 8-12			
SDA 8 A	8 mm	offen-dicht	
ACMR 8			
ACMR 11			
AC 11	11 mm	dicht	glatt
MA 11			glatt - rau (je nach Alter)

### 3. Resultate

Mit dem Schleifen kann bei korrekter Ausführung aus akustischer Sicht eine Verbesserung der Belagsgüte erzielt werden. So wurde auf sämtlichen Strecken eine positive Regenerationswirkung erzielt, wenn auch nicht im gleichen Ausmass. Das ist ein erstes wichtiges Resultat, da je nach Wahl des Verfahrens auch eine negative Wirkung (d.h. Verschlechterung der Lärmwerte) möglich ist. Die akustischen Messungen zeigten, dass die regenerative Wirkung initial die besten Werte annimmt und diese mit der Zeit wieder abnimmt. In diesem Kapitel werden die Wirkmechanismen, die Dauerhaftigkeit und Einflussfaktoren für eine gute Initial- und Langzeitwirkung anhand den Messungen untersucht und Erklärungen geliefert.

#### 3.1. Initialwirkung und Belagsgüte nach Schleifen

Die Initialwirkung stellt die Differenz in dB dar, welche durch das Schleifverfahren in Bezug auf die akustische Belagsgüte vor der Massnahme erreicht werden kann. Dazu sind in der folgenden Abbildung 3.1 die mittleren Absolutwerte für Belagsklassen nach Korngrösse dargestellt, ausgedrückt als Belagsgütewerte im Vergleich zu StL-86+ mit 8 % N2-Anteil. Dabei zeigt sich, dass bei 4er-Belägen die mittlere Belagsgüte zum Ausgangszeitpunkt  $-2.5 \pm 1.3$  dB betrug und sich mit den Schleifmassnahmen wieder auf  $-4.9 \pm 0.7$  dB verbesserte. Somit konnte im Mittel eine akustische Verbesserung (=Initialwirkung) von rund 2.5 dB erzielt werden. Wie ebenfalls in der Abbildung ersichtlich ist, sind auf den anderen Belagstypen ebenfalls deutliche Verbesserungen von -3.1 dB bei den 8er- und -1.9 dB bei den 11er-Belägen erzielt worden. Absolut gesehen ist die mögliche Belagsgüte bei den 4er-Belägen am besten wobei aber bei den 8er-Belägen die stärkste Initialwirkung erzielt wurde. Bemerkenswert ist ebenfalls die Tatsache, dass bei den dichten 11er-Belägen durch das selbe Verfahren ebenfalls eine nennenswerte akustische Verbesserung erreicht werden kann.

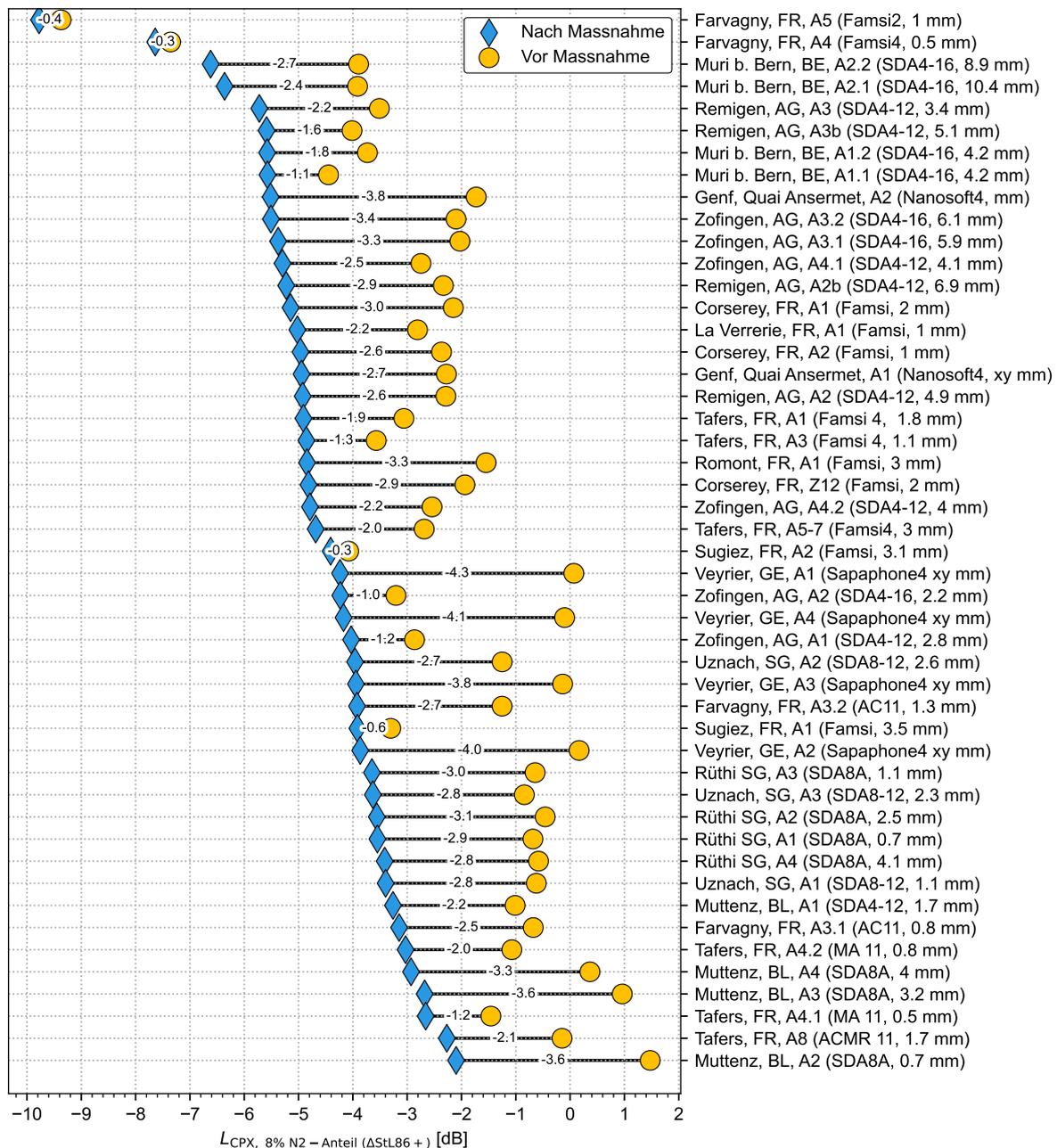


**Abbildung 3.1:** Absolute Belagsgütewerte (Mischverkehr mit 8% N2-Anteil) für Belagskategorien nach Korngrösse vor und nach Massnahme. Die Differenz zwischen der beiden Werte entspricht der Initialwirkung durch Schleifen.

### 3.1.1 Akustische Initialwirkung der einzelnen Strecken (absolut, vorher vs. nachher)

Zwischen den einzelnen Strecken zeigen sich bei der Initialwirkung beträchtliche Unterschiede. Für eine rein statistische Betrachtung ist die verfügbare Anzahl vergleichbarer Strecken zu klein und es bedarf jeweils auch einen Blick auf das Ergebnis einzelner Objekte. Neben unterschiedlichen Umwelteinflüssen gibt es weitere Störfaktoren, welche einzelne Ergebnisse beeinflussen können. So sind z.B. zwischen den Messzeitpunkten (vor und nach der Massnahme) pro Strecke jeweils unterschiedlich lange Zeitintervalle vergangen (vgl. Tabelle A.1). Solche Faktoren sind bei der Interpretation der Resultate entsprechend zu berücksichtigen. Die Abbildung 3.2 zeigt daher die Initialwirkungen der Schleifmassnahme für sämtliche geschliffenen Abschnitte (ohne Strecken für die keine gültige Vorhermessung existiert) geordnet nach der erreichten Belagsgüte durch die Schleifmassnahme.

Dabei zeigt sich bereits, dass die Belagsgüte, welche erzielt werden kann unter anderem von der ausgehenden Belagsgüte abhängig sind. So liegen die gelben Punkte im oberen Bereich der Grafik (Strecken mit besserer Belagsgüte nach Massnahme) tendentiell weiter links im Vergleich zum unteren Teil der Abbildung. Es ist auch ersichtlich, dass es sich bei den beiden Abschnitten in Farvagny FR mit Famsi 4 und Famsi 2 um Spezialfälle handelt: die Strecke wurde in praktisch neuem Zustand geschliffen mit dem Zweck, mögliche negative Effekte durch das Verfahrens (wie z.B. ein Verstopfen der offenen Poren bei SDA) zu ergründen. Es ist umso bemerkenswerter, dass selbst auf diesen Abschnitten eine, wenn auch nur minimale, Verbesserung erzielt wurde. Ein weiterer Sonderfall zeigt sich mit der Strecke in Sugiez: auf den beiden Abschnitten wurde dort nur eine minimale Initialwirkung von -0.3 bis -0.6 dB erreicht. Der Grund dafür ist unklar; einerseits könnte es mit dem überdurchschnittlich hohen Ausgangswert zu tun haben, andererseits ist zu vermerken, dass diese Strecke als einzige bei Regenfall geschliffen wurde, was möglicherweise einen negativen Einfluss auf die Wirkung der Massnahme hat.



**Abbildung 3.2:** Absoutpegel vor (gelbe Punkte) und nach der Schleifmassnahmen (blaue Rhomben) für alle Abschnitte (ohne Referenzabschnitte) sortiert nach akustischer Belagsgüte nachher. Die jeweilige Initialwirkung ist als Zahlenwert aus der Differenz angegeben. Strecken für die keine gültige Vorhermessung existiert, können hier nicht dargestellt werden.

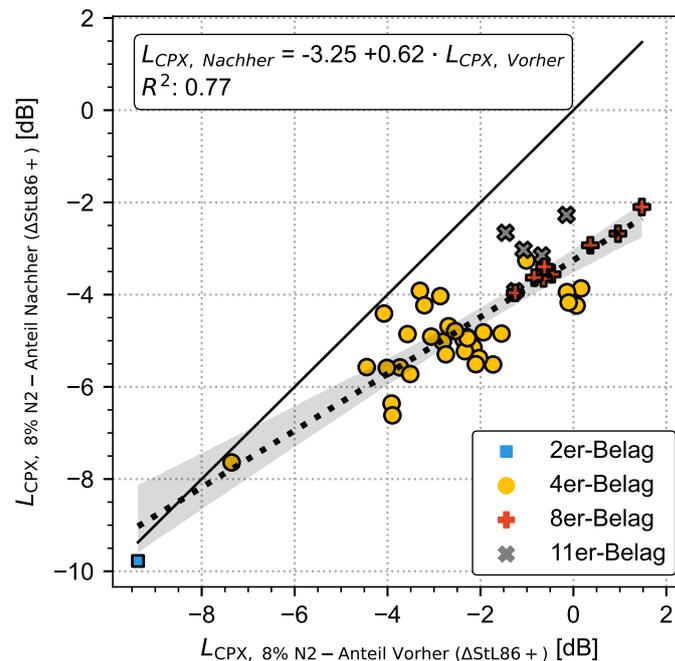
Aus der Abbildung 3.2 ergeben sich weiter folgende Beobachtungen:

- Auf allen Abschnitten konnte initial eine Verbesserung erzielt werden unabhängig vom Belagstyp
- Spitzenreiter bei der Initialwirkung ist Veyrier, GE mit einer Verbesserung der Belagsgüte von

über -4 dB.

- Durch die Schleifmassnahmen wird die akustische Belagsgüte Abschnittsweise homogenisiert. Das heisst, dass allfällige Unterschiede innerhalb der Strecke tendenziell ausgeglichen werden.
- Die Homogenisierung zeigt sich ebenfalls auf globaler Ebene. Die gelben Punkte (Nach Massnahme) liegen viel näher beieinander als die blauen Punkte. Dies äussert sich ebenfalls in der Standardabweichung  $\sigma_{\text{vor}} = 1.96$  dB und  $\sigma_{\text{nach}} = 1.38$  dB
- Es lässt sich ein leichter Zusammenhang zwischen der Ausgangswirkung und der Wirkung nach der Massnahme erahnen.

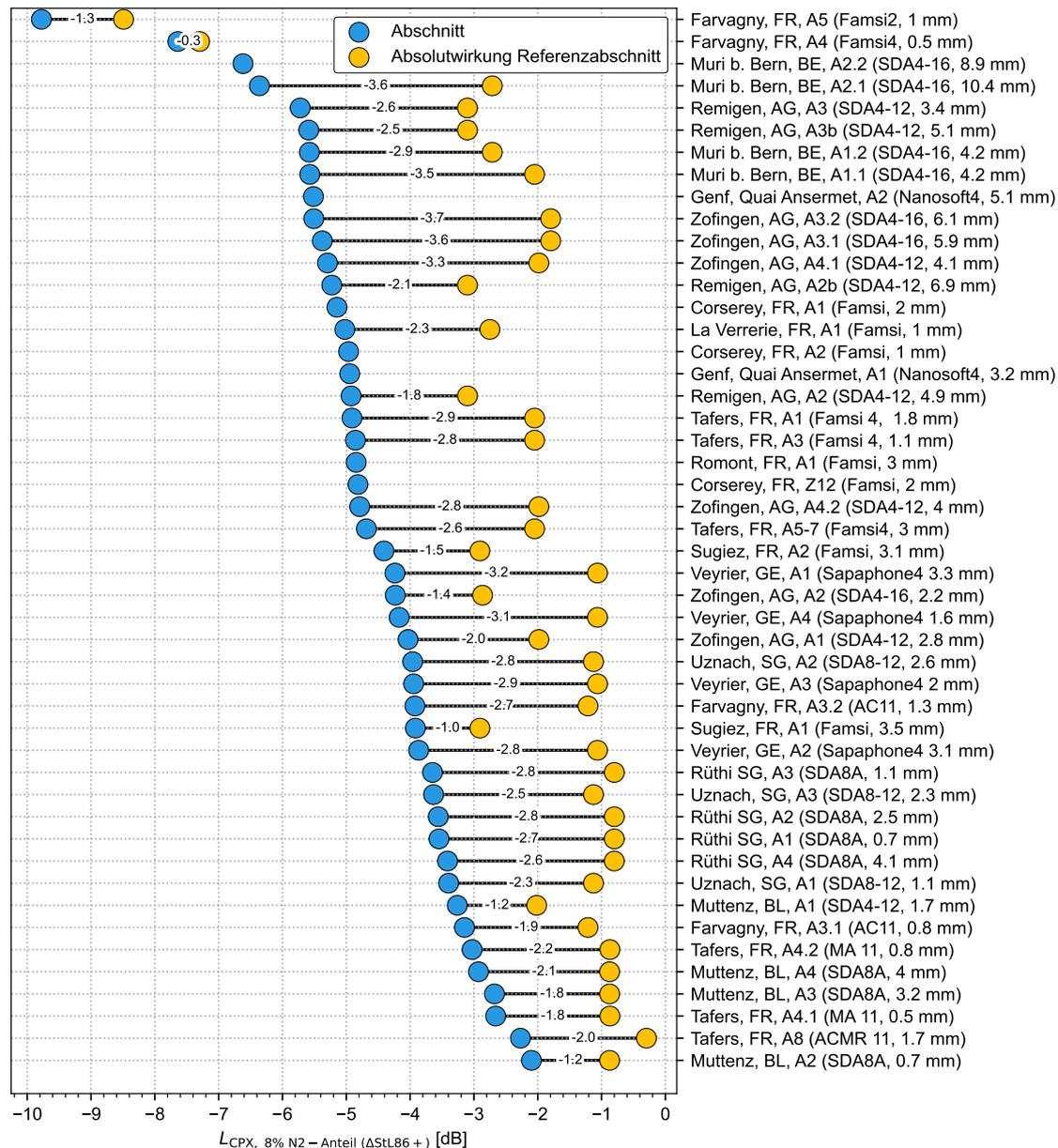
Bezüglich der Wirkung zeigt sich somit eine Abhängigkeit vom Ausgangszustand. So werden bei Belägen mit einer schlechteren akustischen Ausgangsbelagsgüte tendenziell die besseren Wirkungen (Vorher-Nachher) erzielt. Dies wird in der folgenden Abbildung 3.3 verdeutlicht: Der Zusammenhang von der Belagsgüte vor der Massnahme und nach der Massnahme ist ersichtlich. In diesem Fall resultierte ein Korrelationskoeffizient von  $R^2$  von 0.77, was auf den Zusammenhang hindeutet. Das Modell wird natürlich beeinflusst von den beiden Messwerten in Farvagny (Sehr früh geschliffene Famsi2 und Famsi4-Beläge). Bei diesen war die Wirkung (Vorher zu Nachher natürlich minimal). Grundsätzlich lässt sich im Mittel eine Wirkung von ca. 3 dB (Vorher - Nachher) erwarten. Ebenso ist zu beachten, dass dieses Modell gesamthaft für verschiedene Belagstypen, für verschiedene Werkzeuge und Abtragstiefen erstellt wurde. Es darf dabei angenommen werden, dass sich der Ausgangszustand des Belages folglich noch deutlich in diesem Modell wiederfindet. Und das Modell darf nicht über die Modellgrenzen angewendet werden (Extrapolation). So darf zum Beispiel angenommen werden, dass dieses Modell nicht für einen komplett neuen SDA8 mit einem Ausgangswert von ca. -5 dB angewendet werden kann und der Belag in der Folge -6.5 dB erreicht, denn die 8er - Beläge sind nur bis ca. -2 dB definiert.



**Abbildung 3.3:** Modellierung der Initialwirkung (X-Achse: Messung unmittelbar vor der Massnahme, Y-Achse: Messung unmittelbar nach der Massnahme). Dabei sind die einzelnen Punkte farblich nach der Belagskategorisierung eingefärbt.

### 3.1.2 Initialwirkung der einzelnen Abschnitte im Vergleich zum Referenzabschnitt

Wenn nun die Auswertung auf die Referenz bezogen wird, wird die Komponente der unterschiedlichen Messzeitpunkte eliminiert. Ebenfalls wird damit sichergestellt, dass der Belag und die Referenz möglichst derselben Alterung, Witterung und auch einer ähnlichen Verkehrsbelastung ausgesetzt ist. Grundsätzlich können sich aber Abschnitte trotz dieses Setups unterschiedlich verhalten. Im Gegenzug dazu ist allerdings zu berücksichtigen, dass dafür nicht alle Strecken mit dieser Art aufgeführt werden können, da bei manchen Strecken keine Referenz vorhanden ist (Vgl. Tabelle 2.1). Das Resultat dieser Analyse ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Grundsätzlich ändert sich das Bild über alle Strecken gesehen im Vergleich zu Abbildung 3.2 kaum. Für einzelne Abschnitte betrachtet relativiert sich hingegen die Aussage. So wird Spitzenreiter Veyrier, GE durch Zofingen, AG abgelöst und in Sugiez, FR ist immerhin ein Initialeffekt von -1.0 bis -1.5 dB zu verzeichnen.

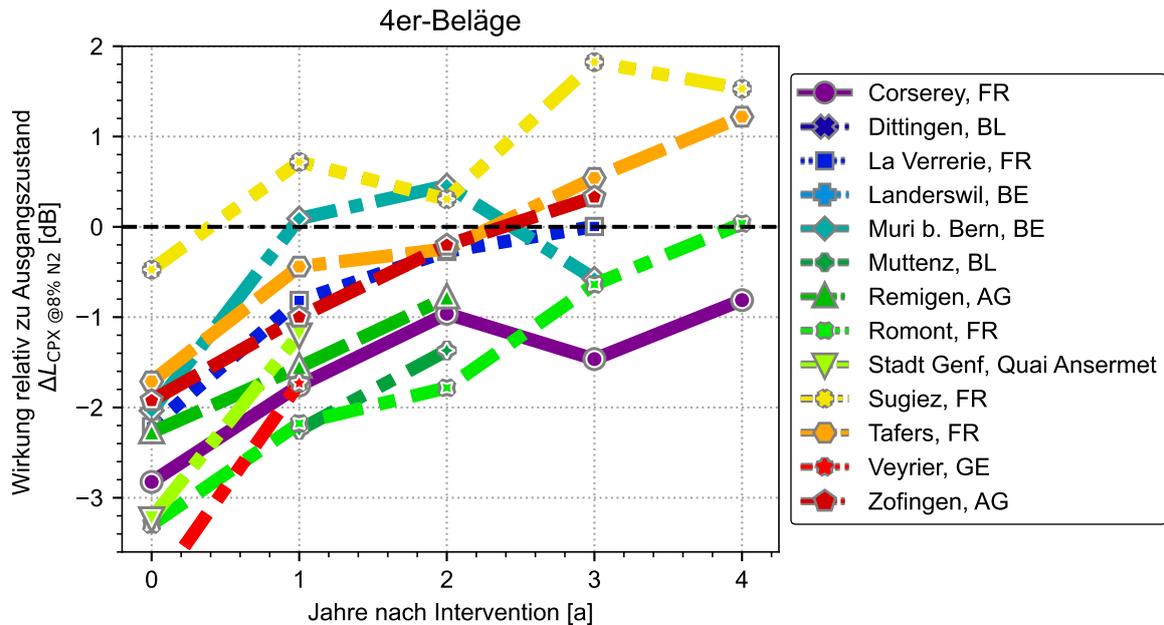


**Abbildung 3.4:** Akustische Initialwirkung des Absolutpegels bei Schleifmassnahmen für alle Abschnitte im Vergleich zu deren Referenzabschnitt sortiert nach Wirkung nach der Massnahme.

### 3.2. Regenerative Wirkung auf einzelnen Strecken

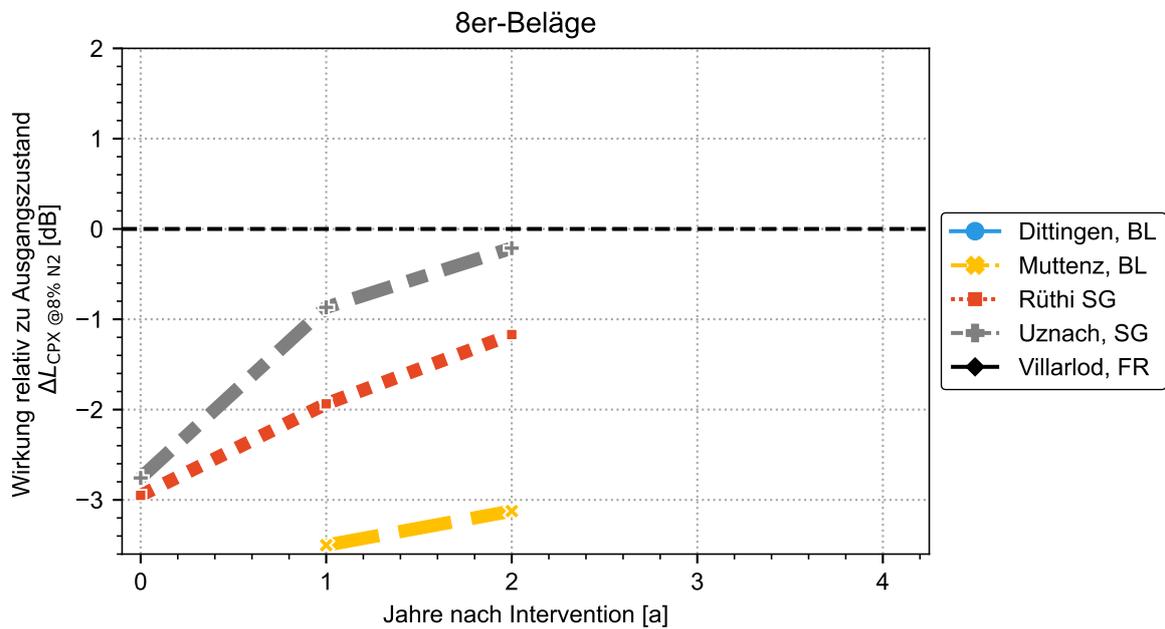
In der folgenden Abbildung 3.5 ist der zeitliche Verlauf der regenerativen Wirkung für die Strecken mit offenporigen 4er-Belägen aufgezeigt. Zur Erinnerung sei hier erwähnt, dass sich die Regenerationswirkung aus der Differenz der akustischen Belagsgüte relativ zur Ausgangswirkung vor der Schleifmassnahme bildet. Diese Abbildung verdeutlicht, wie sich die Strecken nach der Intervention entwickeln. Dabei gilt zu berücksichtigen, dass diese Art der Darstellung eine Mittelung über verschiedene Verfahren, Frästiefen

und Belastungssituationen darstellt. Es lässt sich erahnen, dass die gemessene akustische Belagsgüte sich im Mittel nach ca. nach 3 Jahren wieder auf dem Ausgangslevel befindet. Oder anders ausgedrückt hält die Regenerationswirkung bei 4er-Belägen im Schnitt rund 3 Jahre an.

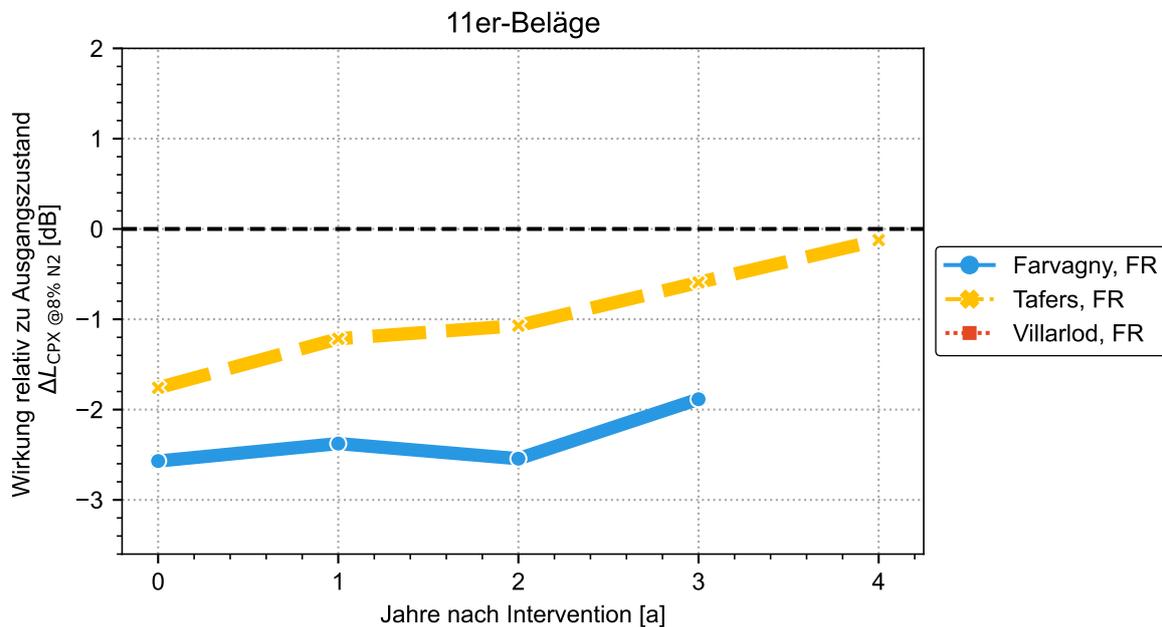


**Abbildung 3.5:** Entwicklung der Wirkung von Schleifmassnahmen der akustischen Belagsgüte von allen Standorten mit 4er-Grösstkornbelägen als Vergleich zum Ausgangszustand.

In den Abbildungen 3.6 und 3.7 ist der Regenerations-Plot entsprechend für die Strecken mit 8er- und 11er-Belägen dargestellt. Bei den 8er-Belägen fehlt es an Langzeitdaten über zwei Jahre hinaus. Es ist aber zu sehen, dass die regenerative Wirkung um mindestens diese Zeit anhält. Bei den dichten 11er-Belägen ist die Datengrundlage mit lediglich zwei Zeitverläufen ebenfalls reduziert. Es ist aber interessanterweise festzustellen, dass hier die Regenerationswirkung für mindestens 4 Jahre, und damit länger als bei den 4er-Belägen, anzuhalten scheint.



**Abbildung 3.6:** Entwicklung der Wirkung von Schleifmassnahmen der akustischen Belagsgüte von allen Standorten mit 8er-Grösstkornbelägen als Vergleich zum Ausgangszustand. Für Dittingen, BL und Villarlod FR erscheinen keine Kurven, da keine Vorhermessung vorhanden ist.



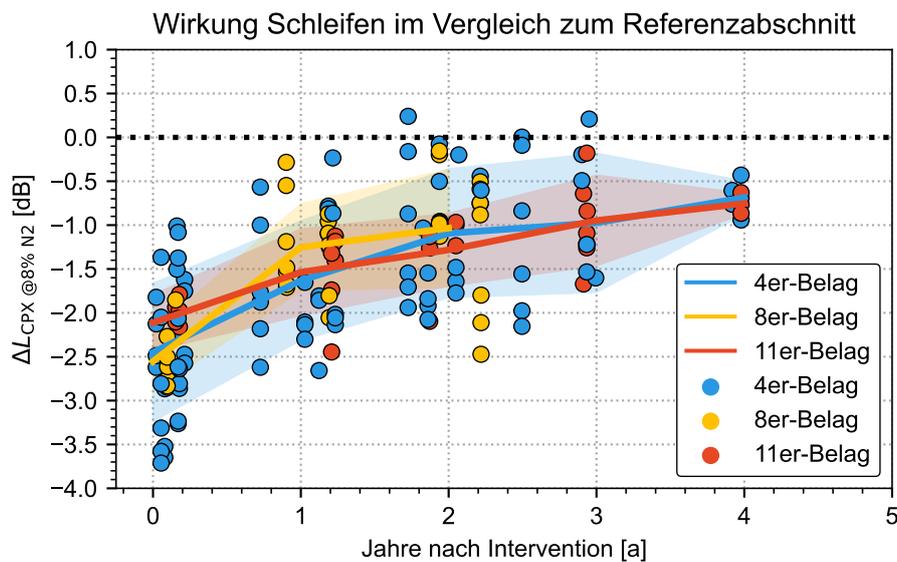
**Abbildung 3.7:** Entwicklung der Wirkung von Schleifmassnahmen der akustischen Belagsgüte von allen Standorten mit 11er-Grösstkornbelägen als Vergleich zum Ausgangszustand. Für Villarlod ist in dieser Darstellungsform keine Kurve ersichtlich, da keine Ausgangsmessung an diesem Punkt vorhanden ist.

### 3.3. Dauerhaftigkeit der akustischen Wirkung

Wie bereits im Kapitel 3.1 angedeutet, unterliegen die Beläge nach der Massnahme, wie bereits vor der Massnahme einer akustischen Alterung. Diese Alterung bestimmt die Dauerhaftigkeit der Massnahme, welche im Zusammenhang mit dem Lärmschutz von besonderer Bedeutung ist. Wir unterscheiden in dieser Studie zwischen zwei Arten der Dauerhaftigkeit: einer absoluten Dauer bzw. Regeneration im Vergleich zum Zustand vor der Massnahme und einer Dauer der akustischen Wirkung im Vergleich zum zeitlich ebenfalls alternden Referenzabschnitt. Diese beiden Darstellungen sind nötig um zu unterscheiden, wie lange a.) Die Massnahme einen positiven lärmindernden Effekt erzeugt und b.) wie viele Jahre der Belag in seiner akustischen Leistung 'zurückversetzt' (regeneriert) werden kann. In den meisten Fällen wird der Auslöser für die Massnahme zum akustischen Unterhalt das Unterschreiten eines geltenden Grenz- oder Toleranzwertes sein. Mit der Regenerationsdauer wird somit bestimmt, wie lange diese Massnahme anhält.

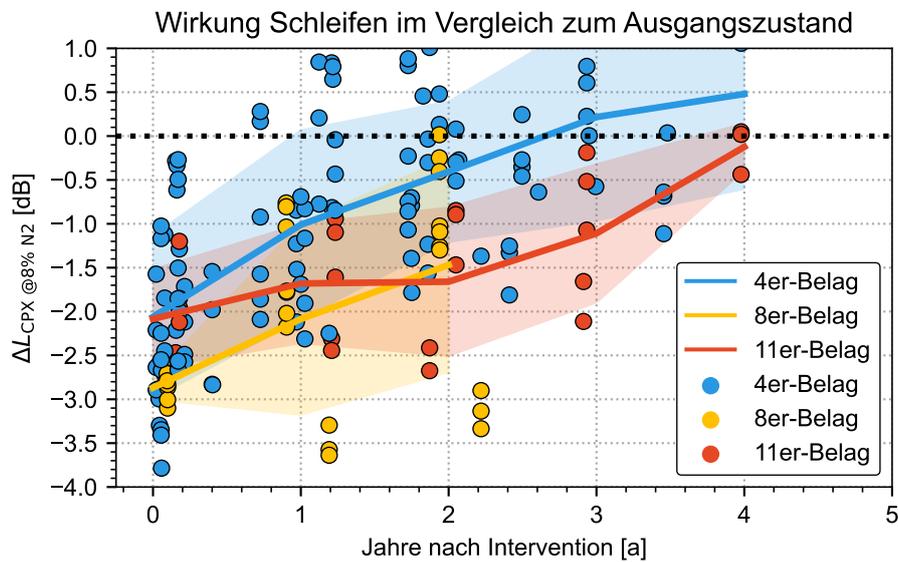
In der Abbildung 3.8 ist die Wirkung des Schleifens relativ zum jeweiligen (alternden) Referenzabschnitt dargestellt. Dabei werden die Beläge nach den Kategorien gemäss der Korngrösse klassiert (vgl. Tabelle 2.5). und die mittlere Wirkung (farbige, ausgezogene Linie) sowie der Streubereich (Fläche in entsprechender Farbe) illustriert. So lange, dass sich die Alterungskurve unterhalb der 0-Linie befindet ist von der Schleifmassnahme noch ein Effekt feststellbar. Es zeigt sich für alle Belagskategorien, dass die Schleifmassnahmen innerhalb des Monitoringzeitraums im Schnitt noch Wirkung zeigen. Für 4er- und 11er-Beläge dauert diese Wirkung somit also mindestens 4 Jahre an und nach dieser Zeit ist der

geschliffene Belag noch knapp -1dB leiser im Vergleich zur geschliffenen Oberfläche. Für die 8er-Beläge reichen die Langzeitdaten nur über gut zwei Jahre. Aus dem Trend innerhalb dieser Zeit zu schliessen, ist eine vergleichbare Langzeitwirkung wie für die anderen Belagstypen zu erwarten. In der Tat, verlaufen die drei Kurven in Abbildung 3.8 fast identisch. Es offenbart sich aus dieser Abbildung ebenfalls, dass die geschliffenen Abschnitte in der Tendenz schneller altern als die Referenzabschnitte. Denn falls der Referenzabschnitt im selben Masse altern würde, wie die bearbeiteten Abschnitte, verlief die Kurve horizontal.



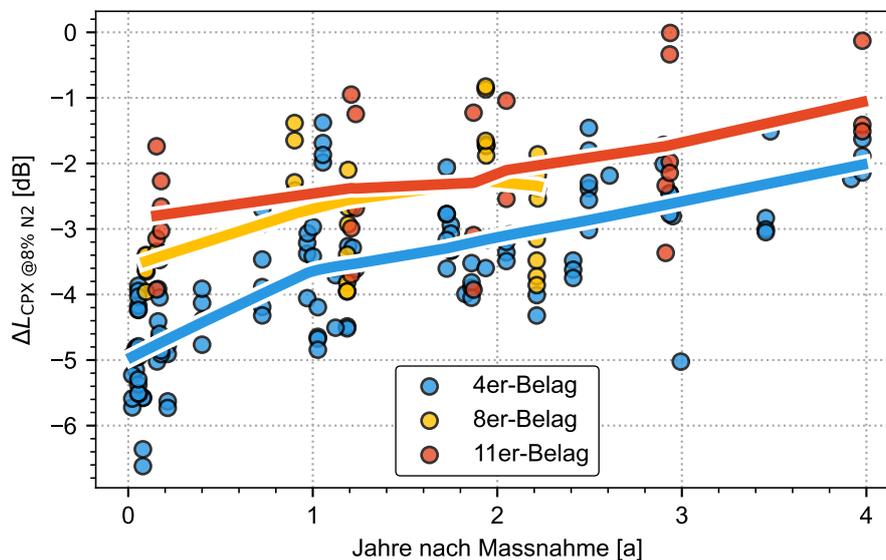
**Abbildung 3.8:** Wirkung Schleifmassnahme relativ zum alternden Referenzabschnitt gruppiert nach Belagstyp.

Im Gegensatz dazu ist in Abbildung 3.9 die Dauerhaftigkeit der Massnahme im Vergleich zum Ausgangszustand dargestellt und damit die Frage beantwortet, wie lange die Massnahme den Belag in der akustischen Leistung regeneriert. Unter Berücksichtigung der Streuung ist beim 4er-Belag eine Regenerationsdauer von 2-4 Jahren ersichtlich während beim 11er-Belag eine Dauer von rund 4 Jahren gesichert scheint. Beim 8er wiederum ist die Aussage schwieriger, anhand der vorliegenden Daten ist vorerst wie beim 4er von Regeneration von 2-4 Jahren auszugehen. Dabei zeigt sich, dass die Streuung im Vergleich zur Abbildung 3.8 deutlich erhöht ist. Dies ist soweit verständlich, da in dieser Betrachtung eigentlich zwei komplett verschiedene Zeitpunkte miteinander verglichen werden (Vorhermessung und Nachhermessung). Somit äussert sich ein unterschiedliches Alterungsverhalten zwischen den Standorten bei diesen quervergleichenden Analysen stärker.



**Abbildung 3.9:** Wirkung Schleifmassnahme im Vergleich zum Ausgangszustand gruppiert nach Belagstyp.

Wie sich aus den Abbildungen 3.8 und 3.9 zeigt unterliegt sowohl die initiale Wirkung wie auch die Entwicklung der akustischen Alterung einer relativ grossen Streuung. Dies verdeutlicht sich ebenfalls in der Abbildung 3.10, in welcher die Absolutpegel nach der Schleifmassnahme aufgezeigt wird. Hierbei zeigt sich, dass vor allem die 4er-Beläge sowohl initial nach der Massnahme, als auch nach 4 Jahren immer die besten Belagskennwerte aufweisen. Ebenfalls zeigt sich, dass die Alterung im Bereich von 1-4 Jahren relativ für alle Belagstypen konstant verläuft. Das heisst, dass die geschliffenen Beläge vergleichbare Alterungsprozesse durchmachen.



**Abbildung 3.10:** Verlauf der Absolutwirkung von Schleifmassnahmen als Belagsgütwert (Mischverkehr mit 8% N<sub>2</sub>-Anteil) für verschiedene Grösstkornbeläge.

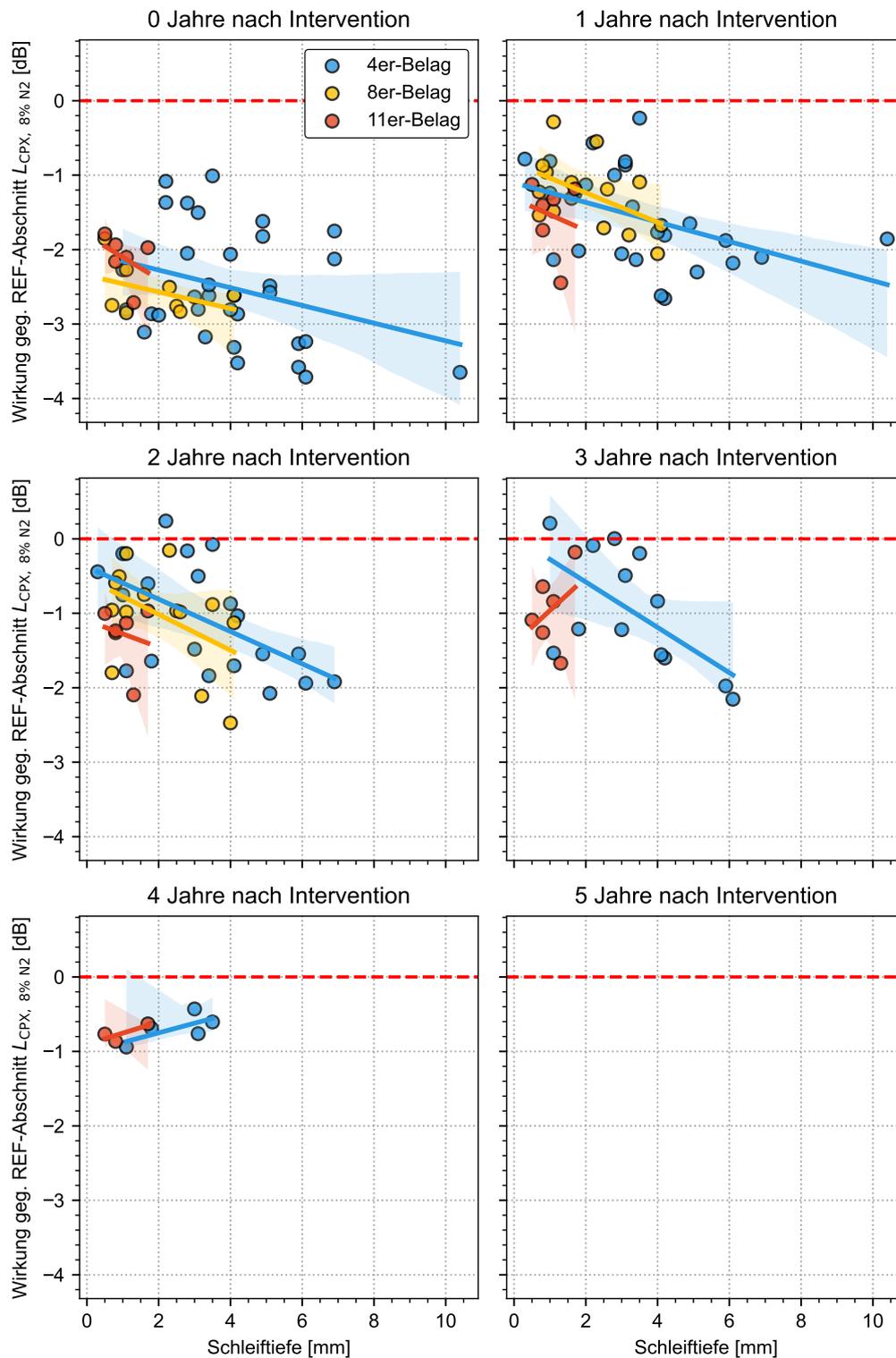
### 3.3.1 Einflussfaktoren Schleifen

Für die Ermittlung der Einflussfaktoren hinsichtlich der Initialwirkung als auch für die Dauerhaftigkeit der akustischen Wirkung der Schleifmassnahme wurden verschiedene Analysen durchgeführt. Dabei standen folgende Hypothesen zur Prüfung:

- Ausgangswirkung: Bei welcher Ausgangswirkung soll geschliffen werden?
- Belagstyp: Was ist der Einfluss des Belagstyps?
- Abtragtiefe: Welcher Einfluss hat die Abtragtiefe?

### 3.3.2 Einflussfaktor Schleiftiefe und Belagstyp

In der folgenden Abbildung 3.11 ist die Wirkung der Schleifmassnahme hinsichtlich der akustischen Belagsgüte in Abhängigkeit der Schleiftiefe (X-Achse) dargestellt. Die Wirkung bezieht sich in diesem Fall als Differenz zum ebenfalls alternden Referenzzustand. In der Abbildung wird unterschieden nach Belagsalter (Subplots) und nach Belagstyp (Farbe). In den Grafiken ist jeweils die lineare Regression der Wirkung inklusive des Vertrauensbereichs 95%-Konfidenzintervall des linearen Regressionsmodells dargestellt (Flächendarstellung). Diese Flächen zeigen etwas die Unsicherheiten des Modells auf.



**Abbildung 3.11:** Wirkung der Schleifmassnahmen relativ zum Referenzzustand in Abhängigkeit der Korngrösse (Unterscheidung nach Farbe) und Schleiftiefe (X-Achse).

Wie sich zeigt, verläuft die Steigung bei nahezu allen Belägen und allen Alter durchwegs negativ. Dies heisst, dass mit einer erhöhten Schleiftiefe in der Tendenz auch mehr Wirkung erzielt werden kann. Dieser Trend zieht sich über mehrere Jahre hin und ist auch für die Belagskategorien (4er, 8er) erkennbar. Für die 11er Beläge ist kein solcher Trend auszumachen. Bei diesen Belägen scheint die Schleiftiefe also keinen Einfluss auf die resultierende Wirkung zu haben. Es ist allerdings auch zu erwähnen, dass keiner der dichten 11er-Belägen über eine Tiefe von 2 mm geschliffen wurde. Es gilt ebenfalls zu beachten, dass das Modell nur basierend auf der Schleiftiefe die Varianz des Datensatzes nicht vollständig erklären vermag. So gibt es teilweise deutliche Ausreisser nach unten (bessere Wirkung) als auch nach oben (schlechtere Wirkung). Nichtsdestotrotz wurde die statistische Signifikanz des Modelles mit einem t-Test getestet. Damit soll etwas Sicherheit in diese Aussage gebracht werden. In der Tabelle 3.1 ist neben den Koeffizienten des linearen Regressionsmodelles ebenfalls die statistische Signifikanz dieser Steigung angegeben. Dabei zeigt sich, dass die Schleiftiefe zumindest für 4er-Beläge eine hohe Signifikanz aufweist. Bei diesen Auswertungen ist immer zu beachten, dass die Datengrundlage nach wie vor relativ dünn ist und die Modelle relativ stark von einzelnen Strecken und deren Werten beeinflusst werden können.

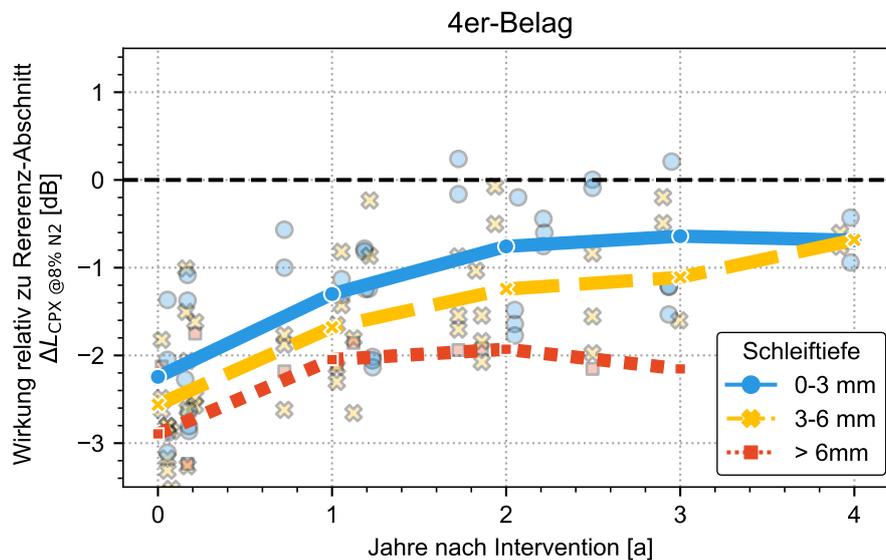
**Tabelle 3.1:** Signifikanzlevel des linearen Regressionsmodells gemäss der Abbildung 3.11. Sehr hohe Signifikanz \*\*\*, falls  $p < 0.01$ , Hohe Signifikanz: \*\*,  $p < 0.05$ ; Mittlere statistische Signifikanz \* falls  $p < 0.1$ . Keine Signifikanz falls  $p > 0.1$

Jahr	Belag	$p$	Sig. Code	Koeffizient
0	4er-Belag	0.027	**	-0.16
1	4er-Belag	0.049	**	-0.12
2	4er-Belag	0.012	**	-0.22
3	4er-Belag	0.026	**	-0.30
0	8er-Belag	0.329		-0.11
1	8er-Belag	0.053	*	-0.24
2	8er-Belag	0.172		-0.33

### 3.3.3 Dauerhaftigkeit der Massnahme in Abhängigkeit der Schleiftiefe

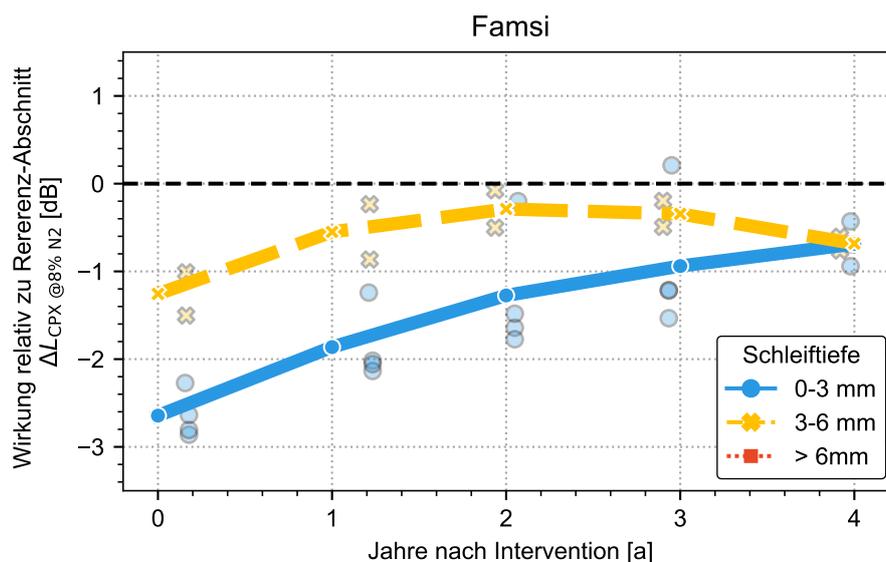
Im vorhergehenden Kapitel 3.3.2 wurde aufgezeigt, dass die Schleiftiefe einen Einfluss sowohl auf die Initialwirkung als auch die Langzeitwirkung haben kann. Es zeigte sich jedoch auch, dass die Wirkung auch abhängig von einzelnen Strecken sein könnte. So wurde nun untersucht, wie sich für 4er Beläge die Alterungskurven zusammensetzen. Dazu ist in der folgenden Abbildung 3.12 die akustische Wirkung im Vergleich zum Referenzzustand in Abhängigkeit von drei verschiedenen Schleiftiefen (0-3 mm, 3-6 mm und >6mm) aufgezeigt. Dabei ist zu erkennen, dass sich die Daten gut separieren lassen. Dennoch sind auch innerhalb dieser Kategorien noch relativ grosse Streuungen innerhalb der Daten zu erkennen. Grundsätzlich lassen sich aber die Erkenntnisse folgendermassen zusammenfassen:

- Keine schnellere Alterung bei höherer Schleiftiefe
- Schleiftiefen von 0-2 mm (ebenfalls bis 4mm) schneiden bei 4er Belägen tendenziell schlechter ab.

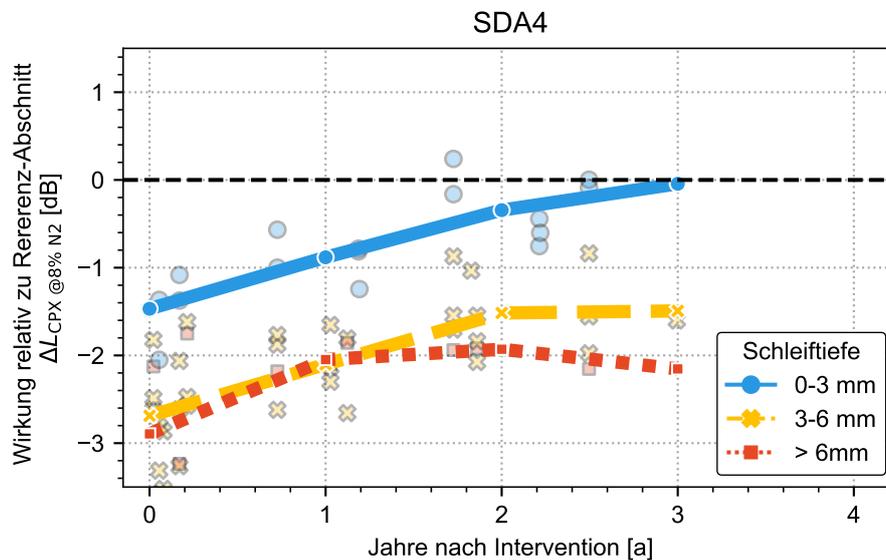


**Abbildung 3.12:** Entwicklung der Wirkung der akustische Belagsgüte von Schleifmassnahmen auf 4er-Belägen in Abhängigkeit der Schleiftiefe dargestellt als Differenz zum alternden Referenzabschnitt.

Um die Streuung der Abbildung 3.12 etwas einzugrenzen wurde noch versucht ein weiteres Unterscheidungsmerkmal zu integrieren. In diesem Fall wurde noch zwischen den Belagstypen Famsi4 und SDA4 unterschieden. Die Abbildung 3.13 zeigt die Abhängigkeit der Wirkung von Schleifmassnahme für Famsi während die Abbildung 3.14 die Alterung für SDA4 aufzeigt.

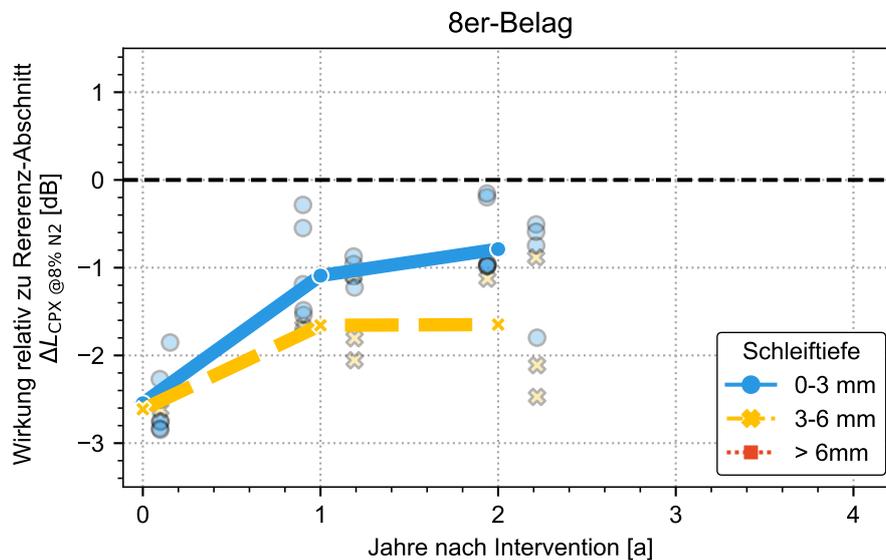


**Abbildung 3.13:** Entwicklung der Wirkung der akustische Belagsgüte von Schleifmassnahmen auf Famsi-Belägen in Abhängigkeit der Schleiftiefe dargestellt als Differenz zum alternden Referenzabschnitt.



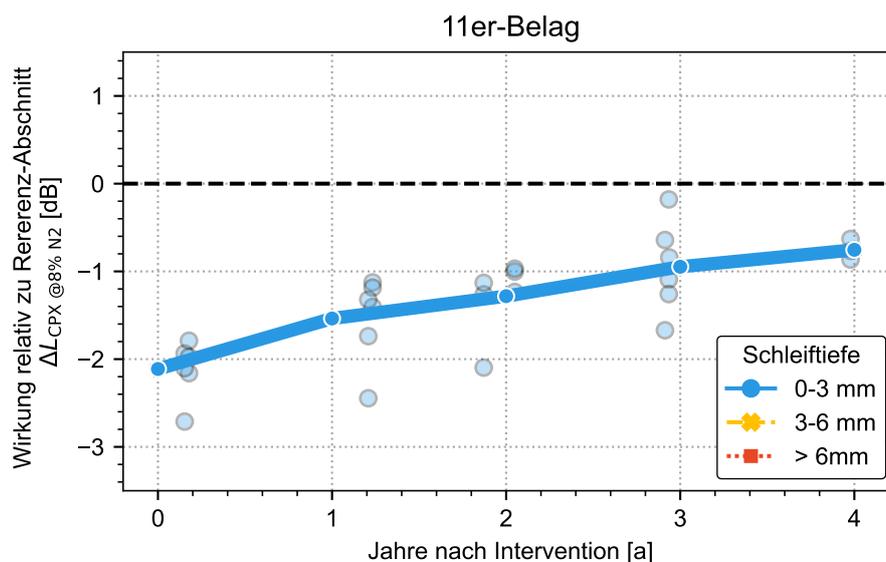
**Abbildung 3.14:** Entwicklung der Wirkung der akustische Belagsgüte von Schleifmassnahmen auf SDA4-Belägen in Abhängigkeit der Schleiftiefe dargestellt als Differenz zum alternden Referenzabschnitt.

Beim Vergleich der Abbildungen 3.13 und 3.14 verdeutlicht sich, dass die Datengrundlage noch relativ dünn ist. So resultiert bei den Famsi-Belägen eine sehr gute Wirkung bei kleineren Schleiftiefen, während bei SDA4 das Gegenteil der Fall ist. Entweder ist dies nun ein Widerspruch, oder die Beläge scheinen sich effektiv unterschiedlich zu verhalten. Allerdings muss hierbei ebenfalls berücksichtigt werden, dass im Falle des Famsis die Werte von 3-6 mm nur von einer einzelnen Strecke (Sugiez, FR) resultieren. Diese Strecke wies bereits initial sehr schlechte Wirkungen auf (Vgl. Anhang N, auf Seite 161). Für 8er-Beläge zeigt sich, wie bereits im vorderen Kapitel erwähnt nur eine schwache Abhängigkeit der Schleiftiefe. Die Abbildung 3.15 verdeutlicht dies. Allenfalls ist eine leichte Tendenz zu besseren Wirkungen bei etwas höheren Schleiftiefen zu erkennen.



**Abbildung 3.15:** Entwicklung der Wirkung der akustische Belagsgüte von Schleifmassnahmen auf 8er-Belägen in Abhängigkeit der Schleiftiefe dargestellt als Differenz zum alternden Referenzabschnitt.

Für 11er-Beläge (Abbildung 3.16) konnte wie vorhin erwähnt keinen Zusammenhang zur Schleiftiefe ermittelt werden. Dies hat sicherlich auch damit zu tun, dass keine grosse Variation an Schleiftiefen aus den Teststrecken vorhanden sind. Was sich jedoch zeigt ist eine relativ stabile Wirkung über eine relativ lange Zeitdauer.

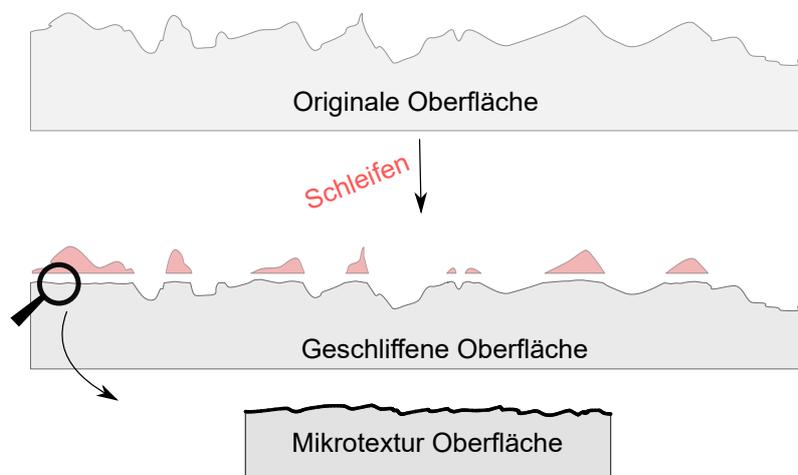


**Abbildung 3.16:** Entwicklung der Wirkung der akustische Belagsgüte von Schleifmassnahmen auf 11er-Belägen in Abhängigkeit der Schleiftiefe dargestellt als Differenz zum alternden Referenzabschnitt.

### 3.4. Wirkungsmechanismen

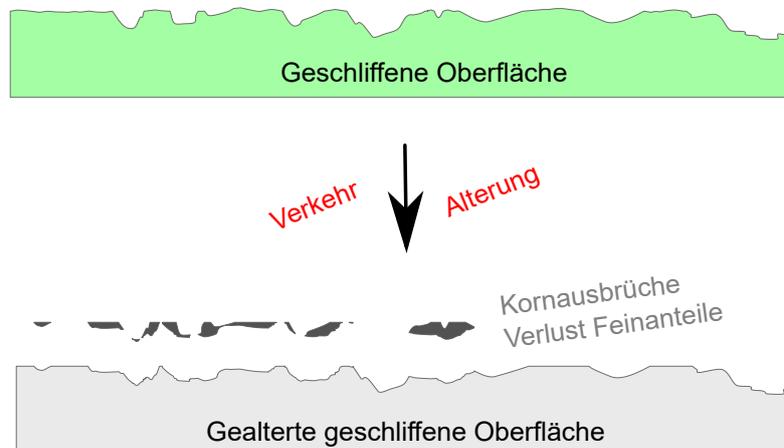
Mit den Schleifmassnahmen werden primär zwei verschiedene Wirkmechanismen des Belages wiederhergestellt. Zum einen definiert sich die Wirkung des Belages über die Textur und zum anderen ist insbesondere bei den hohlraumreichen Belägen die Zugänglichkeit der Poren entscheidend, dass die Beläge ihre Lärmreduktion entfalten können. Mit der Zeit und zunehmender Alterung des Belages ist der Belag verschiedenen Alterungsprozessen unterworfen. So wird die Textur des Belages durch die Belastung mit der Zeit rauher. Dies äussert sich insbesondere in a.) Abfahren von Feinanteilen (freilegen von Körnern) und b.) Kornausbrüche. Beide Prozesse äussern sich deutlich in der Erhöhung der Rauigkeit. Zum anderen führt die zunehmende Verstopfung des Belages durch Schmutz dazu dass die Schallabsorptionsfähigkeit des Belages reduziert wird, was zu einem Wirkungsverlust des Belages führt.

Mit den Schleifmassnahmen können somit die beiden Alterungsprozesse (Texturalterung und Hohlräume freilegen) angegangen werden. Die Abbildung 3.17 zeigt dabei schematisch die ablaufenden Prozesse. Mit dem Schleifen wird neben der Homogenisierung der Makrotextur ebenfalls noch die Mikrotextur des Belages aufgerauht. Dadurch entsteht eine feine Oberfläche. Gegebenenfalls werden durch den Abtrag ebenfalls freiliegende Poren unterhalb der Sperrschicht geöffnet. Dies natürlich nur, sofern der Abtrag grösser ist, als die Lage der Sperrschicht tief liegt.



**Abbildung 3.17:** Prozessablauf Schleifen.

Mit der Alterung und der Belastung durch Verkehr und Witterung wird sich die geschliffene Belagsoberfläche weiter verändern. So ist anzunehmen, dass sich freigelegte Körner wiederum ausbrechen können (Vgl. Abbildung 3.18). Ebenso werden zunehmend wiederum auch Feinanteile ausgefahren.



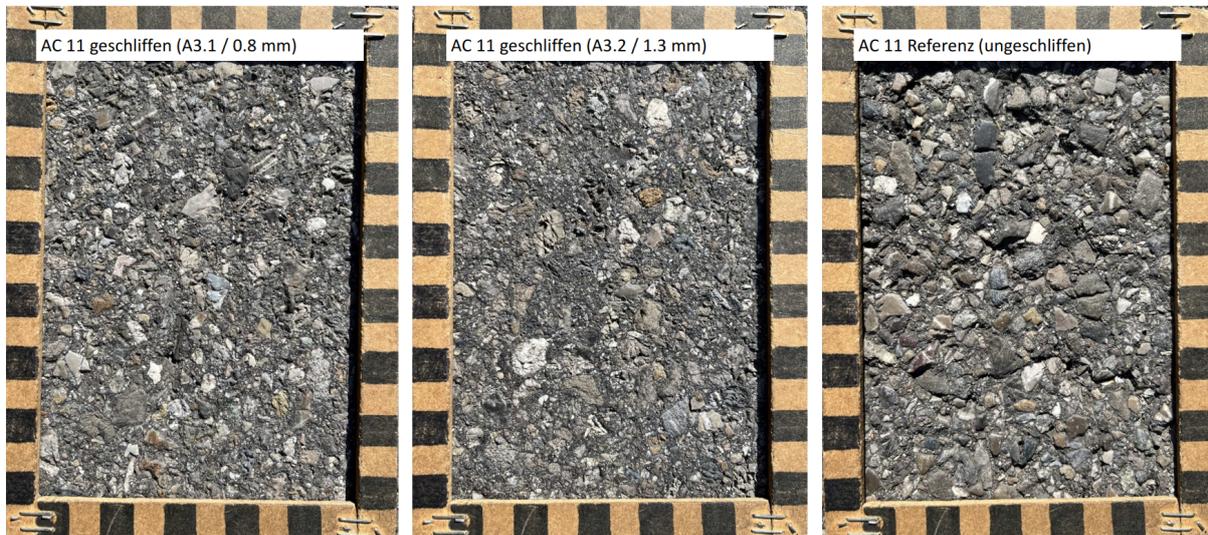
**Abbildung 3.18:** Alterungsverhalten von geschliffenen Oberflächen.

Wie sich zeigt, ist die Trennung zwischen dem Effekt von den freigelegten Hohlräumen und den Texturen nicht ganz einfach. Klar ist, dass die zugrundeliegenden Alterungsprozesse hinsichtlich der Verschmutzung durch die Schleifmassnahme nicht verändert werden können. So wird sich bei der Verschmutzung im Belag irgendwo Schmutz akkumulieren und sich in Form einer dichten Schmutzschicht im Belag festsetzen [4, 6]. Diese liegt oftmals tiefer als die obersten 2-3 mm und kann somit mit geringen Schleiftiefen kaum aufgeknaakt werden. Darunter verbergen sich oftmals noch intakte Porenräume, mit kaum Verschmutzung. Falls Poren wieder freigelegt werden, äussert sich dies mit deutlich verbesserter akustischer Leistung. Ebenfalls ist in den Spektralanalysen eine tiefere Lärmbelastung im mittel bis hochfrequenten Bereich zu erwarten. Einige Beispiele von möglicherweise freigelegten Porenräumen konnten auf folgende Strecken beobachtet werden:

- Muri b. Bern. Abschnitt A2.1 (Schleiftiefe 10.4 mm) Abbildung H.7, Seite 105
- Muri b. Bern. Abschnitt A2.2 (Schleiftiefe 8.9 mm) Abbildung H.8, Seite 106
- Remigen, Abschnit A2b (SDA4-12 mit Schleiftiefe von 6.9 mm). Abbildung J.7, Seite 127

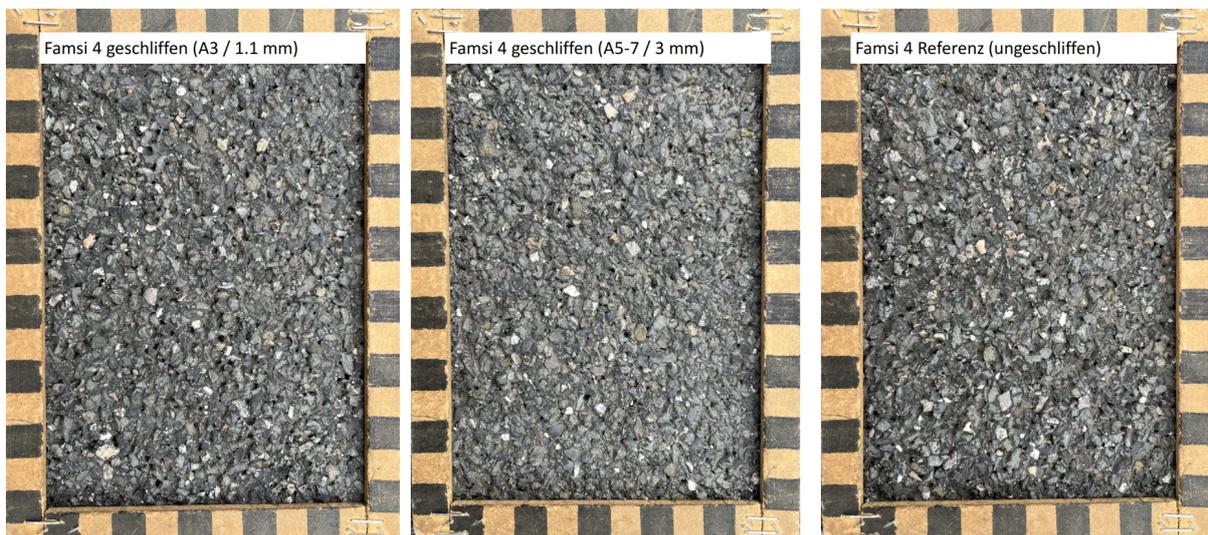
### 3.4.1 Visuelle Inspektion

In der Abbildung 3.19 sind Aufnahmen der Belagsoberfläche in der Radspur des AC11 in Farvagny drei Jahre nach Schleifen. Die Veränderung durch das Schleifen ist nach dieser Zeit immer noch deutlich erkennbar. Die geschliffene Oberfläche erscheint auf der Skala der Makrotextur homogener während sich auf Skala der Mikrotextur innerhalb der Körnung eine rauere Oberfläche offenbart. Dies verdeutlicht, wie der akustische Effekt des Schleifens auf dichten Belägen auf Stufe der Mikro- sowie Makrotextur entsteht.



**Abbildung 3.19:** Aufnahmen der Belagsoberfläche in der Radspur des AC11 in Farvagny drei Jahre nach Schleifen.

In der folgenden Abbildung 3.20 ist die Belagsoberfläche in der Radspur des Famsi 4 drei Jahre nach dem Schleifen abgebildet. Nach dieser Zeit sind auf Skala der Makrotextur von blossem Auge kaum noch Unterschiede zu erkennen. Die Differenz beim Lärm beträgt jedoch zu diesem Zeitpunkt immer über 1 dB(A) zugunsten der geschliffenen Oberfläche.

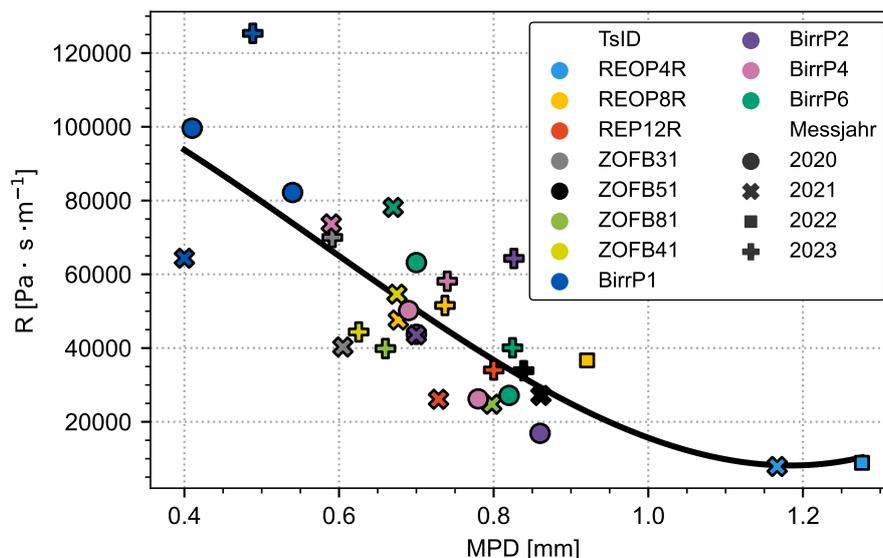


**Abbildung 3.20:** Aufnahmen der Belagsoberfläche in der Radspur des Famsi 4 in Tafers drei Jahre nach Schleifen.

### 3.5. Lufttopf und Texturmessungen

In diesem Kapitel werden nur globale Zusammenhänge und Gemeinsamkeiten aufgezeigt. Die Streckenspezifischen Messungen sind jeweils im Anhang ab Seite 52 zu finden.

Wie bereits in der Einleitung des Berichts erwähnt, setzt sich die Wirkung von den lärmarmen Belägen zum einen Teil aus den Textureffekten und zum anderen aus den Absorptionseigenschaften innerhalb der Poren des Belags zusammen. Mit dem Lufttopf kann der Strömungswiderstand gemessen werden. Wie sich zeigte, gibt es zwischen dem Strömungswiderstand und der Texturgrösse Mittlere Profiltiefe (MPD, vgl. Kapitel 2.2.5) den in Abbildung 3.21 gezeigten Zusammenhang. Hierbei handelt es es sich jeweils um 4er respektive um 8er-Beläge (Muttenz).



**Abbildung 3.21:** Zusammenhang des Luftströmungswiderstands ( $R$ ) und der Texturgrösse  $MPD$  (Mittlere Profiltiefe) für die Strecken in Remigen (RE\*), Zofingen (ZO\*) und Muttenz (Birr\*)

Grundsätzlich zeigte sich auf den Messtecken jeweils, dass die Lufttopfmessung durch die Schleifmassnahme in der Tendenz zunahm. Dies hängt damit zusammen, dass durch das Schleifen vor allem die Oberfläche bearbeitet wurde. Denn die Oberfläche wurde mit dem Schleifen in der Folge feiner und homogener. Dies hat gemäss dem Zusammenhang in Abbildung 3.21 höhere Luftströmungswiderstände zur Folge. Ein ähnlicher Zusammenhang ist ebenfalls im Projekt ADURA [12] ermittelt worden, dass sich der Luftströmungswiderstand als Summe von texturinduziertem und hohlrauminduziertem Strömungswiderstand zusammensetzt (Vgl. Gleichung 3.1):

$$R_s^* = \frac{R_{s,T} \cdot R_s}{R_{s,T} + R_s} \quad (3.1)$$

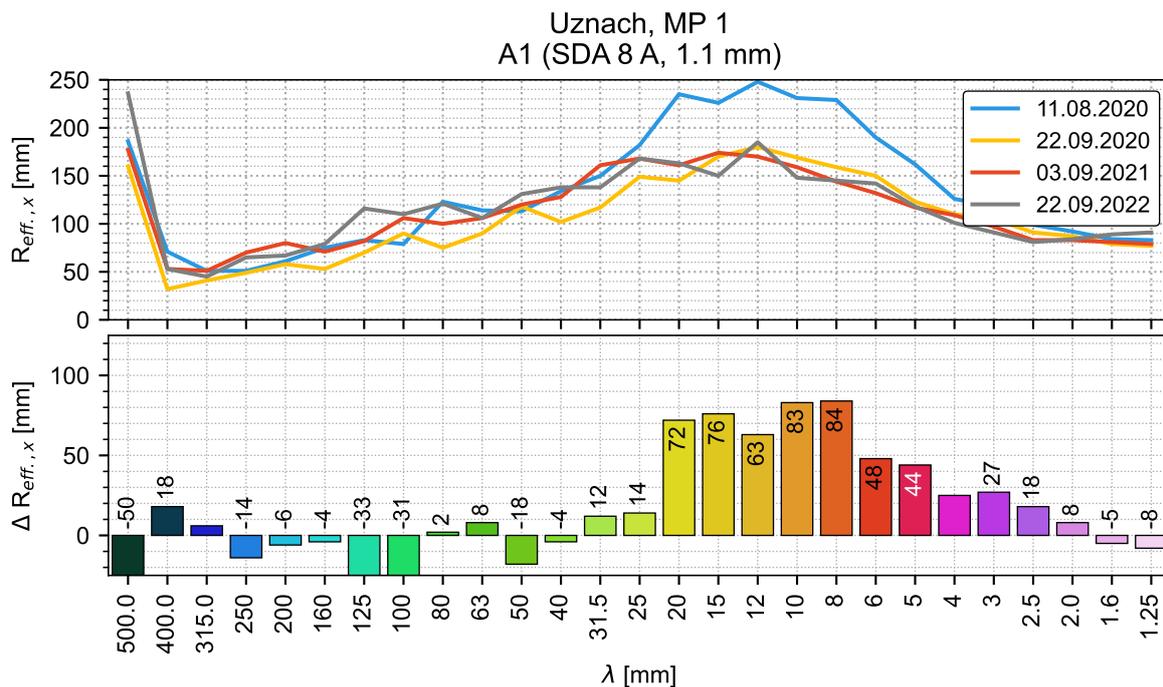
mit

- $R_s^*$  Messbarer spezifischer Strömungswiderstand
- $R_{s,t}$  Texturinduzierter Strömungswiderstand
- $R_s$  Hohlrauminduzierter Strömungswiderstand

Da in unserem Fall der Texturinduzierte Strömungswiderstand  $R_{s,T}$  jeweils in der Tendenz höher ausfällt steigt auch der Gesamtwiderstand  $R_s^*$  an. Falls der Hohlrauminduzierte Widerstand klein wäre (zugängliche und verbundene Hohlräume), würde sich dies auch im Gesamtwiderstand bemerkbar machen.

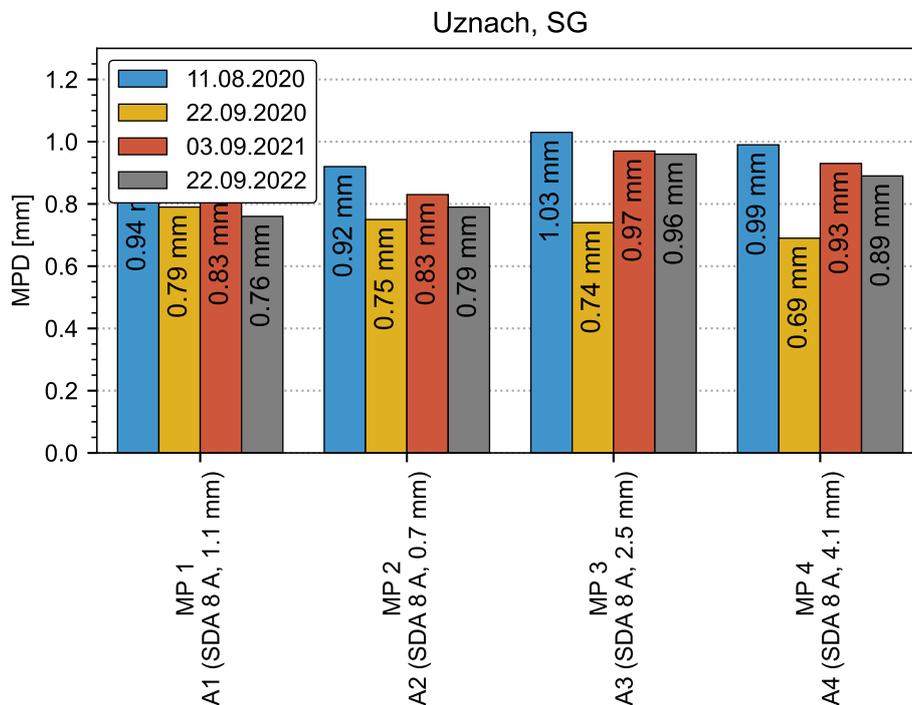
### 3.5.1 Texturmessungen

Was sich bereits in den vorherigen Kapiteln gezeigt hat, entsteht durch die Schleifmassnahmen durch den Abtrag von Material wiederum eine feinere und homogenere Oberflächentextur. Dieser Umstand ist in der folgenden Abbildung 3.22 verdeutlicht. Durch das Schleifen wird die Belagsoberfläche insbesondere im mittleren Texturwellenlängenbereich (4 - 20 mm) deutlich feiner. Umgekehrt ist eine leichte Zunahme in Bezug auf die ganz feinen Wellenlänge (Mikrotextur) zu beobachten.



**Abbildung 3.22:** Entwicklung der effektiven Rauigkeitstiefe  $R_{eff}$  für Uznach, SDA8-12 und den MP 1. Vorhermessung (11.08.2020) in Blau. Nachhermessungen in gelb, rot und grau. Im unteren Bereich wird die Veränderung im Vergleich zur Vorhermessung gezeigt.

Das in der Abbildung 3.17 gezeigte Modell scheint dieser Erklärung zu folgen. In Bezug auf Texturparameter, in diesem Fall den MPD lässt sich schliessen, dass mit der Schleifmassnahme die MPD an allen Punkten abgenommen hat. Ähnliches ist auch für andere Standorte mit Vorher-Nachhermessungen beim MPD zu beobachten (Vgl. Remigen (Anhang J.3), Rüthi (Anhang L.3), Muttenz (Anhang I.3))



**Abbildung 3.23:** Mittlere Profiltiefe (MPD) für Uznach, SG an den Messpunkten MP1-MP4. (Details zu den Messpunkten sind im Anhang P zu finden.)

### 3.5.2 Bohrkernanalysen

Mit den Bohrkernanalysen (AVCA) lassen sich die Wirkmechanismen bezüglich des Freilegens von Poren etwas besser abschätzen. An einigen Standorten existieren längere Datenreihen, wie zum Beispiel in Zofingen, wo vor, unmittelbar nach der Massnahme und im Jahr 2022 ebenfalls noch eine AVCA-Untersuchung durchgeführt wurde. Dabei konnte bereits in früheren Untersuchungen gezeigt werden, dass für niedrige Schleiftiefen kaum Poren freigelegt werden können, da die Schmutzsperrschicht in vielen Fällen bereits zu tief lag [15]. Ebenfalls zeigte sich, dass Poren vielfach nicht ganz grossflächig/vollständig freigelegt werden konnten. Die anderen Untersuchungen (z.B. die Lufttofmessungen oder Permeabilitätsmessungen) deuteten ebenfalls darauf hin, dass die Poren nicht immer komplett geöffnet werden konnten.

Die jetzigen Untersuchungen im Rahmen dieses Projekts verlängern nun diese Datenreihen. Im Anhang J.6.1 sind hierbei die Resultate für Remigen und in S.6.1 für Zofingen aufgezeigt. Dabei offenbarte sich, dass die Zugänglichkeit der Poren (an den Standorten, bei welchen Poren geöffnet werden konnten) an beiden Standorten jeweils abgenommen hat. Dies geht mit der Abnahme der Akustik einher. Folglich bietet sich bei wenig geöffneten, respektive immer noch hohem Verschmutzungsgrad, die Gefahr, dass der Belag wiederum schnell verstopfen könnte. Entsprechend entwickeln sich auch die akustischen Messungen.

In Farvagny wurden ebenfalls AVCA-Untersuchungen durchgeführt, da diese Strecken akustisch sehr gute Resultate zeigten. Die Untersuchungen offenbarten, dass an beiden Strecken offene und kommunizierende Hohlräume vorhanden sind (Vgl. Tabelle E.2).

## 4. Schlussfolgerungen & Empfehlungen

Die Auswertungen zu den Schleifmassnahmen auf den bisher 17 realisierten Teststrecken auf lärmarmen Belägen (SDA 4 & SDA 8) zeigten hinsichtlich der akustischen Regenerierung allesamt eine Verbesserung. Die initiale akustische Verbesserung liegt für 4er-Beläge im Bereich zwischen -2 und -3 dB. Für 8er-Beläge konnte im Mittel eine Verbesserung von gut -3 dB erzielt werden. Bei gewissen Teststrecken wurden auch noch angrenzende dichte Beläge (ACMR 11, AC 11, MA 11) abgeschliffen. Interessanterweise zeigte sich ebenfalls auf diesen Beläge eine initiale Verbesserung der akustischen Belagsgüte von rund -2 dB.

### 4.1. Dauerhaftigkeit der Massnahme

Die ersten grossflächigen Schleif-Teststrecken wurden in der Schweiz ab 2018 realisiert. Damit liegen zum Zeitpunkt der vorliegenden Metastudie Monitoringdaten über bis zu 4 Jahre vor. Die Beurteilung der Dauerhaftigkeit geschieht auf zwei unterschiedlichen Weisen. Einerseits wurde die Dauer der akustischen Regeneration in Bezug auf den Ausgangszustand vor der Massnahme beurteilt, andererseits wurde akustische Effekt durch Schleifen in Relation zu einem ebenfalls alternden ungeschliffenen Referenzabschnitt ausgewertet. Zusammenfassen ergeben sich folgende Zeiträume für die Dauerhaftigkeit der akustische Wirkung durch Schleifen:

**Tabelle 4.1:** Akustische Dauerhaftigkeit und Wirkung von verschiedenen Belagstypen bei Schleifen.

Belag	Akustische Initialwirkung	Dauerhaftigkeit	
		Ausgangszustand	Referenzabschnitt
4 er-Belag	-2.5 ± 1.0 dB	2-4 Jahre	> 4 Jahre
8 er-Belag	-3.1 ± 0.3 dB	2-4 Jahre +	> 4 Jahre
11 er-Belag	-1.9 ± 0.6 dB	4 Jahre	> 4 Jahre

Das heisst, dass mit der Schleifmassnahme auf semidichten 4er-Belägen nach durchschnittlich 3 Jahren der Ausgangszustand wiederum erreicht ist. Im Vergleich zu ungeschliffenen Referenzabschnitten ist ein positiver akustischer Effekt durch die Schleifmassnahme im Mittel über mehr als 4 Jahre nachweisbar (Vgl. Abbildung 3.8).

Auf einer Teststrecken in Farvagny, FR wurde bereits früh im Lebenszyklus eines lärmarmen Belags die Schleifmassnahme angewandt. Der Versuch hat gezeigt, dass keine unmittelbaren negativen Effekte auf die akustische Belagsgüte, z.B. durch Verstopfen der Poren, feststellbar sind. Im Zeitraum des Monitorings konnten bisher auch keine negativen Einflüsse des in dieser Studie verwendeten Schleifverfahrens auf die mechanische Stabilität der Belagsschicht beobachtet werden.

### 4.2. Einflussfaktoren

Mit der vorliegenden Studie konnte gezeigt werden, dass die Wirkung durch Schleifen von Ausgangszustand der akustischen Belagsgüte (vor der Massnahme) abhängig ist. Das Beispiel in Farvagny mit dem Schleifen eines praktisch neuen lärmarmen Belages zeigte, dass die akustische Belagsgüte bei intaktem Porenkonstrukt und intakter Belagsoberfläche nur noch geringfügig verbessert werden kann. Die Tatsache, dass selbst bei einer Ausgangslage von rund -7 dB noch eine akustische Verbesserung möglich ist,

ist ein wichtiger Hinweis dass beim Schleifen die Texturoptimierung eine zentrale Rolle spielt. Grundsätzlich muss aber beim Schleifen von Belägen unterschieden werden, welche Optimierung angestrebt werden soll. Denn das Vorgehen ist ein anderes bei dichten Belägen, als bei (verstopften) porösen 4er- oder 2er-Belägen. Bei dichten Belägen kann mit einer erhöhten Schleiftiefe kein akustischer Gewinn erzielt werden, da keine Porenräume freigelegt werden können. Umgekehrt ist bei porösen 4er-Belägen zu unterscheiden, ob rein die Textur optimiert werden soll, oder die Möglichkeit besteht die Schmutzschicht anzubrechen und möglicherweise wiederum Poren freizulegen.

Folglich konnte auch gezeigt werden, dass mit einer erhöhten Schleiftiefe die Wahrscheinlichkeit auch steigt, dass effektiv auch Poren freigelegt werden. (Vgl. Abbildung 3.11, Seite 36). Dies gilt in gewisser Weise auch für die 8er-Beläge. Allerdings wurde auch deutlich, dass ebenfalls auf porösen Belägen mit geringen Schleiftiefen ansehnliche Ergebnisse möglich sind. Ein Beispiel hierfür sind z.B die Beläge in La Verrerie (Famsi, 1 mm), oder auch in Tafers, wo mit einer Schleiftiefe von 1.1 respektive 1.8 mm Wirkungen von 3 dB erzielt werden konnten. Allerdings gibt es gerade in Zofingen den Hinweis, dass niedrige Schleiftiefen nicht optimal funktionierten: Die niedrigen Schleiftiefen schnitten dort in Bezug auf die akustische Leistung wesentlich schlechter ab. Insbesondere ist hier die Wahl der richtigen Werkzeuge relevant.

#### 4.3. Wirkmechanismen

Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, werden mit dem Schleifen hauptsächlich zwei Charakteristiken von Belägen verändert. Dies ist zum das potenzielle freilegen von Poren und zum anderen die Texturhomogenisierung. Die Texturhomogenisierung kann bereits ab geringen Schleiftiefen von wenigen Millimetern erfolgen. Dies konnte so erfolgreich auf diversen dichten Gussasphalt- und AC-Belägen gezeigt werden. Dabei konnte mit dem Schleifen eine relativ dauerhafte, für die Akustik günstige, Oberfläche geschaffen werden. Dies zeigte sich ebenfalls für 8er-Beläge (SDA8 & ACMR8). Für poröse 4er-Beläge ist neben der Texturoptimierung besteht ebenfalls die Möglichkeit mit dem freilegen von Poren deutliche Verbesserungen der akustischen Eigenschaften zu erzielen. Dabei zeigte sich aber, dass dies vornehmlich bei erhöhten Schleiftiefen erfolgen kann, wenn die sogenannte Schmutzsperrschicht durchbrochen und das darunterliegende (freie) Porenvolumen erschlossen werden kann. Im Falle der Porenöffnung ist ein deutlicher akustischer Gewinn zu verzeichnen, der sich im mittel- bis hochfrequenten Bereich in den CPX-Messungen zeigt. Geöffnete Porenräume äussern sich ebenfalls in verbesserten Lufttopf- und Permeabilitätsmessungen.

Grundsätzlich konnten mit den Schleifmassnahmen auf allen Belägen akustische Verbesserungen erzielt werden. Dies geht bei allen Belägen mit einer, für die Akustik verbesserten, Textur einher. Insgesamt wird die Oberfläche durch das Schleifen feiner (Kornausbrüche werden auch etwas ausgeglichen). Ebenfalls wird durch das geeignete Schleifverfahren eine neue etwas feinkörnigere Makro- und rauere Mikrotextrur erzeugt. Dies äusserte sich vor Allem in den kleinsten Wellenlängen ( $\leq 2$  mm).

#### 4.4. Empfehlungen

Mit dem Schleifverfahren kann auf praktisch allen Belägen eine Verbesserung der akustischen Belagsgüte erzielt werden. Im Mittel ist bei lärmarmen 4er-Belägen und bei 8er-Belägen eine Regenerationswirkung<sup>3</sup> von 3 Jahren zu verzeichnen. Grundsätzlich ist aber ein akustisch positiver Effekt auch nach

<sup>3</sup>Im Vergleich zum Ausgangszustand. Also die Akustik erreicht nach dieser Zeit wiederum den Ausgangswert.



über 4 Jahren nachweisbar. Das heisst, dass die akustische Lebensdauer des Belages um mindestens drei Jahre erhöht werden kann. Bei dichten 11er-Belägen kann die Regenerationsdauer sogar vier und mehr Jahre betragen.

Bei der Planung von Schleifmassnahmen muss zwingend das Ziel der Massnahme festgelegt werden. Denn falls die Möglichkeit besteht mit einer höheren Schleiftiefe allenfalls Poren freizulegen, ist diese Option sicherlich zu erwägen, da damit die Wirkung in der Tendenz besser ausfallen kann. Dies gilt allerdings speziell nur für 4er-Grösstkornbeläge. Bei 8er- und dichten 11er-Belägen ist eine erhöhte Schleiftiefe von >3 mm nicht zweckmässig.

## 5. Literatur

- [1] Christian Angst, Philip Bürgisser, and Thomas Beckenbauer. Forschungspaket Lärmarme Beläge innerorts EP 2 Labortechnische Bestimmung der Dauerhaftigkeit lärmarmen Beläge. 2016.
- [2] Erik Bühlmann, Philip Bürgisser, Toni Ziegler, Christian Angst, and Thomas Beckenbauer. Forschungspaket lärmarme Beläge Innerorts - Teilprojekt (TP) 3: Langzeitmonitoring. Technical report, 2017.
- [3] Simon Steiner, Felix Schlatter, and Erik Bühlmann. Achieving a better match between ordered and actual performance of urban low-noise asphalts – exploring better solutions for noise abatement. In *Proceedings of INTER-NOISE 2022 International Congress and Exposition of Noise Control Engineering, Glasgow, Schottland, Glasgow, Schotland, 2022*.
- [4] Frédéric Steiner and Samuel Probst. Abnahme der akustischen Wirksamkeit bei lärmarmen Belägen: Ursachen, neue Messverfahren und Lösungsansätze. *STRASSE UND VERKEHR*, (11):18–23, 2016.
- [5] Felix Schlatter and Erik Bühlmann. Acoustic optimization of asphalts using acoustic void content analysis avca on drill cores. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, volume 261, pages 4781–4792. Institute of Noise Control Engineering, 2020.
- [6] Frédéric Steiner and Tobias Balmer. Akustische Alterung lärmarmen Beläge durch Verschmutzung - Grundlegende Mechanismen. *STRASSE UND VERKEHR*, (3):22–30, 2018.
- [7] Emanuel Hammer, Erik Bühlmann, and Toni Ziegler. Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP 8: Akustische Wirkung betrieblicher Reinigungsmassnahmen bei lärmarmen Belägen. Technical Report 2013/003, Grolimund + Partner AG, 2016.
- [8] ISO - International Organization for Standardization. ISO 11819-2, Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 2: The close-proximity method (ISO 11819-2:2017), 2017.
- [9] ISO - International Organization for Standardization. ISO 11819-3, Acoustics — Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise — Part 3: Reference tyres, 2017.
- [10] Bert Peeters, Inez Ammerlaan, Ard Kuijpers, and Gijsjan van Blokland. REDUCTION OF THE HORN EFFECT FOR CAR AND TRUCK TYRES BY SOUND ABSORBING ROAD SURFACES. In *Proceedings of INTER-NOISE 2010*, Lisbon, Portugal, 2010.
- [11] ISO International Organization for Standardization. EN ISO 13473-1, Characterization of pavement texture by use of surface profiles - Part 1: Determination of mean profile depth (ISO 13473-1:2019), 2019.
- [12] Reinhard Wehr et al. Akustische Dauerhaftigkeit lärmindernder dichter oder semi-dichter Asphalt-deckschichten ADURA. Technical report, 2020.
- [13] Gregor Schgvanin and Toni Ziegler. Leitfaden Strassenlärm. Vollzugshilfe für die Sanierung. Stand: Dezember 2006. Umwelt-Vollzug Nr. 0637. Technical report, Bundesamt für Umwelt, Bern, 2006.



- [14] Bundesamt für Strassen (ASTRA) und Bundesamt für Umwelt (BAFU). Leitfaden Strassenlärm Anhang 1c : Technisches Merkblatt für akustische Belagsgütemessungen an Strassen. page 14, 2013.
- [15] Schlatter, Felix, Bühlmann, Erik, Angst, Christian, Huber, Liliane, and Balmer, Tobias. Belagsunterhaltmassnahmen Kanton Aargau, Ergebnisbericht Fräsmassnahmen SDA 4-12/SDA 4-16. Technical Report A5919, Grolimund + Partner AG, 2021.

## A. Messzeitpunkte akustische Messungen

In der Tabelle A.1 sind alle für dieses Projekt verwendeten CPX-Messdaten inklusive der Firma, welche die Messungen durchgeführt hat, dargestellt. Dabei zeigte sich, dass die Messungen von AeBo nur mit dem PKW-Reifen und einem etwas anderen CPX-Trailer-System durchgeführt wurde, welches nicht der ISO-11819-2/3:2017 entspricht. Daher konnten diese Messungen mit vernünftigem Aufwand nicht in das Projekt integriert werden.

**Tabelle A.1:** Liste der CPX-Messungen inklusive der Messzeitpunkte und Tagen seit der letzten Messung. Firmen, welche beigetragen haben sind G+P (Grolimund+Partner AG), AeBO (Aegerter & Bosshardt AG) und die Sinus AG. Messungen, welche nicht verwendet wurden sind in **rot** eingefärbt.

Standort	Firma	Messdatum	Fräsdatum	Tage vor/seit Massnahme	Tage seit letzter Messung
Corserey, FR	G+P	19.10.2012	07.11.2018	-2210 Tage	
Corserey, FR	G+P	21.10.2015	07.11.2018	-1113 Tage	1097 Tage
Corserey, FR	G+P	23.05.2017	07.11.2018	-533 Tage	580 Tage
Corserey, FR	G+P	22.11.2018	07.11.2018	15 Tage	<b>548 Tage</b>
Corserey, FR	G+P	02.04.2019	07.11.2018	146 Tage	131 Tage
Corserey, FR	G+P	27.10.2019	07.11.2018	354 Tage	208 Tage
Corserey, FR	G+P	06.08.2020	07.11.2018	638 Tage	284 Tage
Corserey, FR	G+P	05.04.2021	07.11.2018	880 Tage	242 Tage
Corserey, FR	G+P	21.04.2022	07.11.2018	1261 Tage	381 Tage
Dittingen, BL	AeBo	20.04.2020	26.06.2020	-67 Tage	
Dittingen, BL	AeBo	14.09.2020	26.06.2020	80 Tage	<b>147 Tage</b>
Dittingen, BL	G+P	02.09.2021	26.06.2020	433 Tage	353 Tage
Dittingen, BL	G+P	12.09.2022	26.06.2020	808 Tage	375 Tage
Farvagny, FR	G+P	10.07.2018	23.05.2019	-317 Tage	
Farvagny, FR	G+P	18.07.2019	23.05.2019	56 Tage	<b>373 Tage</b>
Farvagny, FR	G+P	06.08.2020	23.05.2019	441 Tage	385 Tage
Farvagny, FR	G+P	05.04.2021	23.05.2019	683 Tage	242 Tage
Farvagny, FR	G+P	20.04.2022	23.05.2019	1063 Tage	380 Tage
La Verrerie, FR	G+P	19.10.2012	22.05.2019	-2406 Tage	
La Verrerie, FR	G+P	21.10.2015	22.05.2019	-1309 Tage	1097 Tage
La Verrerie, FR	G+P	16.05.2017	22.05.2019	-736 Tage	573 Tage
La Verrerie, FR	G+P	02.04.2019	22.05.2019	-50 Tage	686 Tage
La Verrerie, FR	G+P	18.07.2019	22.05.2019	57 Tage	<b>107 Tage</b>
La Verrerie, FR	G+P	06.08.2020	22.05.2019	442 Tage	385 Tage
La Verrerie, FR	G+P	15.06.2021	22.05.2019	755 Tage	313 Tage
La Verrerie, FR	G+P	03.05.2022	22.05.2019	1077 Tage	322 Tage
Landerswil, BE	G+P	14.06.2017	01.06.2017	13 Tage	
Landerswil, BE	G+P	23.09.2022	01.06.2017	1940 Tage	1927 Tage
Muri b. Bern, BE	G+P	06.10.2011	24.09.2019	-2910 Tage	
Muri b. Bern, BE	G+P	22.08.2012	24.09.2019	-2589 Tage	321 Tage
Muri b. Bern, BE	G+P	22.07.2013	24.09.2019	-2255 Tage	334 Tage
Muri b. Bern, BE	G+P	24.09.2014	24.09.2019	-1826 Tage	429 Tage
Muri b. Bern, BE	G+P	08.05.2015	24.09.2019	-1600 Tage	226 Tage
Muri b. Bern, BE	G+P	23.08.2016	24.09.2019	-1127 Tage	473 Tage
Muri b. Bern, BE	G+P	18.10.2017	24.09.2019	-706 Tage	421 Tage
Muri b. Bern, BE	G+P	17.10.2018	24.09.2019	-342 Tage	364 Tage
Muri b. Bern, BE	G+P	23.10.2019	24.09.2019	29 Tage	<b>371 Tage</b>
Muri b. Bern, BE	G+P	07.11.2020	24.09.2019	410 Tage	381 Tage
Muri b. Bern, BE	G+P	22.07.2021	24.09.2019	667 Tage	257 Tage

**Tabelle A.1:** Liste der CPX-Messungen inklusive der Messzeitpunkte und Tagen seit der letzten Messung. Firmen, welche beigetragen haben sind G+P (Grolimund+Partner AG), AeBO (Aegerter & Bosshardt AG) und die Sinus AG. Messungen, welche nicht verwendet wurden sind in **rot** eingefärbt.

Standort	Firma	Messdatum	Fräsdatum	Tage vor/seit Massnahme	Tage seit letzter Messung
Muri b. Bern, BE	G+P	21.09.2022	24.09.2019	1093 Tage	426 Tage
Muttenz, BL	G+P	30.08.2013	24.06.2020	-2490 Tage	
Muttenz, BL	G+P	04.09.2014	24.06.2020	-2120 Tage	370 Tage
Muttenz, BL	G+P	10.09.2015	24.06.2020	-1749 Tage	371 Tage
Muttenz, BL	G+P	20.04.2016	24.06.2020	-1526 Tage	223 Tage
Muttenz, BL	G+P	15.08.2018	24.06.2020	-679 Tage	847 Tage
Muttenz, BL	AeBo	20.04.2020	24.06.2020	-65 Tage	614 Tage
Muttenz, BL	AeBo	23.07.2020	24.06.2020	29 Tage	94 Tage
Muttenz, BL	AeBo	14.09.2020	24.06.2020	82 Tage	53 Tage
Muttenz, BL	G+P	02.09.2021	24.06.2020	435 Tage	353 Tage
Muttenz, BL	G+P	12.09.2022	24.06.2020	810 Tage	375 Tage
Remigen, AG	G+P	14.09.2016	27.08.2020	-1443 Tage	
Remigen, AG	G+P	16.03.2017	27.08.2020	-1260 Tage	183 Tage
Remigen, AG	G+P	07.08.2017	27.08.2020	-1116 Tage	144 Tage
Remigen, AG	G+P	07.05.2018	27.08.2020	-843 Tage	273 Tage
Remigen, AG	G+P	04.10.2018	27.08.2020	-693 Tage	150 Tage
Remigen, AG	G+P	25.10.2018	27.08.2020	-672 Tage	21 Tage
Remigen, AG	G+P	07.11.2018	27.08.2020	-659 Tage	13 Tage
Remigen, AG	G+P	13.06.2019	27.08.2020	-441 Tage	218 Tage
Remigen, AG	G+P	24.06.2019	27.08.2020	-430 Tage	11 Tage
Remigen, AG	G+P	08.05.2020	27.08.2020	-111 Tage	319 Tage
Remigen, AG	G+P	04.09.2020	27.08.2020	8 Tage	119 Tage
Remigen, AG	G+P	13.11.2020	27.08.2020	78 Tage	70 Tage
Remigen, AG	G+P	06.09.2021	27.08.2020	375 Tage	297 Tage
Remigen, AG	G+P	07.07.2022	27.08.2020	679 Tage	304 Tage
Romont, FR	G+P	01.11.2011	06.11.2018	-2562 Tage	
Romont, FR	G+P	19.10.2012	06.11.2018	-2209 Tage	353 Tage
Romont, FR	G+P	03.10.2014	06.11.2018	-1495 Tage	714 Tage
Romont, FR	G+P	08.04.2015	06.11.2018	-1308 Tage	187 Tage
Romont, FR	G+P	23.06.2016	06.11.2018	-866 Tage	442 Tage
Romont, FR	G+P	16.05.2017	06.11.2018	-539 Tage	327 Tage
Romont, FR	G+P	22.11.2018	06.11.2018	16 Tage	555 Tage
Romont, FR	G+P	02.04.2019	06.11.2018	147 Tage	131 Tage
Romont, FR	G+P	27.10.2019	06.11.2018	355 Tage	208 Tage
Romont, FR	G+P	06.08.2020	06.11.2018	639 Tage	284 Tage
Romont, FR	G+P	15.06.2021	06.11.2018	952 Tage	313 Tage
Romont, FR	G+P	29.04.2022	06.11.2018	1270 Tage	318 Tage
Rüthi SG	Sinus AG	19.08.2020	25.08.2020	-6 Tage	
Rüthi SG	Sinus AG	30.09.2020	25.08.2020	36 Tage	42 Tage
Rüthi SG	Sinus AG	21.07.2021	25.08.2020	330 Tage	294 Tage
Rüthi SG	Sinus AG	03.08.2022	25.08.2020	708 Tage	378 Tage
Genf, Quai Ansermet	G+P	22.09.2016	04.08.2021	-1777 Tage	
Genf, Quai Ansermet	G+P	03.07.2019	04.08.2021	-763 Tage	1014 Tage
Genf, Quai Ansermet	G+P	14.11.2019	04.08.2021	-629 Tage	134 Tage
Genf, Quai Ansermet	G+P	11.09.2020	04.08.2021	-327 Tage	302 Tage
Genf, Quai Ansermet	G+P	21.07.2021	04.08.2021	-14 Tage	313 Tage
Genf, Quai Ansermet	G+P	25.08.2021	04.08.2021	21 Tage	35 Tage
Genf, Quai Ansermet	G+P	04.08.2022	04.08.2021	365 Tage	344 Tage
Sugiez, FR	G+P	25.10.2013	20.05.2019	-2033 Tage	

**Tabelle A.1:** Liste der CPX-Messungen inklusive der Messzeitpunkte und Tagen seit der letzten Messung. Firmen, welche beigetragen haben sind G+P (Grolimund+Partner AG), AeBO (Aegerter & Bosshardt AG) und die Sinus AG. Messungen, welche nicht verwendet wurden sind in **rot** eingefärbt.

Standort	Firma	Messdatum	Fräsdatum	Tage vor/seit Massnahme	Tage seit letzter Messung
Sugiez, FR	G+P	28.06.2018	20.05.2019	-326 Tage	1707 Tage
Sugiez, FR	G+P	18.07.2019	20.05.2019	59 Tage	<b>385 Tage</b>
Sugiez, FR	G+P	06.08.2020	20.05.2019	444 Tage	385 Tage
Sugiez, FR	G+P	26.04.2021	20.05.2019	707 Tage	263 Tage
Sugiez, FR	G+P	13.04.2022	20.05.2019	1059 Tage	352 Tage
Sugiez, FR	G+P	19.04.2023	20.05.2019	1430 Tage	371 Tage
Tafers, FR	G+P	09.07.2018	14.05.2019	-309 Tage	
Tafers, FR	G+P	18.07.2019	14.05.2019	65 Tage	<b>374 Tage</b>
Tafers, FR	G+P	06.08.2020	14.05.2019	450 Tage	385 Tage
Tafers, FR	G+P	31.05.2021	14.05.2019	748 Tage	298 Tage
Tafers, FR	G+P	19.04.2022	14.05.2019	1071 Tage	323 Tage
Tafers, FR	G+P	05.05.2023	14.05.2019	1452 Tage	381 Tage
Uznach, SG	G+P	19.08.2020	26.08.2020	-7 Tage	
Uznach, SG	G+P	30.09.2020	26.08.2020	35 Tage	<b>42 Tage</b>
Uznach, SG	G+P	21.07.2021	26.08.2020	329 Tage	294 Tage
Uznach, SG	G+P	03.08.2022	26.08.2020	707 Tage	378 Tage
Veyrier, GE	G+P	05.09.2017	05.08.2021	-1430 Tage	
Veyrier, GE	G+P	20.08.2020	05.08.2021	-350 Tage	1080 Tage
Veyrier, GE	G+P	25.08.2021	05.08.2021	20 Tage	<b>370 Tage</b>
Veyrier, GE	G+P	25.08.2022	05.08.2021	385 Tage	365 Tage
Villarod, FR	G+P	18.07.2019	23.05.2019	56 Tage	-329 Tage
Villarod, FR	G+P	06.08.2020	23.05.2019	441 Tage	385 Tage
Villarod, FR	G+P	05.04.2021	23.05.2019	683 Tage	242 Tage
Villarod, FR	G+P	29.04.2022	23.05.2019	1072 Tage	389 Tage
Zofingen, AG	G+P	23.10.2012	25.09.2019	-2528 Tage	
Zofingen, AG	G+P	12.08.2013	25.09.2019	-2235 Tage	293 Tage
Zofingen, AG	G+P	06.08.2014	25.09.2019	-1876 Tage	359 Tage
Zofingen, AG	G+P	08.07.2015	25.09.2019	-1540 Tage	336 Tage
Zofingen, AG	G+P	06.07.2016	25.09.2019	-1176 Tage	364 Tage
Zofingen, AG	G+P	16.03.2017	25.09.2019	-923 Tage	253 Tage
Zofingen, AG	G+P	18.07.2017	25.09.2019	-799 Tage	124 Tage
Zofingen, AG	G+P	21.06.2018	25.09.2019	-461 Tage	338 Tage
Zofingen, AG	G+P	10.07.2019	25.09.2019	-77 Tage	384 Tage
Zofingen, AG	G+P	15.10.2019	25.09.2019	20 Tage	<b>97 Tage</b>
Zofingen, AG	G+P	26.11.2019	25.09.2019	62 Tage	42 Tage
Zofingen, AG	G+P	16.06.2020	25.09.2019	265 Tage	203 Tage
Zofingen, AG	G+P	16.06.2021	25.09.2019	630 Tage	365 Tage
Zofingen, AG	G+P	24.03.2022	25.09.2019	911 Tage	281 Tage

## B. Messabschnitte

In der Tabelle B.1 sind die Abschnitte und deren Bezeichnung für alle Messstandorte aufgelistet. Dabei ist ebenfalls angegeben, wann sie eingebaut wurden, respektive ob der Abschnitt eine Referenz aufweist.

**Tabelle B.1:** Abschnitte inklusive der Referenzabschnitte für alle Messorte.

Ort	Abschnitt	Tiefe [mm]	Belag	Referenz	Einbau	Fräsdatum	# CPX-Msg.
Corserrey, FR	A1 (Famsi, 2 mm)	2	Famsi	-	01.07.2012	07.11.2018	9
Corserrey, FR	A2 (Famsi, 1 mm)	1	Famsi	-	01.07.2012	07.11.2018	9
Corserrey, FR	Z12 (Famsi, 2 mm)	2	Famsi	-	01.07.2012	07.11.2018	9
Dittingen, BL	A1 (SDA4-12, 0.3 mm)	0.3	SDA4-12	A7 (SDA4-12, Ref)	27.06.2014	26.06.2020	2
Dittingen, BL	A2 (SDA4-12, 1 mm)	1	SDA4-12	A7 (SDA4-12, Ref)	27.06.2014	26.06.2020	2
Dittingen, BL	A3 (ACMR8 LN,0.9 mm)	0.9	ACMR8	A9 (ACMR8 LN,Ref)	27.06.2014	26.06.2020	2
Dittingen, BL	A4 (ACMR8 LN,1.6 mm)	1.6	ACMR8	A9 (ACMR8 LN,Ref)	27.06.2014	26.06.2020	2
Dittingen, BL	A5 (ACMR8 LN, 3.5 mm)	3.5	ACMR8	A9 (ACMR8 LN,Ref)	27.06.2014	26.06.2020	2
Dittingen, BL	A6 (SDA8A, 0.8 mm)	0.8	SDA8A	A8 (SDA8A, Ref)	27.06.2014	26.06.2020	2
Dittingen, BL	A7 (SDA4-12, Ref)	0	SDA4-12	-	27.06.2014	26.06.2020	2
Dittingen, BL	A8 (SDA8A, Ref)	0	SDA8A	-	27.06.2014	26.06.2020	2
Dittingen, BL	A9 (ACMR8 LN,Ref)	0	ACMR8	-	27.06.2014	26.06.2020	2
Farvagny, FR	A3 (AC11, Ref)	0	AC11	-	01.07.2010	23.05.2019	5
Farvagny, FR	A3.1 (AC11, 0.8 mm)	0.8	AC11	A3 (AC11, Ref)	01.07.2010	23.05.2019	5
Farvagny, FR	A3.2 (AC11, 1.3 mm)	1.3	AC11	A3 (AC11, Ref)	01.07.2010	23.05.2019	5
Farvagny, FR	A4 (Famsi4, 0.5 mm)	0.5	Famsi 4	A4 (Famsi4, Ref)	01.07.2017	23.05.2019	5
Farvagny, FR	A4 (Famsi4, Ref)	0	Famsi 4	-	01.07.2017	23.05.2019	5
Farvagny, FR	A5 (Famsi2, 1 mm)	1	Famsi 2	A5 (Famsi2, Ref)	01.07.2017	23.05.2019	5
Farvagny, FR	A5 (Famsi2, Ref)	0	Famsi 2	-	01.07.2017	23.05.2019	5
La Verrerie, FR	A1 (Famsi, 1 mm)	1	Famsi	A2 (Famsi, Ref)	01.07.2012	22.05.2019	8
La Verrerie, FR	A2 (Famsi, Ref)	0	Famsi	-	01.07.2012	22.05.2019	8
Landerswil, BE	Fräsabschnitt 1	0	Famsi	-	01.07.2011	01.06.2017	2
Landerswil, BE	Fräsabschnitt 2	0	Famsi	-	01.07.2011	01.06.2017	2
Landerswil, BE	Fräsabschnitt 3	0	Famsi	-	01.07.2011	01.06.2017	2
Muri b. Bern, BE	A1.1 (SDA4-16, 4.2 mm)	4.2	SDA4-16	A6 (SDA4-16, Ref)	01.07.2011	24.09.2019	12
Muri b. Bern, BE	A1.2 (SDA4-16, 4.2 mm)	4.2	SDA4-16	A5 (SDA4-16, Ref)	01.07.2011	24.09.2019	10
Muri b. Bern, BE	A2.1 (SDA4-16, 10.4 mm)	10.4	SDA4-16	A5 (SDA4-16, Ref)	01.07.2011	24.09.2019	10
Muri b. Bern, BE	A2.2 (SDA4-16, 8.9 mm)	8.9	SDA4-16	A5 (Ref)	01.07.2011	24.09.2019	9
Muri b. Bern, BE	A5 (SDA4-16, Ref)	0	SDA4-16	-	01.07.2011	24.09.2019	10
Muri b. Bern, BE	A6 (SDA4-16, Ref)	0	SDA4-16	-	01.07.2011	24.09.2019	12
Muttenz, BL	A1 (SDA4-12, 1.7 mm)	1.7	SDA4-12	A5 (SDA4-12, Ref)	06.07.2013	24.06.2020	5
Muttenz, BL	A2 (SDA8A, 0.7 mm)	0.7	SDA8A	A6 (SDA8A, Ref)	06.07.2013	24.06.2020	7
Muttenz, BL	A3 (SDA8A, 3.2 mm)	3.2	SDA8A	A6 (SDA8A, Ref)	06.07.2013	24.06.2020	7
Muttenz, BL	A4 (SDA8A, 4 mm)	4	SDA8A	A6 (SDA8A, Ref)	06.07.2013	24.06.2020	7
Muttenz, BL	A5 (SDA4-12, Ref)	0	SDA4-12	-	06.07.2013	24.06.2020	7
Muttenz, BL	A6 (SDA8A, Ref)	0	SDA8A	-	06.07.2013	24.06.2020	7
Remigen, AG	A2 (SDA4-12, 4.9 mm)	4.9	SDA4-12	A5 (SDA4-12, Ref)	27.05.2016	27.08.2020	14
Remigen, AG	A2b (SDA4-12, 6.9 mm)	6.9	SDA4-12	A5 (SDA4-12, Ref)	27.05.2016	27.08.2020	14
Remigen, AG	A3 (SDA4-12, 3.4 mm)	3.4	SDA4-12	A5 (SDA4-12, Ref)	27.05.2016	27.08.2020	14
Remigen, AG	A3b (SDA4-12, 5.1 mm)	5.1	SDA4-12	A5 (SDA4-12, Ref)	27.05.2016	27.08.2020	14
Remigen, AG	A5 (SDA4-12, Ref)	0	SDA4-12	-	27.05.2016	27.08.2020	14
Romont, FR	A1 (Famsi, 3 mm)	3	Famsi	-	01.07.2011	06.11.2018	12
Rüthi SG	A1 (SDA8A, 0.7 mm)	0.7	SDA8A	A5 (SDA8A, Ref)	01.07.2014	25.08.2020	4
Rüthi SG	A2 (SDA8A, 2.5 mm)	2.5	SDA8A	A5 (SDA8A, Ref)	01.07.2014	25.08.2020	4

**Tabelle B.1:** Abschnitte inklusive der Referenzabschnitte für alle Messorte.

Ort	Abschnitt	Tiefe [mm]	Belag	Referenz	Einbau	Fräsdatum	# CPX-Msg.
Rüthi SG	A3 (SDA8A, 1.1 mm)	1.1	SDA8A	A5 (SDA8A, Ref)	01.07.2014	25.08.2020	4
Rüthi SG	A4 (SDA8A, 4.1 mm)	4.1	SDA8A	A5 (SDA8A, Ref)	01.07.2014	25.08.2020	4
Rüthi SG	A5 (SDA8A, Ref)	0	SDA8A	-	01.07.2014	25.08.2020	4
Genf, Q. Anserm.	A1 (Nanosoft4, 3.2 mm)	3.2	Nanosoft4	-	01.07.2011	04.08.2021	7
Genf, Q. Anserm.	A2 (Nanosoft4, 5.1 mm)	5.1	Nanosoft4	-	01.07.2011	04.08.2021	7
Sugiez, FR	A1 (Famsi, 3.5 mm)	3.5	Famsi	A3 (Famsi, Ref)	01.07.2013	20.05.2019	7
Sugiez, FR	A2 (Famsi, 3.1 mm)	3.1	Famsi	A3 (Famsi, Ref)	01.07.2013	20.05.2019	7
Sugiez, FR	A3 (Famsi, Ref)	0	Famsi	-	01.07.2013	20.05.2019	7
Tafers, FR	A1 (Famsi 4, 1.8 mm)	1.8	Famsi	Ref (Famsi 4)	01.07.2013	14.05.2019	6
Tafers, FR	A3 (Famsi 4, 1.1 mm)	1.1	Famsi	Ref (Famsi 4)	01.07.2013	14.05.2019	6
Tafers, FR	A4.1 (MA 11, 0.5 mm)	0.5	MA11	Ref (MA11)	01.07.1998	14.05.2019	6
Tafers, FR	A4.2 (MA 11, 0.8 mm)	0.8	MA11	Ref (MA11)	01.07.1998	14.05.2019	6
Tafers, FR	A5-7 (Famsi4, 3 mm)	3	Famsi	Ref (Famsi 4)	01.07.2013	14.05.2019	6
Tafers, FR	A8 (ACMR 11, 1.7 mm)	1.7	ACMR11	Ref (ACMR 11)	01.07.2013	14.05.2019	6
Tafers, FR	Ref (ACMR 11)	0	ACMR11	-	01.07.2013	14.05.2019	6
Tafers, FR	Ref (Famsi 4)	0	Famsi	-	01.07.2013	14.05.2019	6
Tafers, FR	Ref (MA11)	0	MA11	-	01.07.1998	14.05.2019	6
Uznach, SG	A1 (SDA8-12, 1.1 mm)	1.1	SDA8-12	A4 (SDA8-12, Ref)	01.07.2017	26.08.2020	4
Uznach, SG	A2 (SDA8-12, 2.6 mm)	2.6	SDA8-12	A4 (SDA8-12, Ref)	01.07.2017	26.08.2020	4
Uznach, SG	A3 (SDA8-12, 2.3 mm)	2.3	SDA8-12	A4 (SDA8-12, Ref)	01.07.2017	26.08.2020	4
Uznach, SG	A4 (SDA8-12, Ref)	0	SDA8-12	-	01.07.2017	26.08.2020	4
Veyrier, GE	A1 (Sapaphone4 3.3 mm)	3.3	Sapaphone	A5 (Sapaphone4, Ref)	01.07.2009	05.08.2021	4
Veyrier, GE	A2 (Sapaphone4 3.1 mm)	3.1	Sapaphone	A5 (Sapaphone4, Ref)	01.07.2009	05.08.2021	4
Veyrier, GE	A3 (Sapaphone4 2 mm)	2	Sapaphone	A5 (Sapaphone4, Ref)	01.07.2009	05.08.2021	4
Veyrier, GE	A4 (Sapaphone4 1.6 mm)	1.6	Sapaphone	A5 (Sapaphone4, Ref)	01.07.2009	05.08.2021	4
Veyrier, GE	A5 (Sapaphone4, Ref)	0	Sapaphone	-	01.07.2009	05.08.2021	4
Villarod, FR	A1 (ACMR11, 1.1 mm)	1.1	ACMR11	A3 (ACMR11, Ref)	01.07.2013	23.05.2019	4
Villarod, FR	A2 (ACMR8, 0.5 mm)	0.5	ACMR8	A4 (ACMR8, Ref)	01.07.2013	23.05.2019	1
Villarod, FR	A3 (ACMR11, Ref)	0	ACMR11	-	01.07.2013	23.05.2019	4
Villarod, FR	A4 (ACMR8, Ref)	0	ACMR8	-	01.07.2013	23.05.2019	1
Zofingen, AG	A1 (SDA4-12, 2.8 mm)	2.8	SDA4-12	A8 (SDA4-12, Ref)	08.09.2012	25.09.2019	14
Zofingen, AG	A2 (SDA4-16, 2.2 mm)	2.2	SDA4-16	A7 Süd (SDA4-16, Ref)	08.09.2012	25.09.2019	14
Zofingen, AG	A3.1 (SDA4-16, 5.9 mm)	5.9	SDA4-16	A7 Nord (SDA4-16, Ref)	08.09.2012	25.09.2019	14
Zofingen, AG	A3.2 (SDA4-16, 6.1 mm)	6.1	SDA4-16	A7 Nord (SDA4-16, Ref)	08.09.2012	25.09.2019	14
Zofingen, AG	A4.1 (SDA4-12, 4.1 mm)	4.1	SDA4-12	A8 (SDA4-12, Ref)	08.09.2012	25.09.2019	14
Zofingen, AG	A4.2 (SDA4-12, 4 mm)	4	SDA4-12	A8 (SDA4-12, Ref)	08.09.2012	25.09.2019	14
Zofingen, AG	A7 Nord (SDA4-16, Ref)	0	SDA4-16	-	08.09.2012	25.09.2019	14
Zofingen, AG	A7 Süd (SDA4-16, Ref)	0	SDA4-16	-	08.09.2012	25.09.2019	14
Zofingen, AG	A8 (SDA4-12, Ref)	0	SDA4-12	-	08.09.2012	25.09.2019	14

## C. Corserey

In Corserey wurde im Jahr 2018 der 2012 eingebaute Famsi-Belag abgeschliffen. Dabei sind insgesamt 3 Abschnitte definiert worden. (Vgl. Tabelle C.1). An diesem Standort wurde die gesamte Fläche bearbeitet und es existiert keine ungeschliffene Referenz.

**Tabelle C.1:** Abschnitte in Corserey.

Belag	Abschnitt	Fräsdatum	Fahrbahn	Länge	Abtrag	Bezeichnung in Plots
Famsi 4 (2012)	A1	07.11.2018	Rg Süd	690 m	1.7 mm (1x WZb/slow)	A1 (Famsi 4, 1.7 mm)
	Z12	07.11.2018	Rg Süd	40 m	5-10 mm (x WZb)	Z12 (Famsi 4, 5-10 mm)
	A2	07.11.2018	Rg Nord	730 m	1 mm (1x WZb/fast)	A2 (Famsi 4, 1 mm)

### C.1. Übersichtskarte

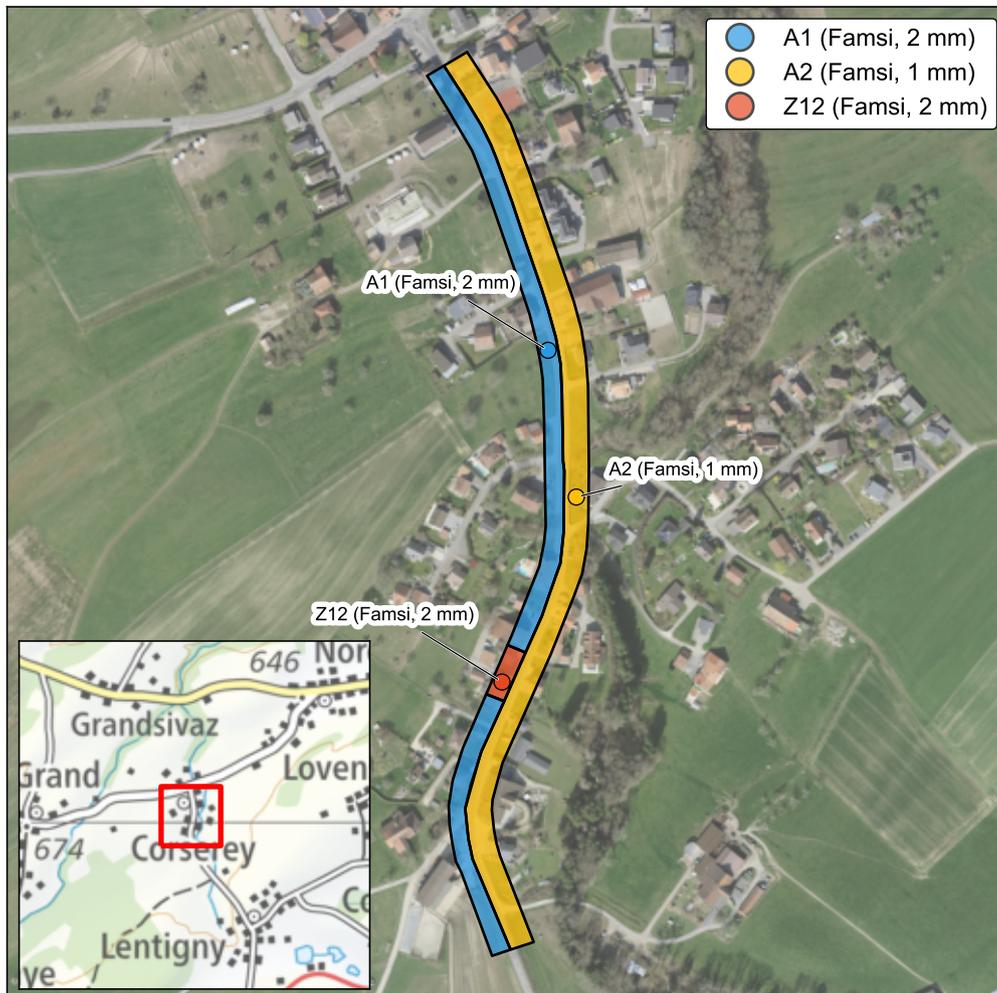
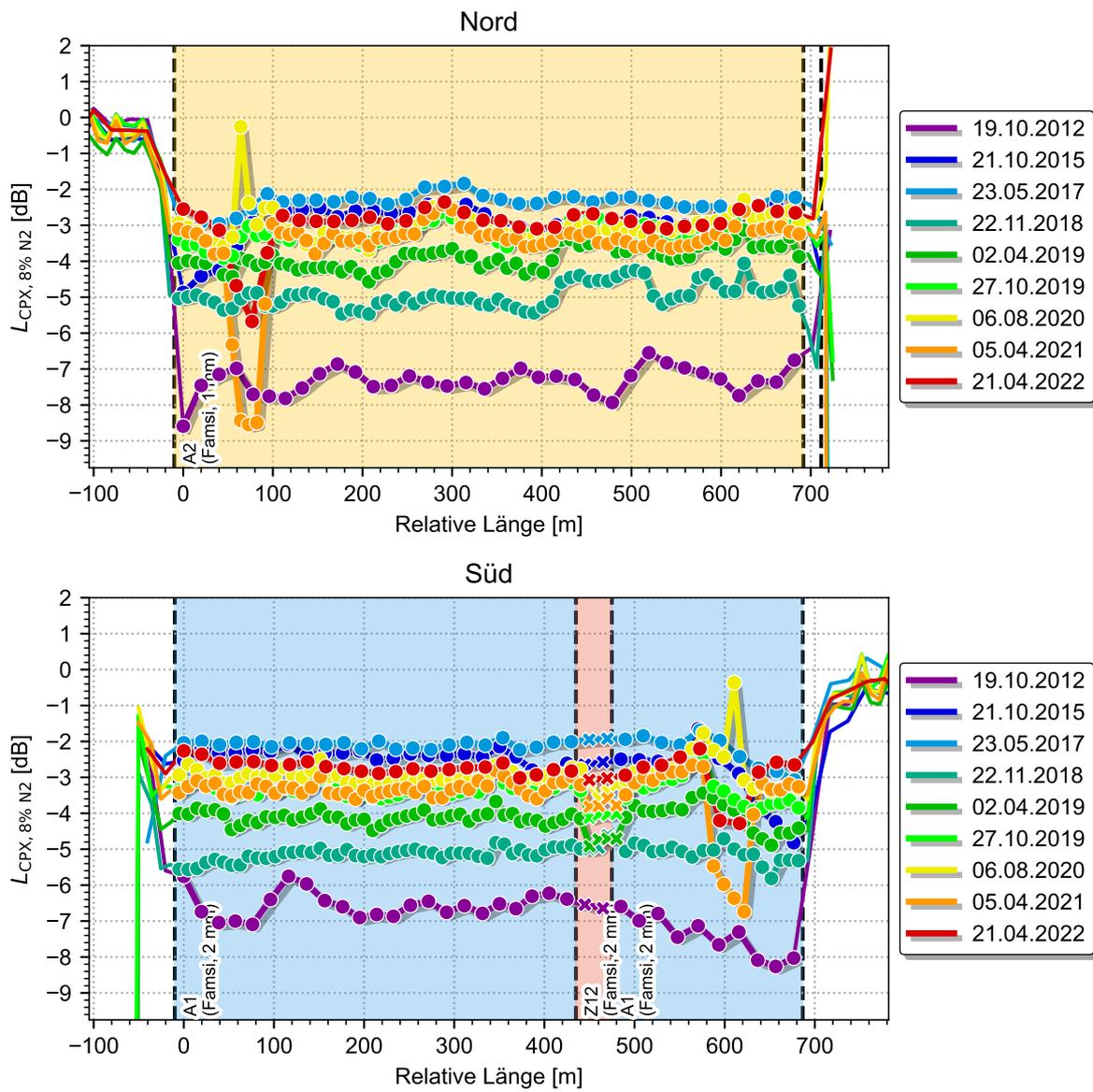


Abbildung C.1: Übersichtskarte Corserey mit Lage der Abschnitte

## C.2. Akustische Resultate

### C.2.1 CPX-Streckenverlauf



**Abbildung C.2:** Streckenverlauf der CPX-Messungen in Corserey aufgeteilt nach Fahrbahn (Schleifdatum: 07.11.2018).

### C.2.2 CPX- Zeitverlauf

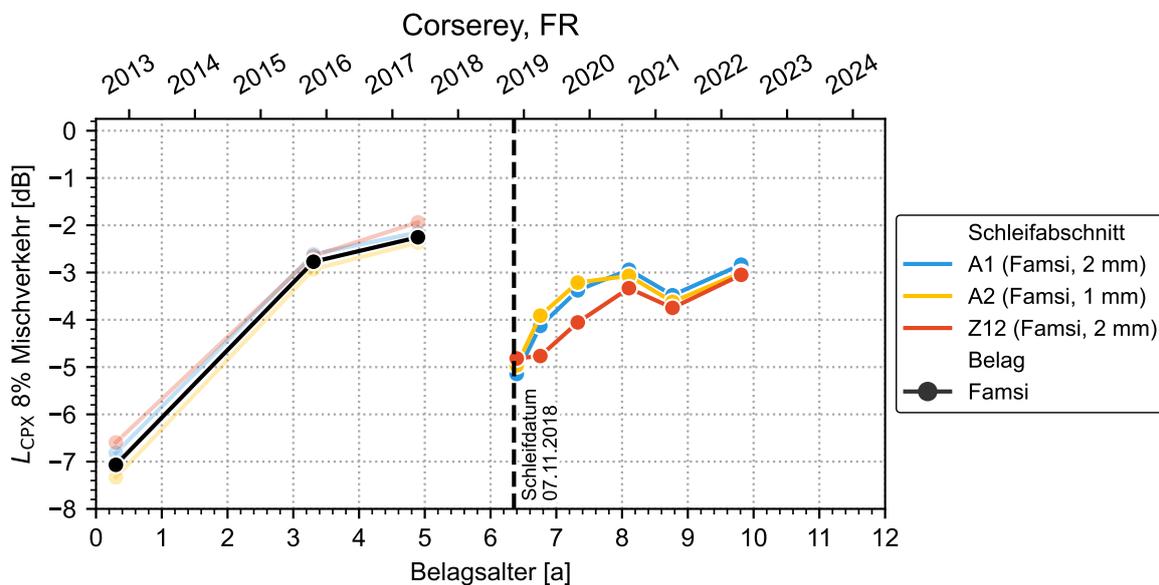


Abbildung C.3: Zeitlicher Verlauf der akustischen Belagsgüte in Corserey, aufgeteilt nach Abschnitt

### C.2.3 Regenerations-Plot

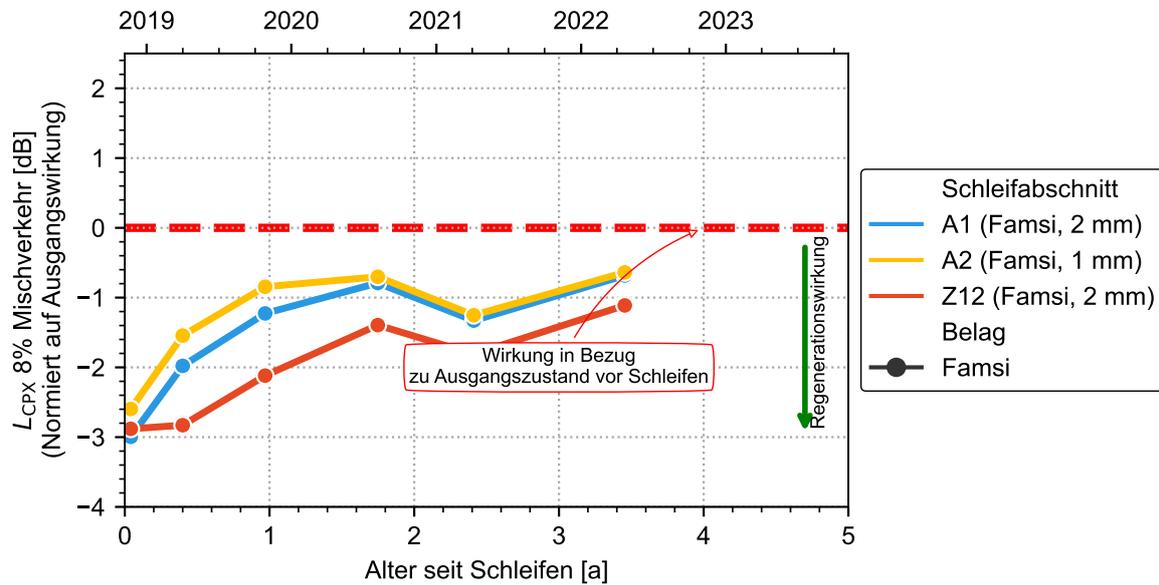
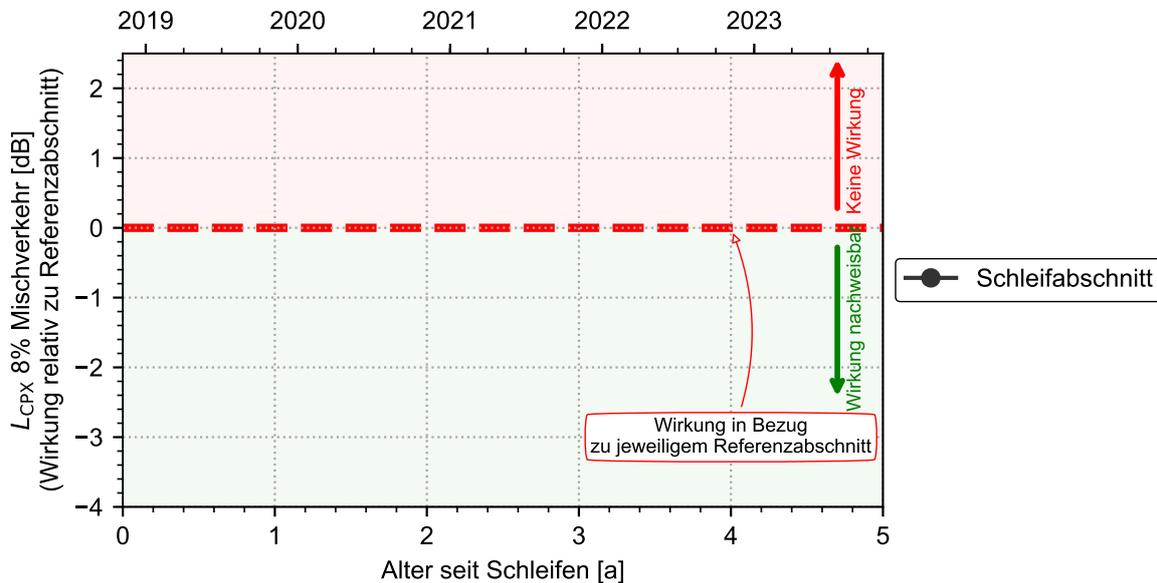


Abbildung C.4: Wirkung der Schleifmassnahme relativ zum Ausgangszustand ab Zeitpunkt der Massnahme in Corserey

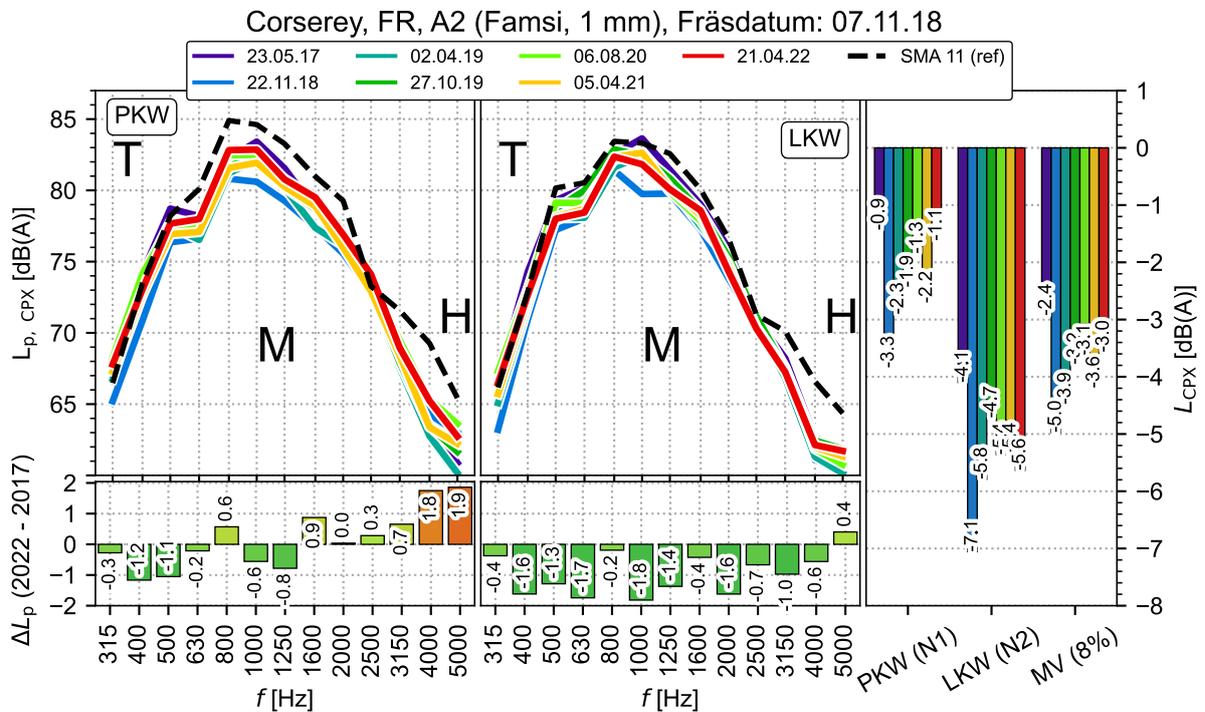
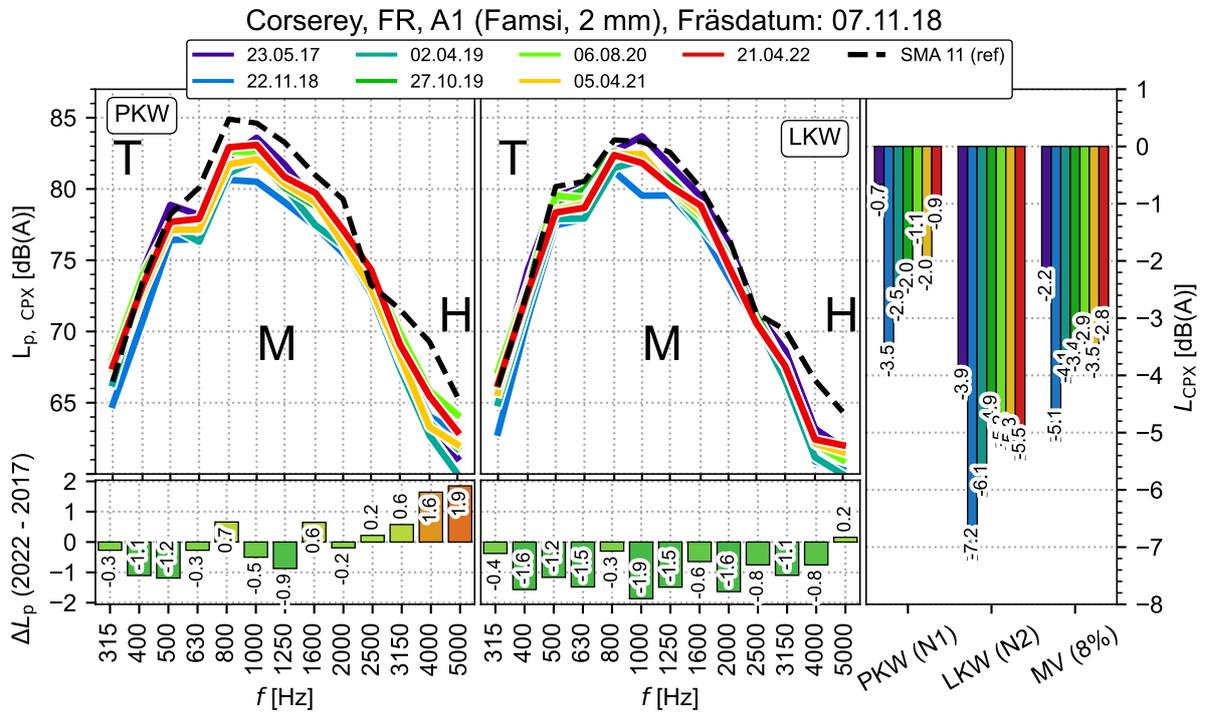
### C.2.4 Wirkungs-Plot

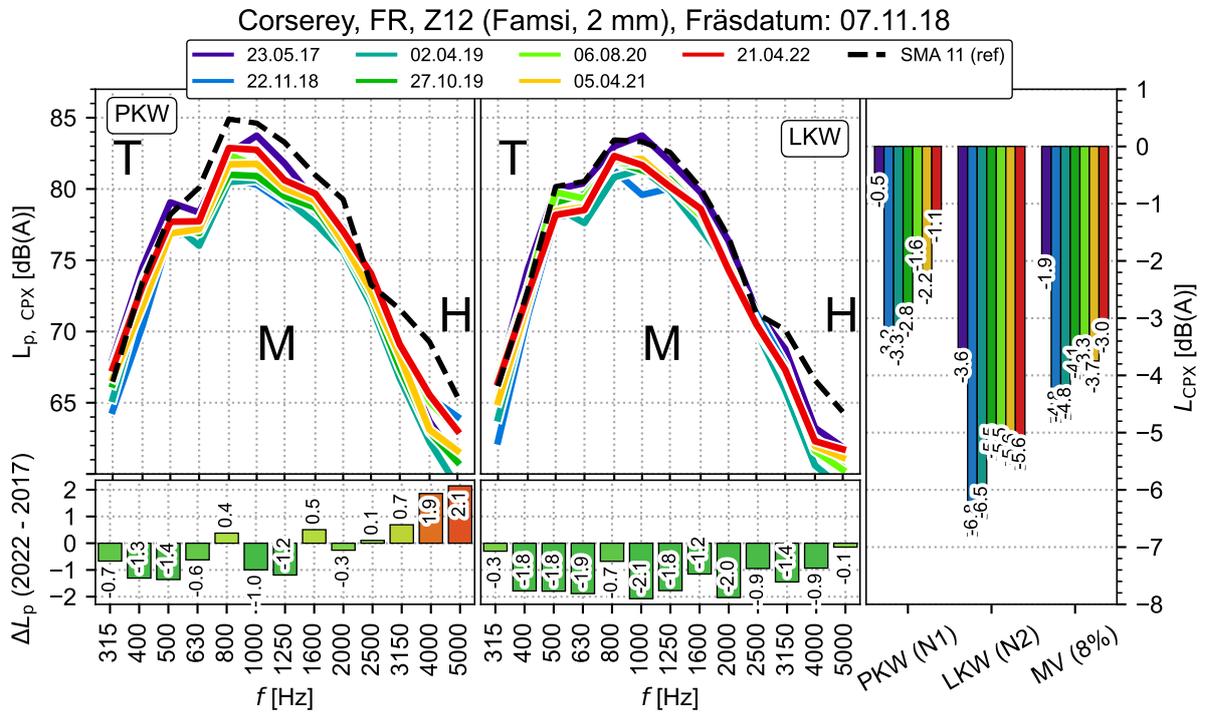


**Abbildung C.5:** Wirkung relativ zu Referenzabschnitt in Corserey. Da keine Referenz definiert wurde ist dieser Vergleich an diesem Standort nicht möglich.

### C.2.5 Spektralanalyse

Bei den Spektralanalysen wird jeweils die spektrale Veränderung der gemessenen CPX-Pegel im Zeitraum von der letzten Messung vor der Schleifmassnahme gezeigt. In den Abbildungen wird unterschieden zwischen den PKW und LKW Messreifen. Ebenfalls werden die Gesamtpegel im rechten Teil ebenfalls für PKW, LKW und den Mischverkehr (N2-Anteil von 8%) gezeigt.





**Abbildung C.8:** Spektralanalyse in Corserrey, Abschnitt Z12

## D. Dittingen

In Dittingen, Kanton BL wurde auf den drei Belägen (SDA4A, SDA8A und ACMR8) im Jahr 2020 verschiedene Schleifverfahren getestet. Die Beläge wiesen zum Zeitpunkt der Massnahme somit ein Alter von 6-7 Jahre auf. Für alle Strecken wurde eine Referenz in derselben Fahrtrichtung definiert (Vgl. E.1).

**Tabelle D.1:** Abschnitte in Dittingen

Belag	Abschnitt	Fräsdatum	Fahrbahn	Länge	Abtrag	Bezeichnung in Plots
SDA 4 A (2013)	A1	25.06.2020	Rg Nord	60 m	0.3 mm (1x WZg)	A1 (SDA 4 A, 0.3 mm)
	A2	25.06.2020	Rg Nord	60 m	1 mm (2x WZg)	A2 (SDA 4 A, 1 mm)
	Referenz		Rg Nord	60 m	ungeschliffen	Ref (SDA 4 A)
ACMR 8 (2014)	A3	25.06.2020	Rg Süd	80 m	0.9 mm (1x WZg)	A3 (ACMR 8, 0.9 mm)
	A4	25.06.2020	Rg Süd	80 m	1.6 mm (2x WZg)	A4 (ACMR 8, 1.6 mm)
	A5	25.06.2020	Rg Süd	80 m	3.5 mm (3x WZg)	A5 (ACMR 8, 3.5 mm)
	Referenz		Rg Nord	240 m	ungeschliffen	Ref (ACMR 8)
SDA 8 A (2013)	A6	25.06.2020	Rg Süd	80 m	0.8 mm (1x WZg)	A6 (SDA 8 A, 0.8 mm)
	Referenz		Rg Süd	100 m	ungeschliffen	Ref (SDA 8 A)

## D.1. Übersichtskarte

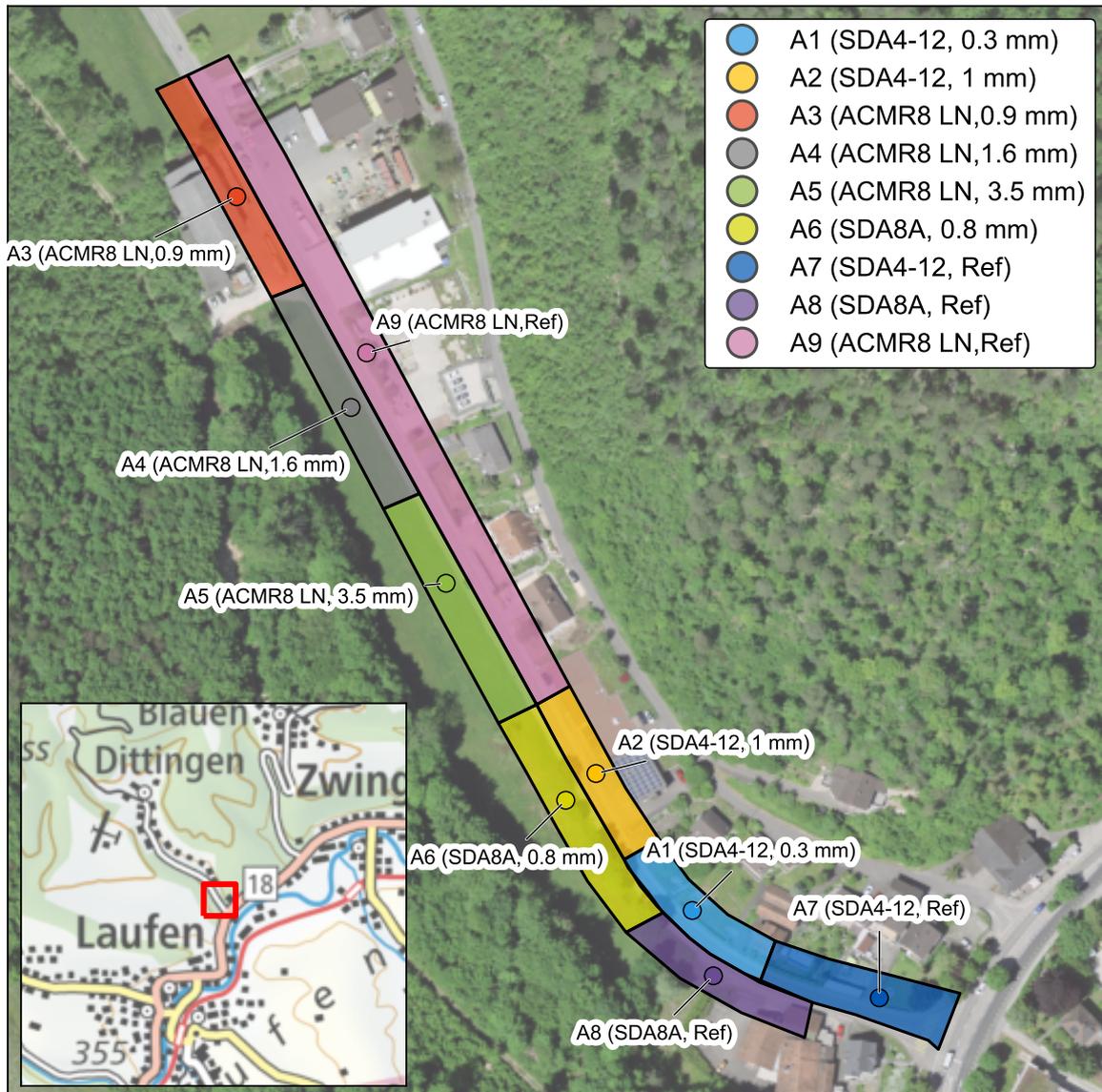
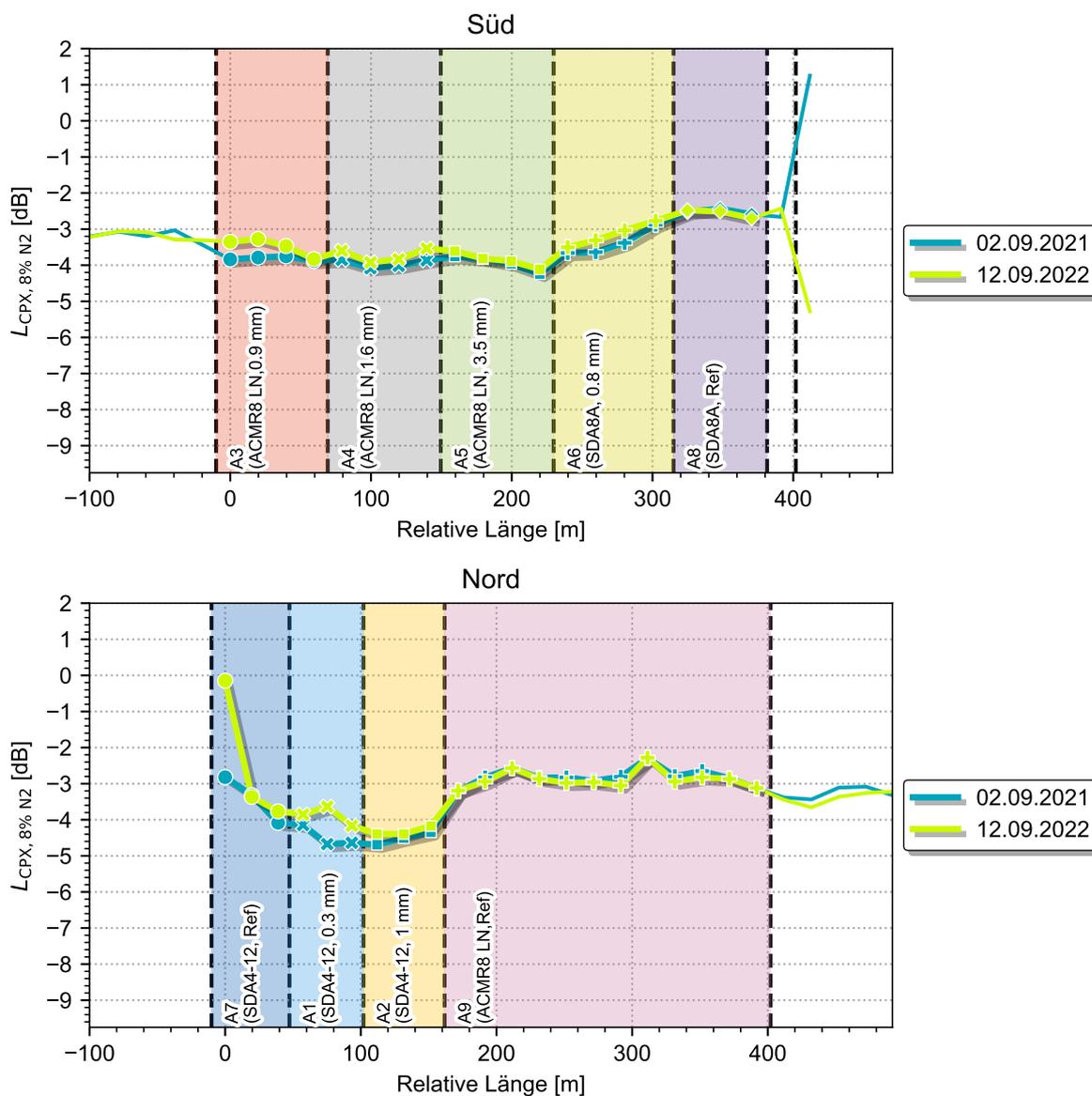


Abbildung D.1: Übersichtskarte Dittingen mit Lage der Abschnitte.

## D.2. Akustische Resultate

In Dittingen wurden CPX-Messungen durch die Firma AeBo und G+P durchgeführt. Da diese Resultate nur bedingt vergleichbar waren (Vgl. Kapitel A) werden für die akustischen Resultate hier nur die Messungen von G+P aufgezeigt. Das hat zur Folge, dass keine unmittelbaren Vorhermessungen vor der Schleifmassnahme zur Verfügung standen.

### D.2.1 CPX-Streckenverlauf



**Abbildung D.2:** Streckenverlauf der CPX-Messungen in Dittingen aufgeteilt nach Fahrbahn Streckenverlauf, Schleifdatum 25.06.2020.

## D.2.2 CPX-Zeitverlauf

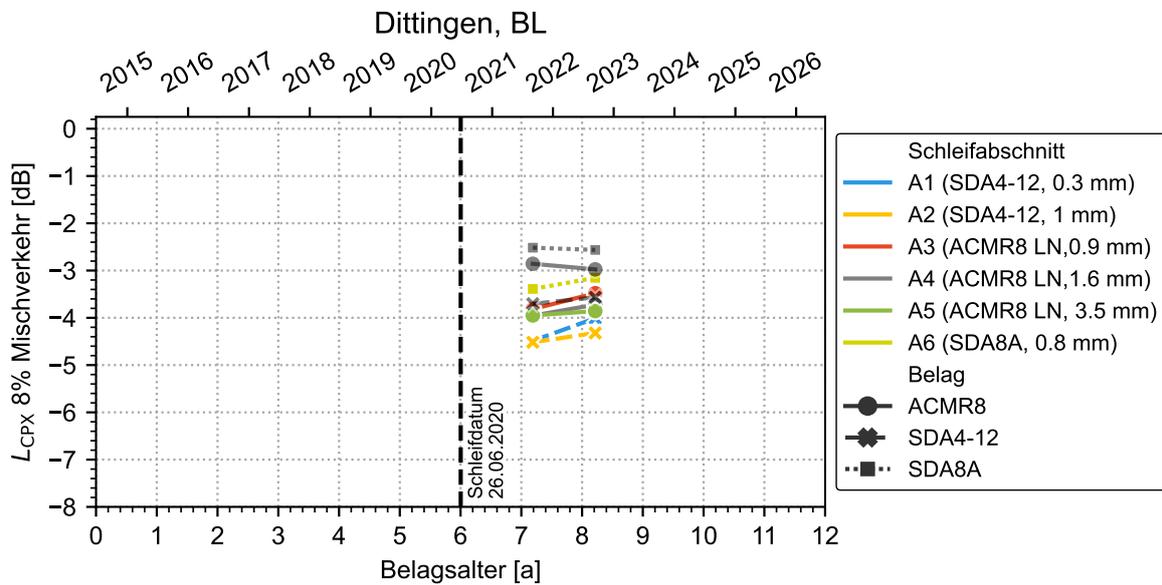


Abbildung D.3: Wirkung der Schleifmassnahmen Dittingen, BL

## D.2.3 Akustische Regeneration

Da die Vorhermessungen allesamt von AeBo durchgeführt wurden, kann in diesem Fall keine für diese Meta-Studie homogenisierter Vergleich angestellt werden, da nur PW-Messungen durchgeführt wurden. Für einen kompletten Vergleich ist auf der folgenden Seite der Auszug aus dem Bericht von AeBo eingefügt.

**CPX-Messungen vor/nach Schleifarbeiten in Muttenz und Dittingen**  
**Synthese Dittingen, Hauptstrasse**

Dargestellte Messdatenreihen:  
 Vorher, 20.04.2020, Run 095828  
 Nachher, 14.09.2020, Run 094307, Run 093130 und Run 093739

**Referenzabschnitt (unveränderte Fahrbahn)**



**Vorher-Zustand: 20.04.2020**  
 Hauptstrasse, Richtung NW, Vorher, 20.04.2020, Run 095828

Abschnitt	Längengrad [Dezimal]	Breitengrad [Dezimal]	T°Belag [°C]	V [km/h]	Pegel [dBA]	Kb (PW) [dBA]	Kb (PW) gerundet
Referenzabschnitt	7.50818	47.43150	24.9	50.1	90.7	-0.8	<b>-1.0</b>
(unveränderte Fahrbahn)	7.50663	47.43341					

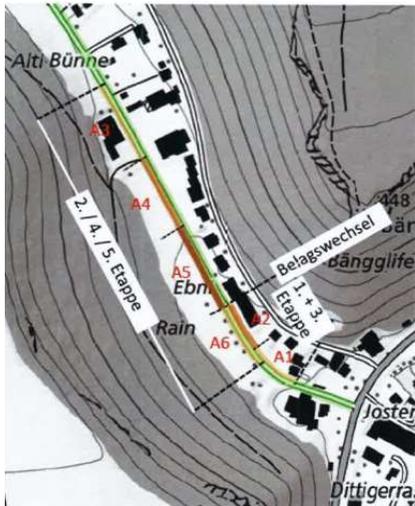
**Nachher-Zustand: 14.09.2020**  
 Hauptstrasse, Richtung NW, Nachher, 14.09.2020, Run 094307

Abschnitt	Längengrad [Dezimal]	Breitengrad [Dezimal]	T°Belag [°C]	V [km/h]	Pegel [dBA]	Kb (PW) [dBA]	Kb (PW) gerundet
Referenzabschnitt	7.50822	47.43151	30.9	49.4	90.7	-0.8	<b>-1.0</b>
(unveränderte Fahrbahn)	7.50669	47.43341					

**Farbskala für den Belagskennwert Kb (PW) und die Wirkung der Schleifarbeiten**

Ungünstig bzw. Verschlechterung		Neutral		Günstig bzw. Verbesserung	
Kb-Wert	Farbskala	Kb-Wert	Farbskala	Kb-Wert	Farbskala
>=4.0	Rot	0.0	Grün	-0.5	Grün
3.5	Rot			-1.0	Grün
3.0	Rot			-1.5	Grün
2.5	Rot			-2.0	Grün
2.0	Orange			-2.5	Blau
1.5	Orange			-3.0	Blau
1.0	Orange			-3.5	Blau
0.5	Orange			-4.0	Blau

**Abschnitte mit Schleifarbeiten**



**Vorher-Zustand: 20.04.2020**  
 Hauptstrasse, Vorher, 20.04.2020, Run 095828 (Rg NW und SO)

Abschnitt	Längengrad [Dezimal]	Breitengrad [Dezimal]	T°Belag [°C]	V [km/h]	Pegel [dBA]	Kb (PW) [dBA]	Kb (PW) gerundet
Abschnitte mit Schleifarbeiten	7.50916	47.43068	25.7	50.4	89.9	-1.7	<b>-1.5</b>
Rg NW	7.50819	47.43149					
Abschnitte mit Schleifarbeiten	7.50660	47.43340	24.5	50.0	91.7	0.5	<b>0.5</b>
Rg SO	7.50868	47.43088					
LNA 4 A_A1_0.3mm (Rg NW)	7.50916	47.43068	26.0	50.1	89.9	-1.7	<b>-1.5</b>
LNA 4 A_A2_1.0mm (Rg NW)	7.50857	47.43103	25.5	50.8	90.0	-1.6	<b>-1.5</b>
ACMR 8 LN_A3_0.9mm (Rg SO)	7.50660	47.43340	24.2	49.9	91.0	-0.3	<b>-0.5</b>
ACMR 8 LN_A4_1.6mm (Rg SO)	7.50712	47.43277	24.3	50.4	91.7	0.5	<b>0.5</b>
ACMR 8 LN_A5_3.5mm (Rg SO)	7.50762	47.43213	24.8	50.1	92.3	1.3	<b>1.5</b>
LNA 8 A_A6_0.8mm (Rg SO)	7.50815	47.43148	24.7	49.7	91.6	0.4	<b>0.5</b>

**Nachher-Zustand: 14.09.2020**  
 Hauptstrasse, Nachher, 14.09.2020, Run 093130 (Rg NW) und Run 093739 (Rg SO)

Abschnitt	Längengrad [Dezimal]	Breitengrad [Dezimal]	T°Belag [°C]	V [km/h]	Pegel [dBA]	Kb (PW) [dBA]	Kb (PW) gerundet	WIRKUNG SCHLEIFEN
Abschnitte mit Schleifarbeiten	7.50932	47.43068	31.0	49.7	90.0	-1.6	<b>-1.5</b>	<b>0.0</b>
Rg NW	7.50825	47.43149						
Abschnitte mit Schleifarbeiten	7.50664	47.43340	30.7	49.5	90.7	-0.7	<b>-0.5</b>	<b>-1.0</b>
Rg SO	7.50874	47.43088						
LNA 4 A_A1_0.3mm (Rg NW)	7.50932	47.43068	31.1	49.2	89.7	-2.0	<b>-2.0</b>	<b>-0.5</b>
LNA 4 A_A2_1.0mm (Rg NW)	7.50863	47.43103	30.9	50.2	90.3	-1.2	<b>-1.0</b>	<b>0.5</b>
ACMR 8 LN_A3_0.9mm (Rg SO)	7.50664	47.43340	30.4	50.1	90.6	-0.9	<b>-1.0</b>	<b>-0.5</b>
ACMR 8 LN_A4_1.6mm (Rg SO)	7.50716	47.43276	30.5	49.2	90.8	-0.6	<b>-0.5</b>	<b>-1.0</b>
ACMR 8 LN_A5_3.5mm (Rg SO)	7.50766	47.43213	31.0	48.6	90.6	-0.8	<b>-1.0</b>	<b>-2.5</b>
LNA 8 A_A6_0.8mm (Rg SO)	7.50819	47.43149	31.0	50.0	90.8	-0.6	<b>-0.5</b>	<b>-1.0</b>

### D.2.4 Spektralanalyse

Bei den Spektralanalysen wird jeweils die spektrale Veränderung der gemessenen CPX-Pegel im Zeitraum von der letzten Messung vor der Schleifmassnahme gezeigt. In den Abbildungen wird unterschieden zwischen den PKW und LKW Messreifen. Ebenfalls werden die Gesamtpegel im rechten Teil ebenfalls für PKW, LKW und den Mischverkehr (N2-Anteil von 8%) gezeigt.

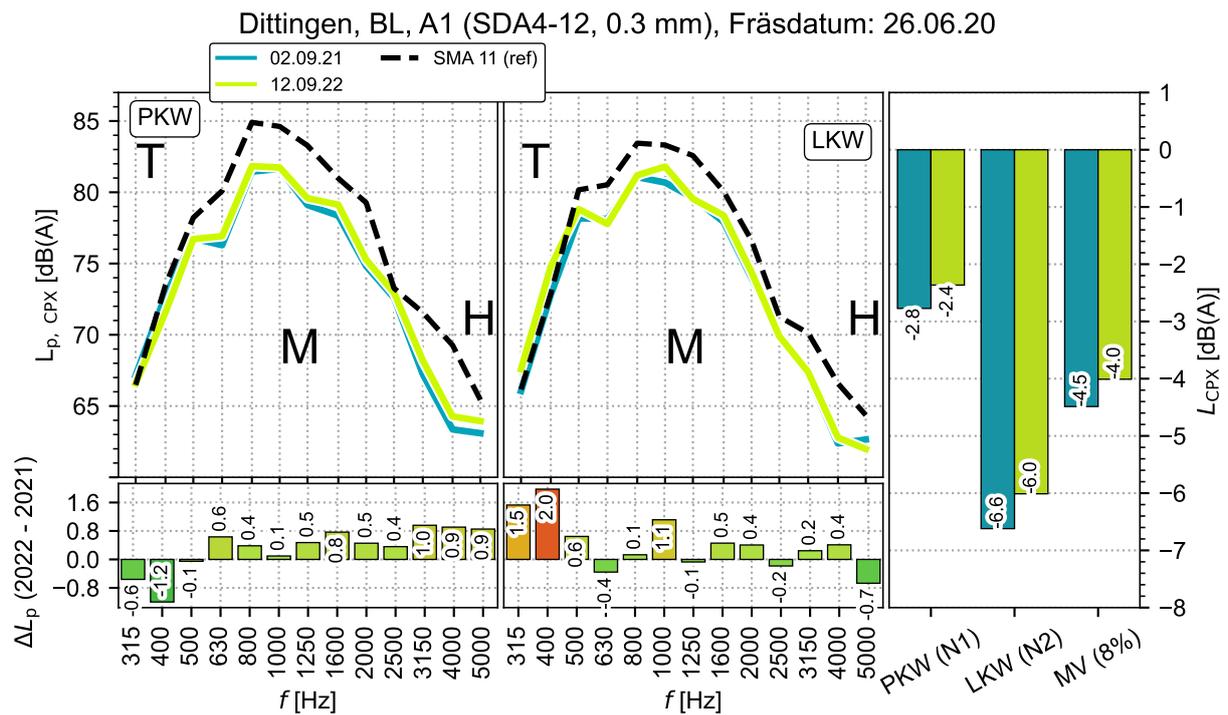


Abbildung D.4: Spektralanalyse in Dittingen, Abschnitt A1

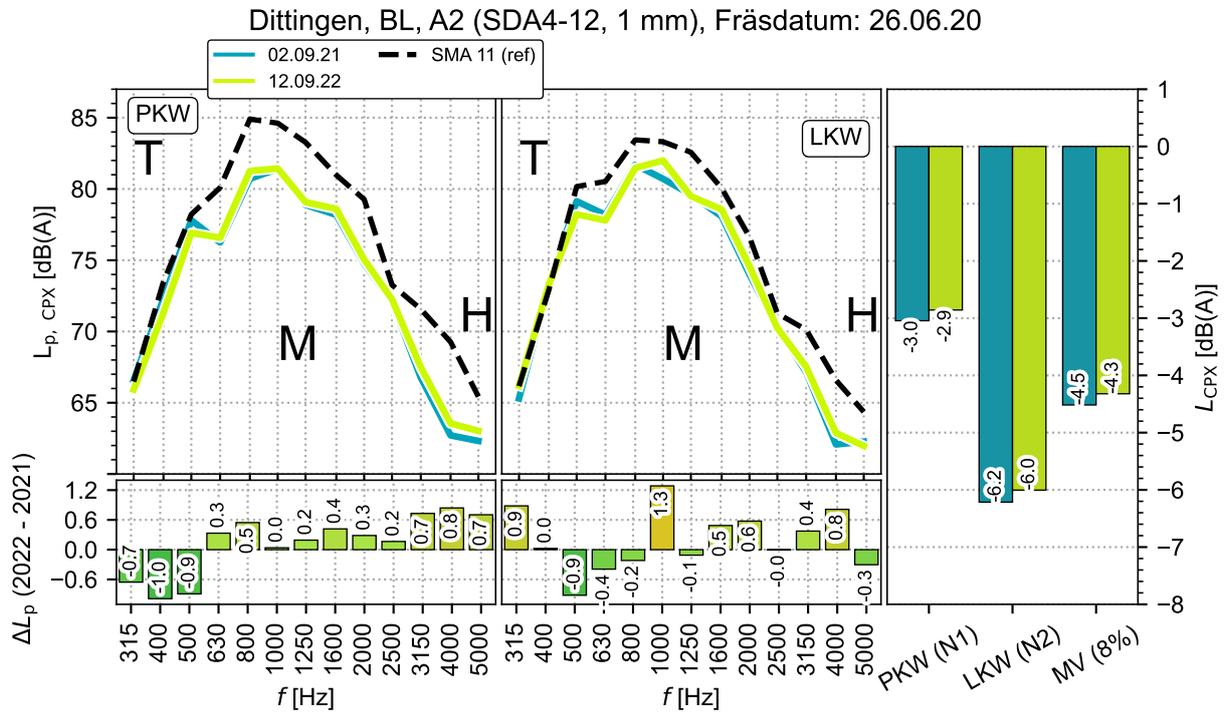


Abbildung D.5: Spektralanalyse in Dittingen, Abschnitt A2

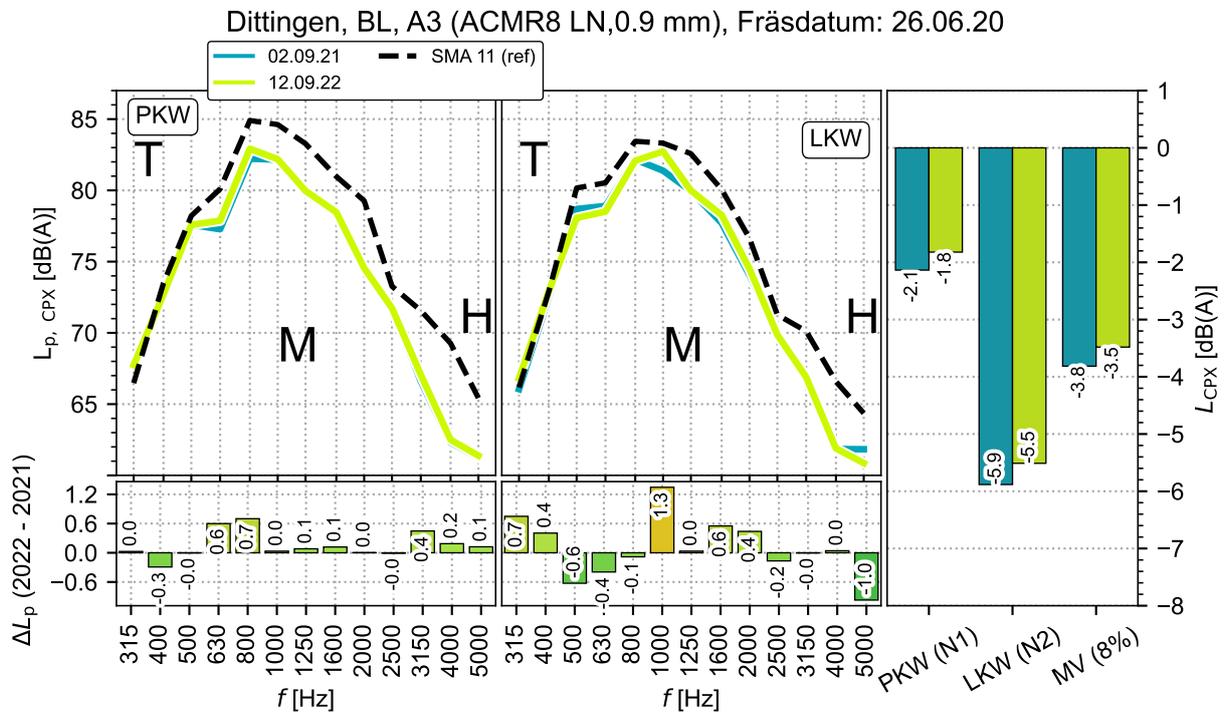


Abbildung D.6: Spektralanalyse in Dittingen, Abschnitt A3

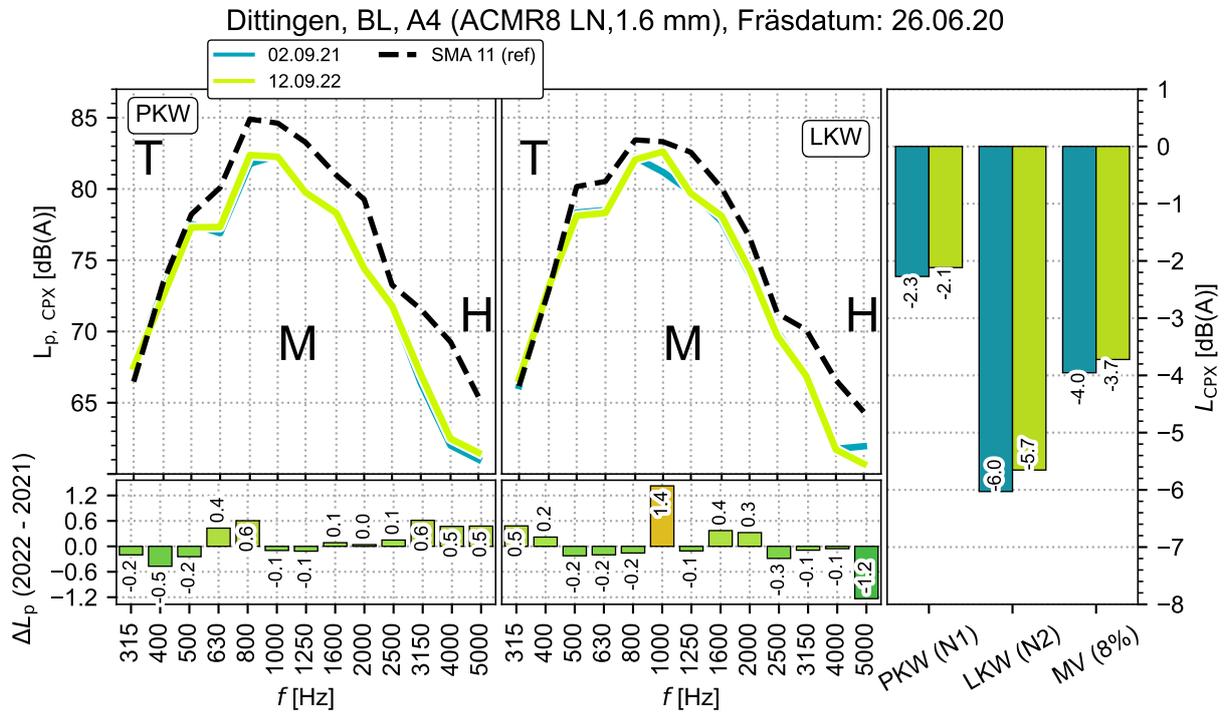


Abbildung D.7: Spektralanalyse in Dittingen, Abschnitt A4

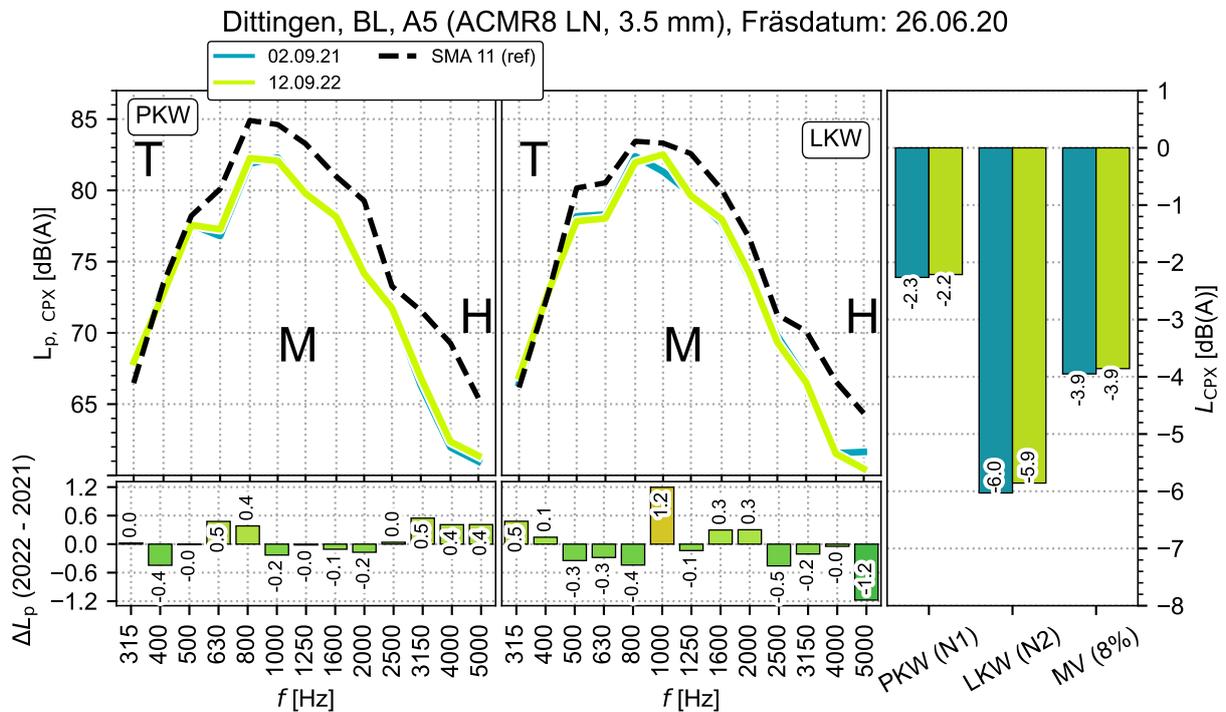


Abbildung D.8: Spektralanalyse in Dittingen, Abschnitt A5

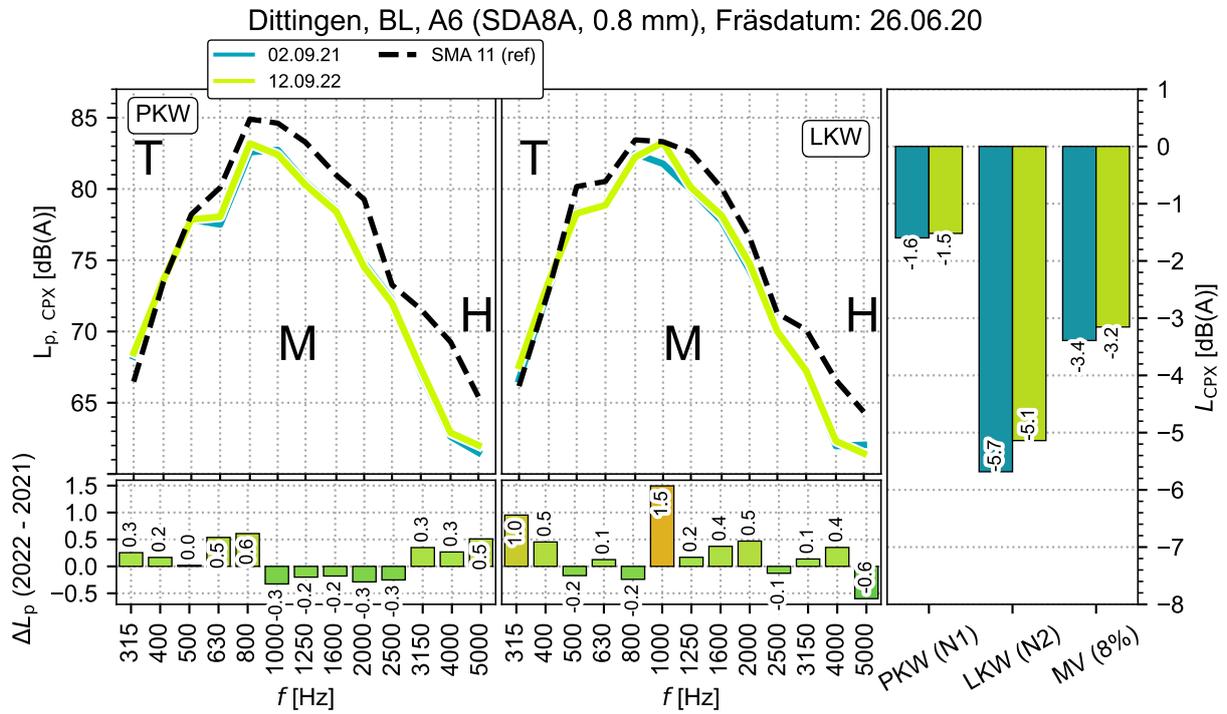


Abbildung D.9: Spektralanalyse in Dittingen, Abschnitt A6

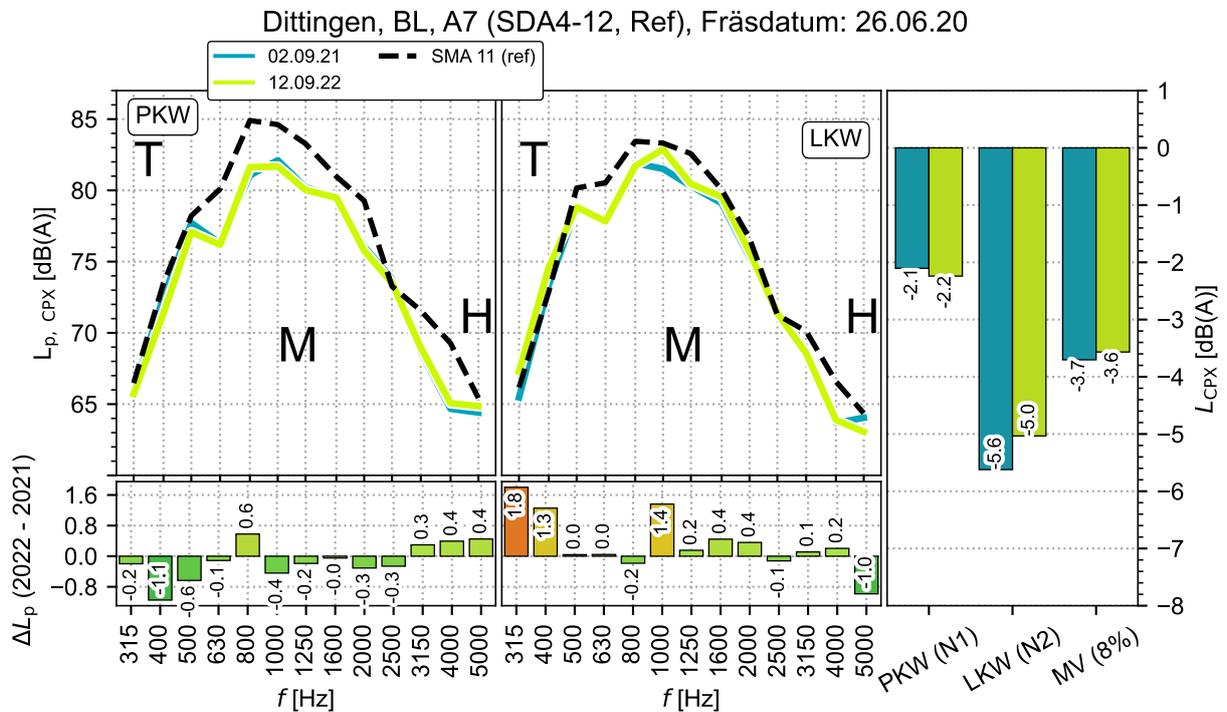


Abbildung D.10: Spektralanalyse in Dittingen, Abschnitt A7

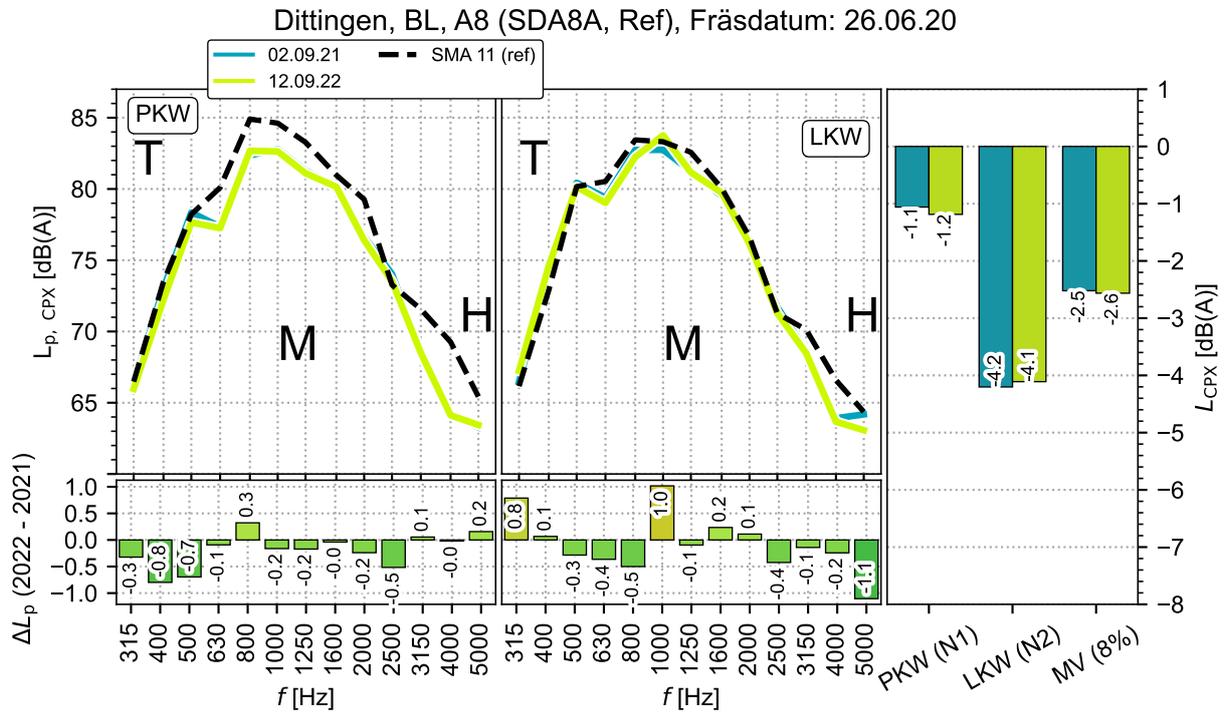


Abbildung D.11: Spektralanalyse in Dittingen, Abschnitt A8

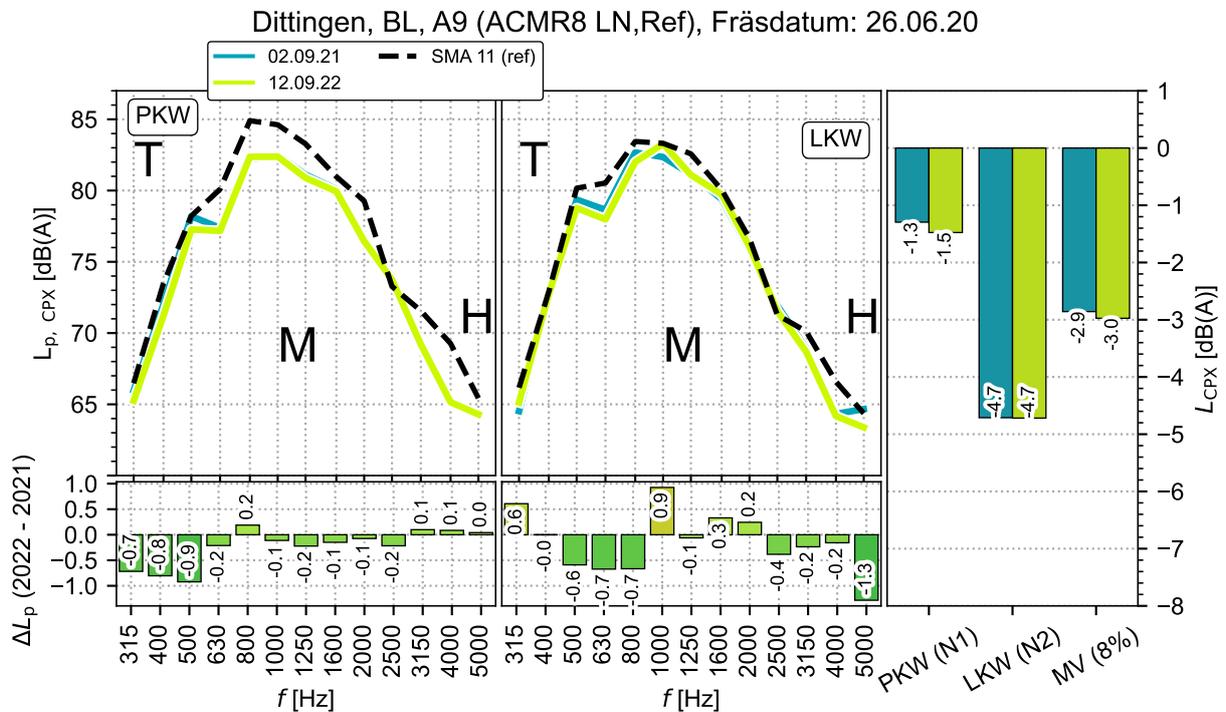


Abbildung D.12: Spektralanalyse in Dittingen, Abschnitt A9

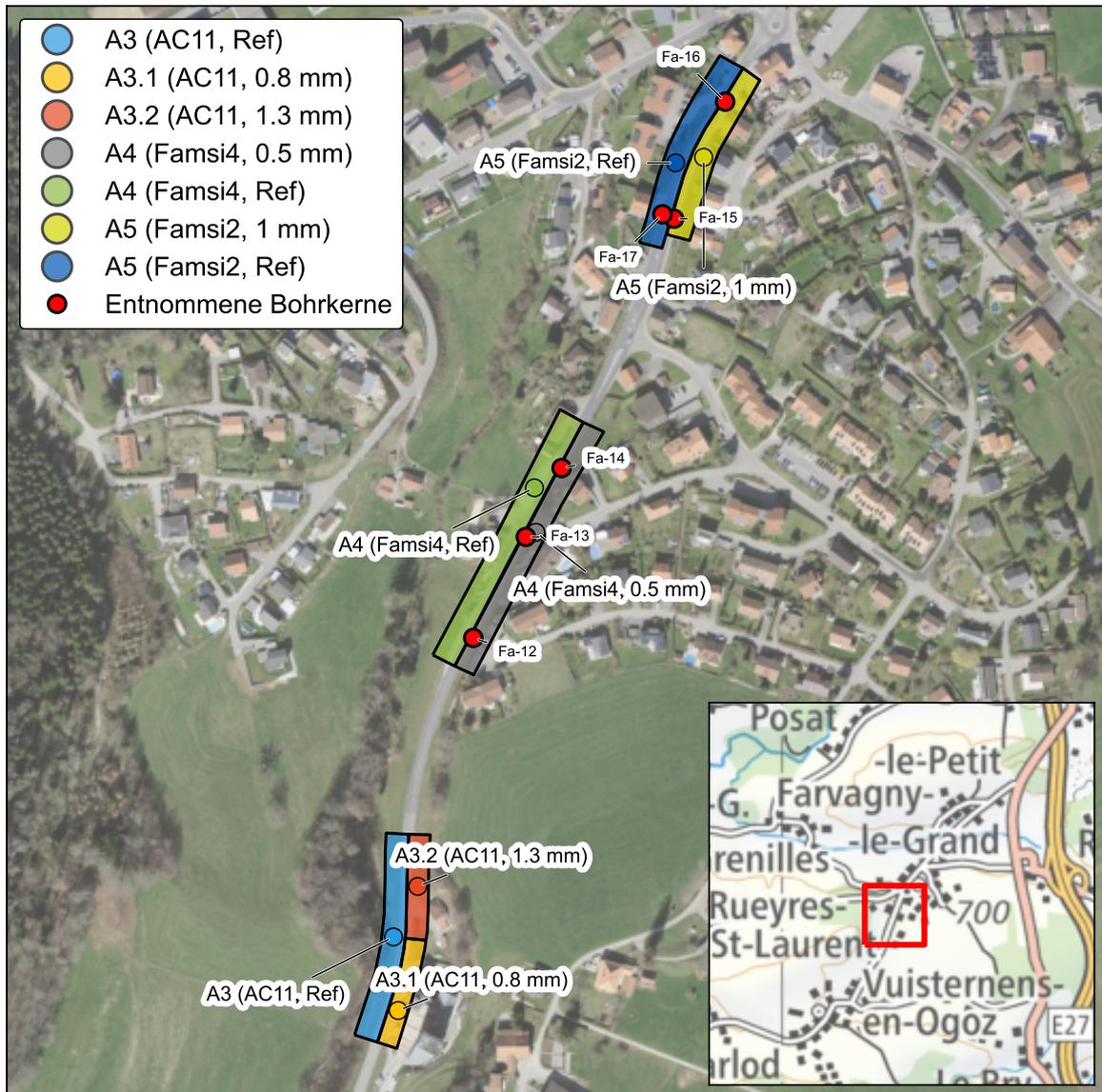
## E. Farvagny

**Tabelle E.1:** Abschnitte in Fahravnagny

Belag	Abschnitt	Fräsdatum	Fahrbahn	Länge	Abtrag	Bezeichnung in Plots
AC 11 (19??)	A3.1	23.05.2019	Rg Nord	75 m	0.8 mm (1x WZb/slow)	A3.1 (AC 11, 0.8 mm)
	A3.2	23.05.2019	Rg Nord	75 m	1.3 mm (1x WZb/fast)	A3.2 (AC 11, 1.3 mm)
	Referenz		Rg Süd	150 m	ungeschliffen	Ref (AC 11)
Famsi 4 (2017)	A4	23.05.2019	Rg Nord	120 m	0.5 mm (1x WZb)	A4 (Famsi 4, 0.5 mm)
	Referenz		Rg Süd	120 m	ungeschliffen	Ref (Famsi 4)
LNA 2 (2017)	A5	23.05.2019	Rg Nord	100 m	1 mm (1x WZb)	A5 (LNA 2, 1 mm)
	Referenz		Rg Süd	100 m	ungeschliffen	Ref (LNA 2)

### E.1. Übersichtskarte

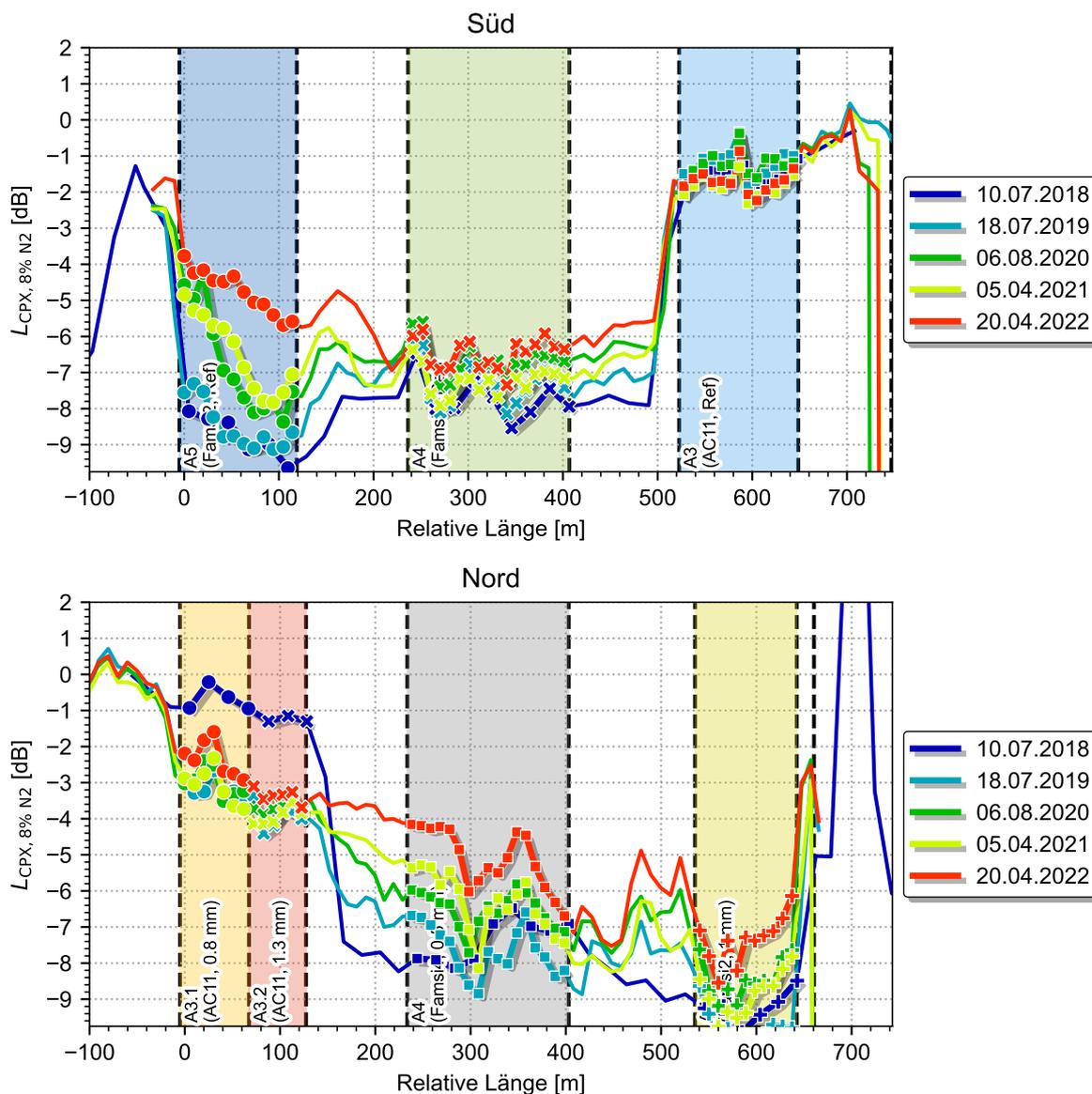
In Fahravnagny wurden ebenfalls Bohrkernentnahmen, um mit dem AVCA respektive dem Imprägnationsverfahren Hinweise über die Porenstruktur zu erlangen. In der Karte in Abbildung E.1 sind die Orte der Bohrkernentnahmen (Fa-12 - Fa-17) aufgeführt.



**Abbildung E.1:** Übersichtskarte Farvagny inklusive der Bohrkernentnahmepunkte (Fa-12 - Fa-17).

## E.2. Akustische Resultate

### E.2.1 CPX-Streckenverlauf



**Abbildung E.2:** Streckenverlauf der CPX-Messungen in Farvagny aufgeteilt nach Fahrbahn (Schleifdatum: 23.05.2019)

### E.2.2 CPX- Zeitverlauf

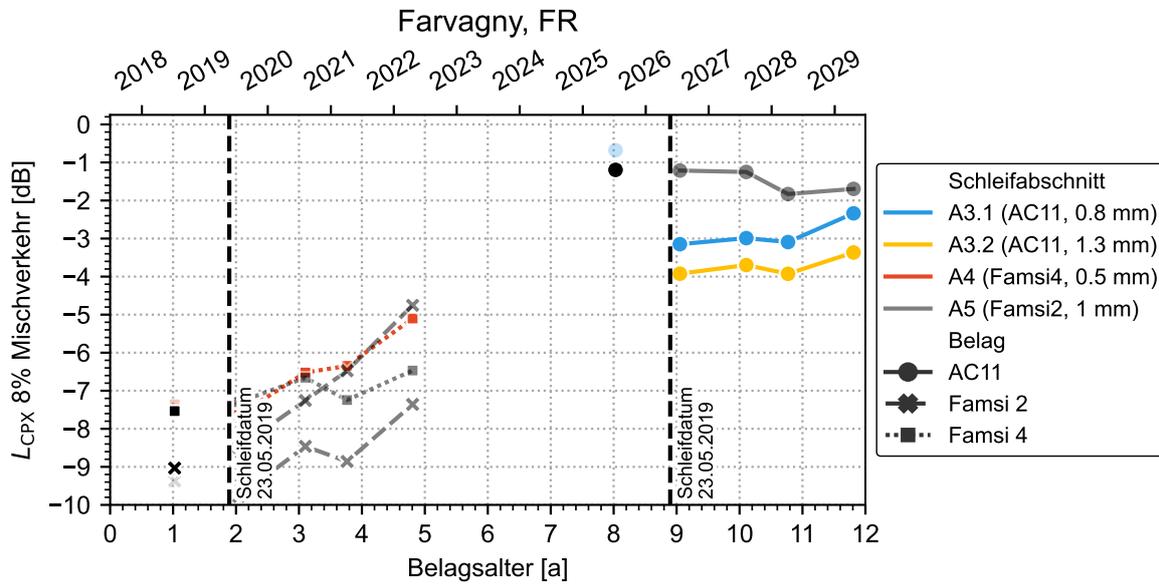


Abbildung E.3: Wirkung der Schleifmassnahmen Farvagny

### E.2.3 Akustische Regeneration

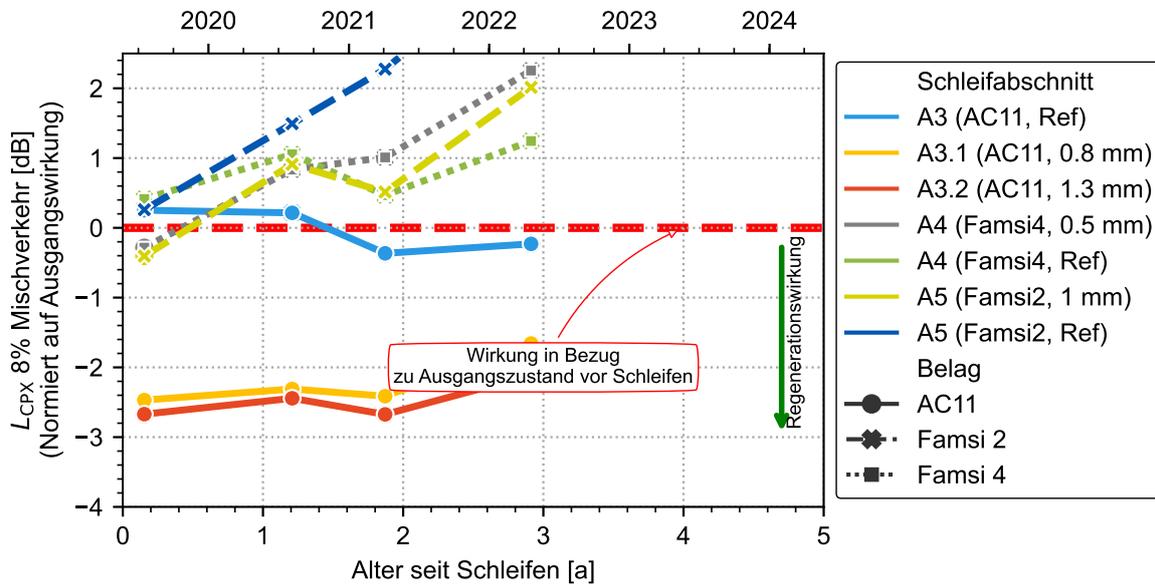


Abbildung E.4: Wirkung der Schleifmassnahme relativ zum Ausgangszustand ab Zeitpunkt der Massnahme in Farvagny

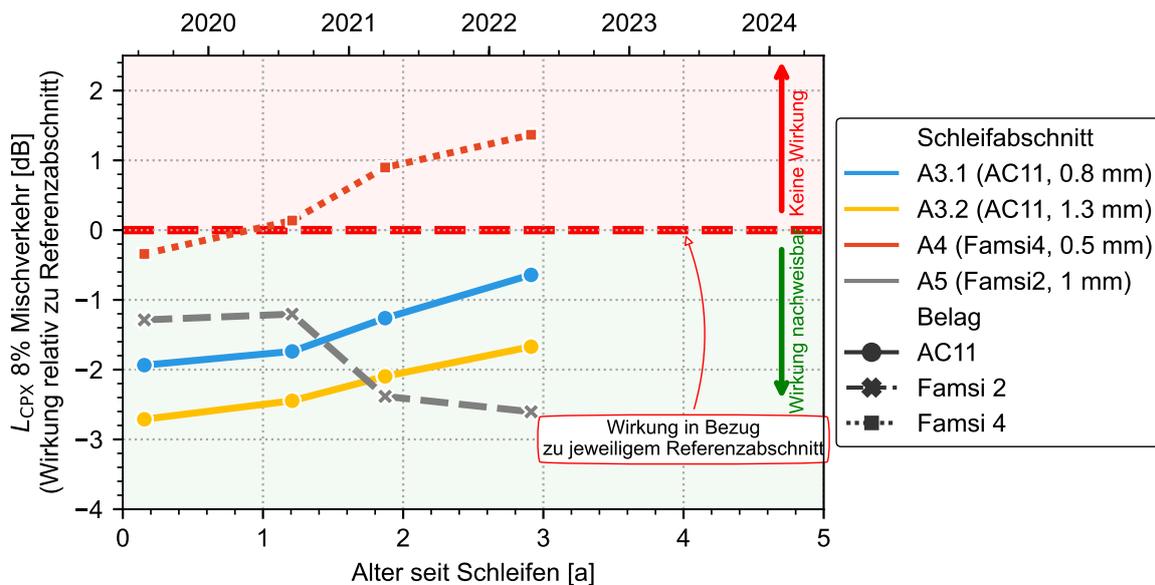


Abbildung E.5: Wirkung relativ zu Referenzabschnitt

## E.2.4 Spektralanalyse

Bei den Spektralanalysen wird jeweils die spektrale Veränderung der gemessenen CPX-Pegel im Zeitraum von der letzten Messung vor der Schleifmassnahme gezeigt. In den Abbildungen wird unterschieden zwischen den PKW und LKW Messreifen. Ebenfalls werden die Gesamtpegel im rechten Teil ebenfalls für PKW, LKW und den Mischverkehr (N2-Anteil von 8%) gezeigt.

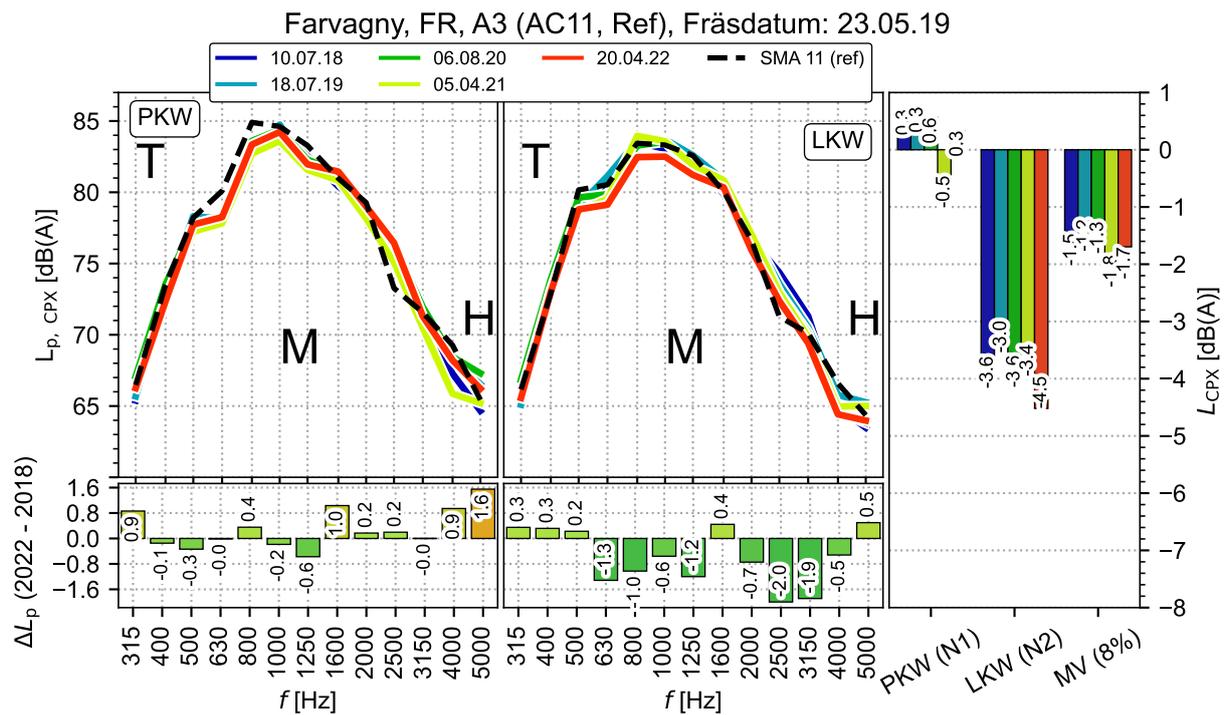


Abbildung E.6: Spektralanalyse in Farvagny, Abschnitt A3 Ref

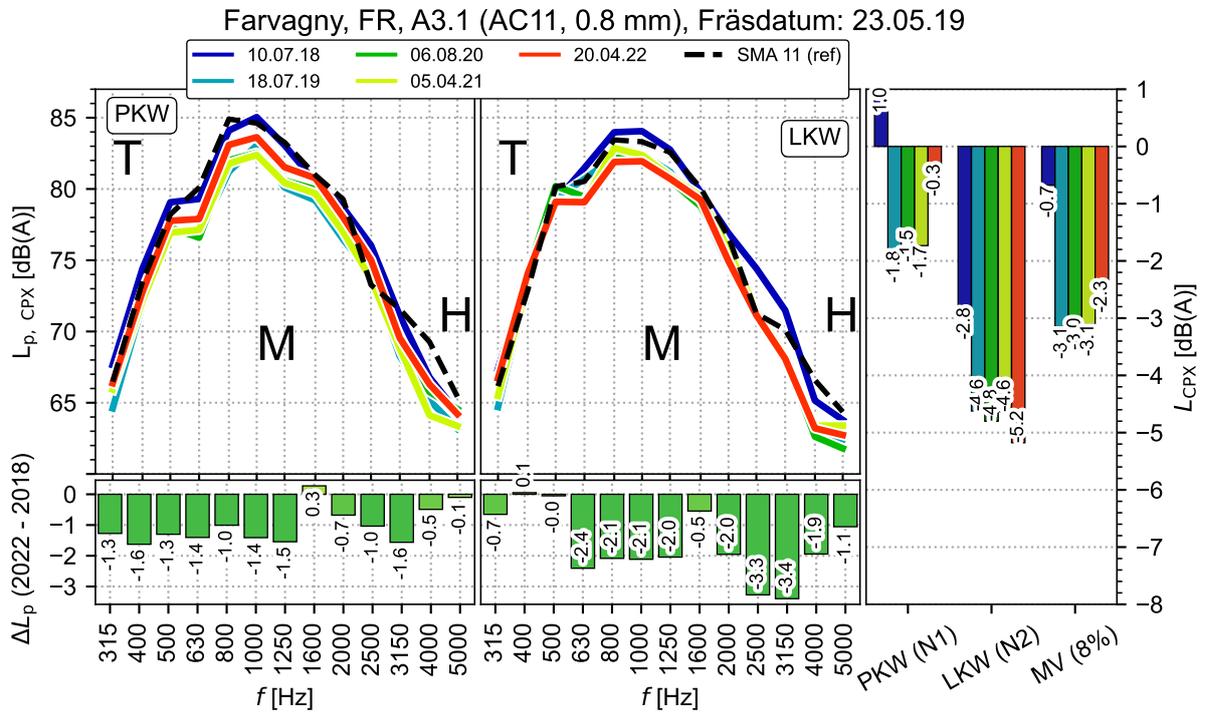


Abbildung E.7: Spektralanalyse in Farvagny, Abschnitt A3.1

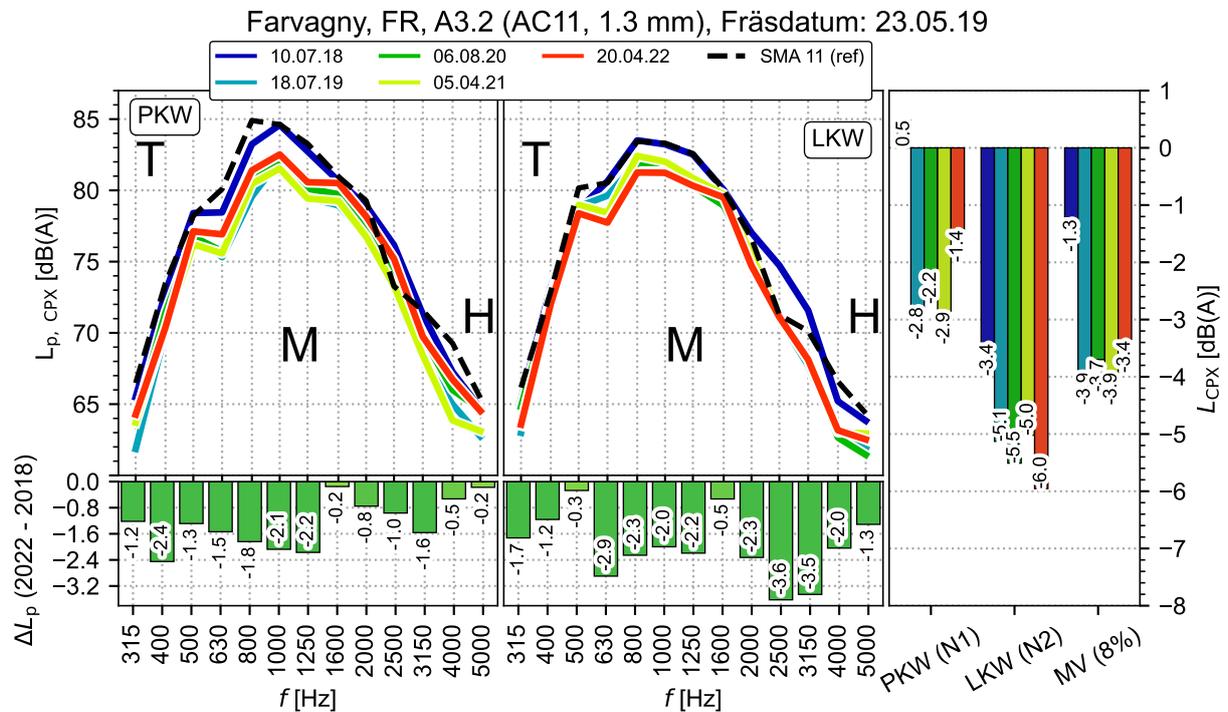


Abbildung E.8: Spektralanalyse in Farvagny, Abschnitt A3.2

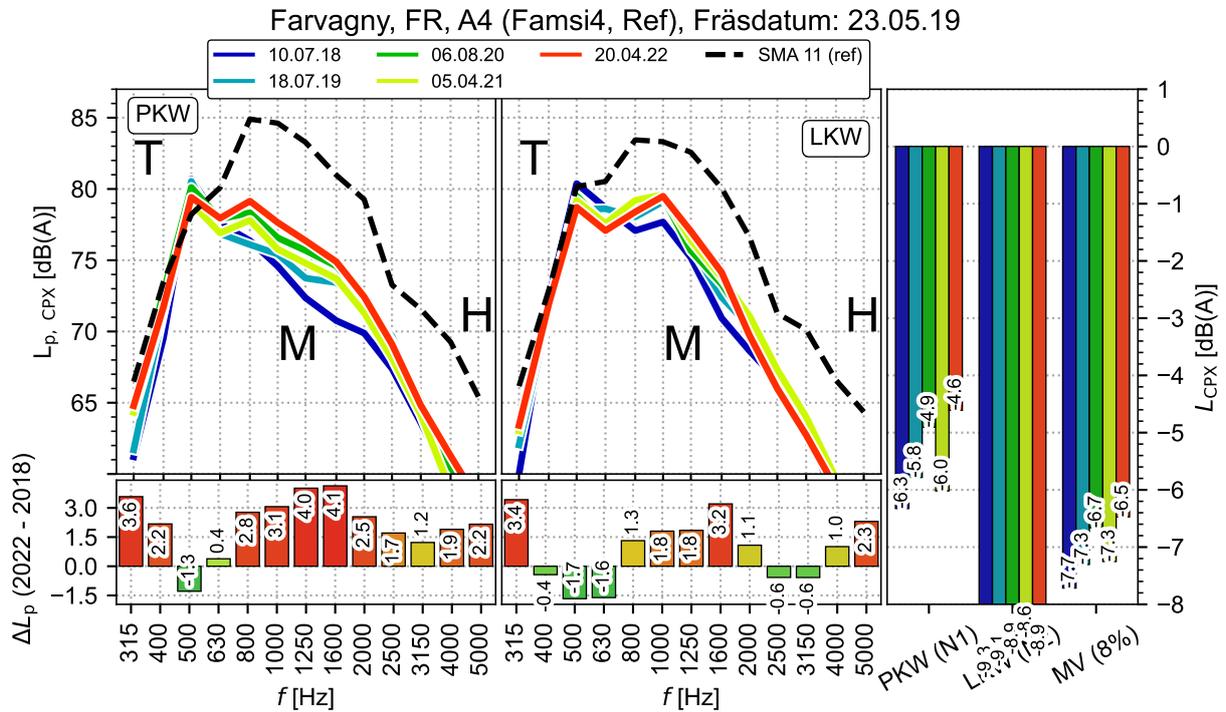


Abbildung E.9: Spektralanalyse in Farvagny, Abschnitt A4, Ref

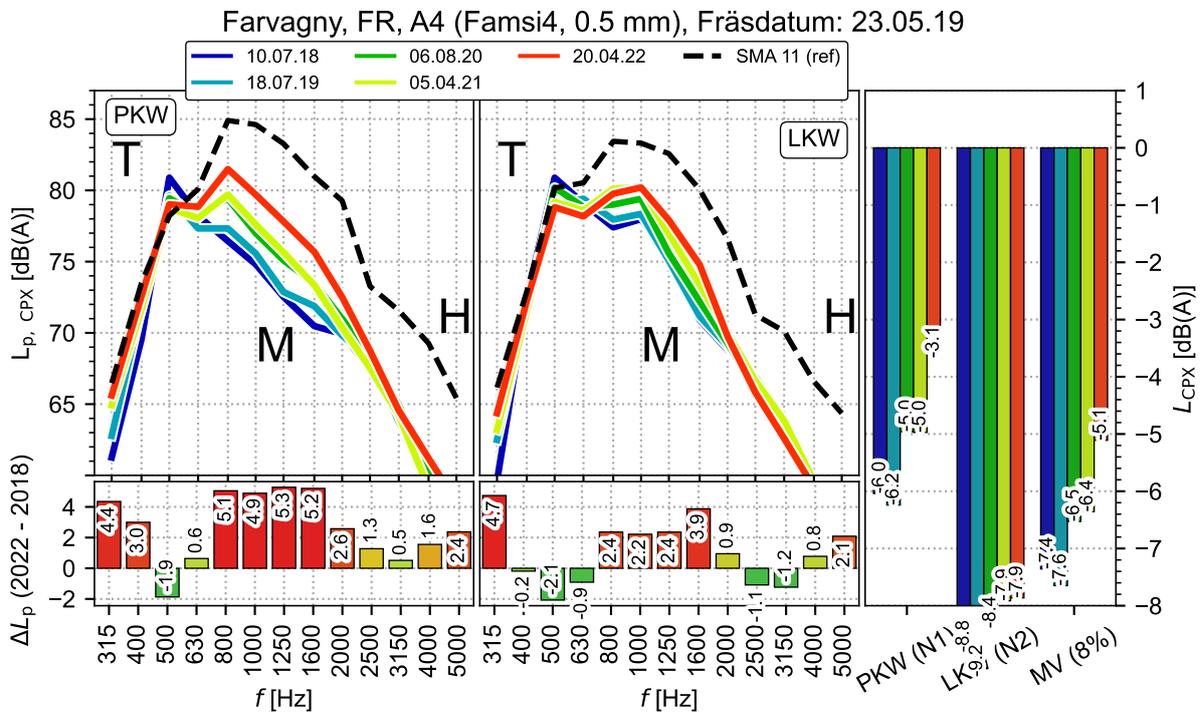


Abbildung E.10: Spektralanalyse in Farvagny, Abschnitt A4

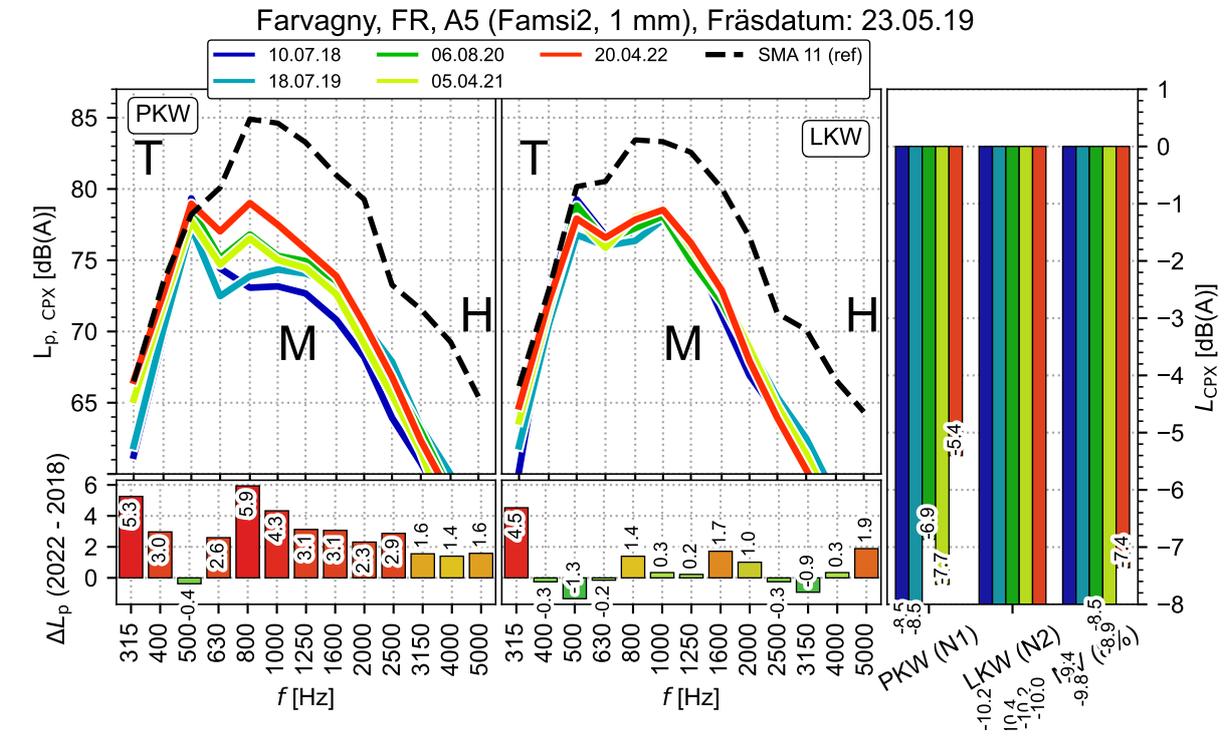


Abbildung E.11: Spektralanalyse in Farvagny, Abschnitt A5, Famsi2, 1 mm

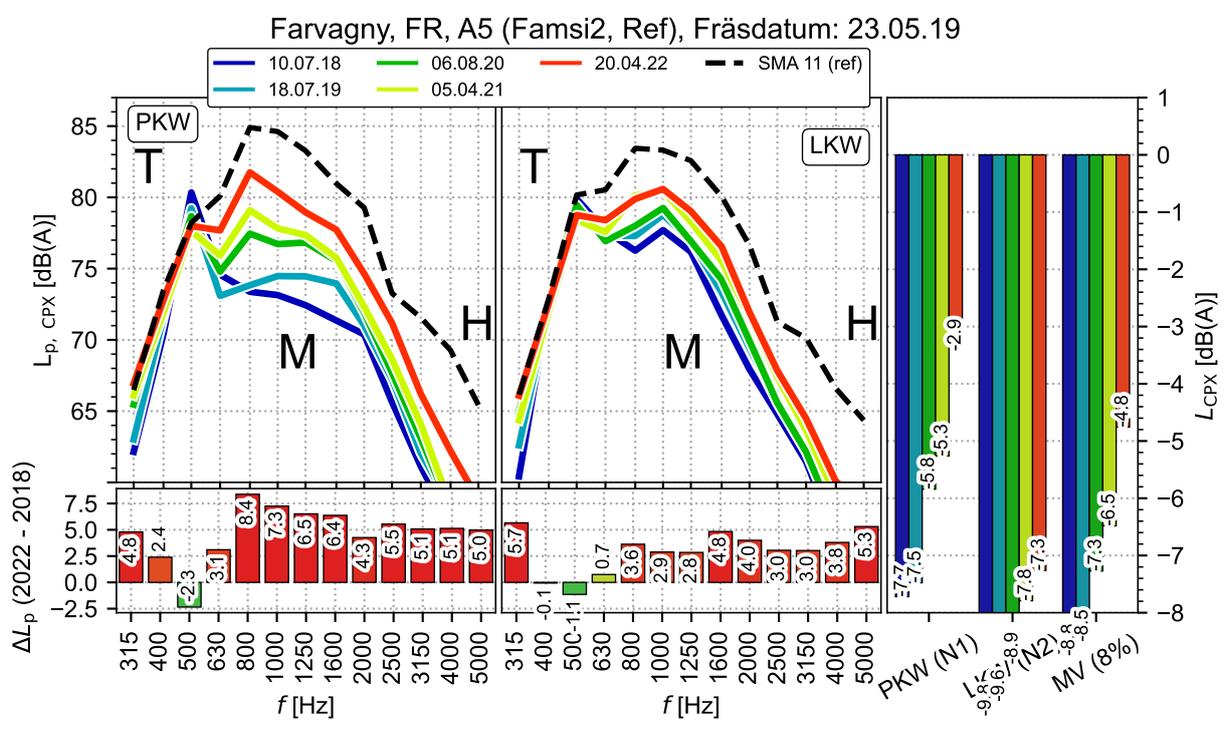


Abbildung E.12: Spektralanalyse in Farvagny, Abschnitt A5, Famsi2, REF

### E.3. AVCA

In Farvagny wurden 2 AVCA-Untersuchungen durchgeführt. Die Orte der Entnahmepunkte sind in der Karte E.1 ersichtlich. Im Rahmen des Projekts hat man sich beschränkt auf diese Beläge sich akustisch relativ unterschiedlich verhalten haben.

- Fa-13 (Abschnitt A4 Famsi 4, 0.5 mm Schleiftiefe)
- Fa-15 (Abschnitt A5, Famsi 2, 1 mm Schleiftiefe)

Die folgende Tabelle E.2 zeigt eine (kurz-) Zusammenfassung der Ergebnisse. Es zeigt sich, dass an beiden Standorten relativ weit oben eine prominente Verschmutzungsschicht vorhanden ist, welche aber interessanterweise sehr tief im Belag liegt. Im Falle des 2er Belags (Fa-15, Famsi 2, 1 mm) ist diese praktisch am unteren Ende zu finden. Dies stellt natürlich für die Akustik noch recht günstige Eigenschaften dar, was sich auch in den vorzüglichen akustischen Belagsgütwerte äussert (vgl. Tabelle E.2). Umgekehrt ist der Famsi4-Belag (zumindest in der AVCA-Analyse) relativ dünn. Dazu kommt, dass bereits ab einer Tiefe von ca. 10 - 14mm der Aufbau der relativ ausgeprägten Schmutzschicht beginnt. Diese führt dazu, dass der Belag minimal eine Porosität von 3.1% aufweist, was sich auch auf die akustischen Werte auswirkt.

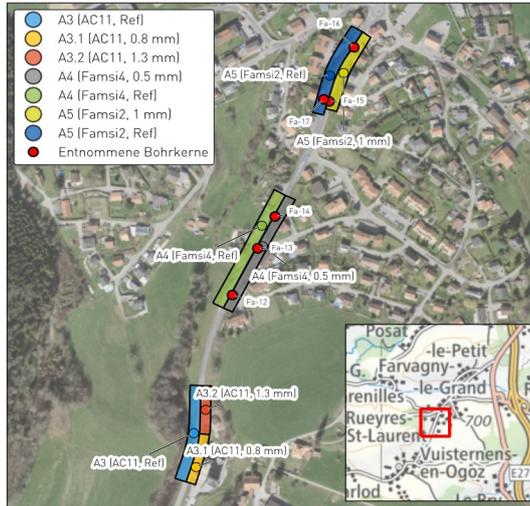
**Tabelle E.2:** Zusammenfassung AVCA für Zofingen

Messpunkt	AVCA-Bezeichnung	$L_{CPX}$		Min. (zugängliche) Porosität	
		2020	2022	2020	2022
A4 Famsi 4, 0.5 mm	Fa-13		-5.1	3.1%(14.2 mm)	
A5, Famsi 2, 1 mm	Fa-15		-7.4	6.6% (22.86 mm)	

Grolimund + Partner AG  
Bern, Aarau, Zürich, Deitingen, Neuchâtel  
www.grolimund-partner.ch

**Akustische Hohlraumanalyse (AVCA)**

**Fa-13**



**Strasse**

Farvagny,  
Richtung: Nord, Rechte Radspur

**Belagstyp**

Famsi 4, geschliffen 0.5 mm

**Entnahmepunkt**

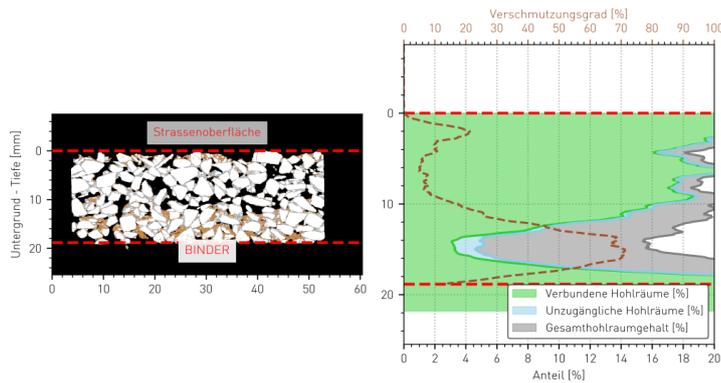
X = 2571264  
Y = 1174148  
Datum: Okt 22

**CT- Scan Analyse**

Schichtdicke: 19 mm  
Ø Hohlraumgehalt 14.5%

**Analyse zugänglicher Hohlräume**

	# zugänglicher Poren	zugänglicher HR-Gehalt [%]	Verschmutzungsgrad [%]	Gesamthohlraumgehalt [%]
Unterhalb Oberflächenporen	248	17.3%	10%	19%
10 mm unter Fahrbahn	241	16.2%	18%	20%
20 mm unter Fahrbahn	0	99.6%	0%	0%
30 mm unter Fahrbahn	0	0.0%	0%	0%

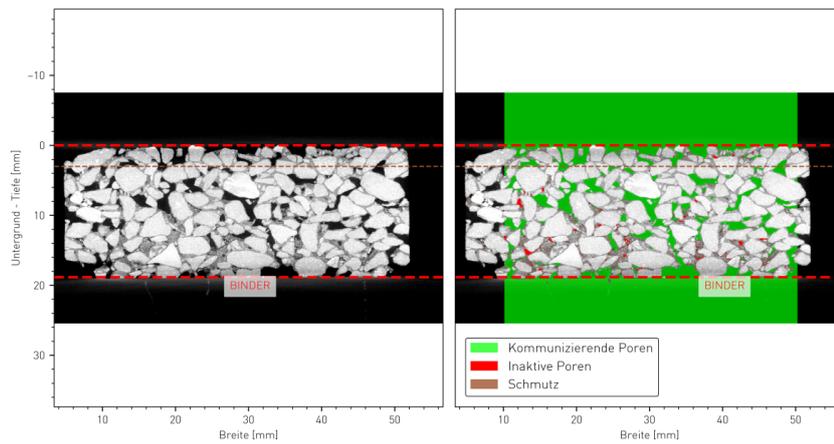


Grolimund + Partner AG  
Bern, Aarau, Zürich, Deitingen, Neuchâtel  
www.grolimund-partner.ch

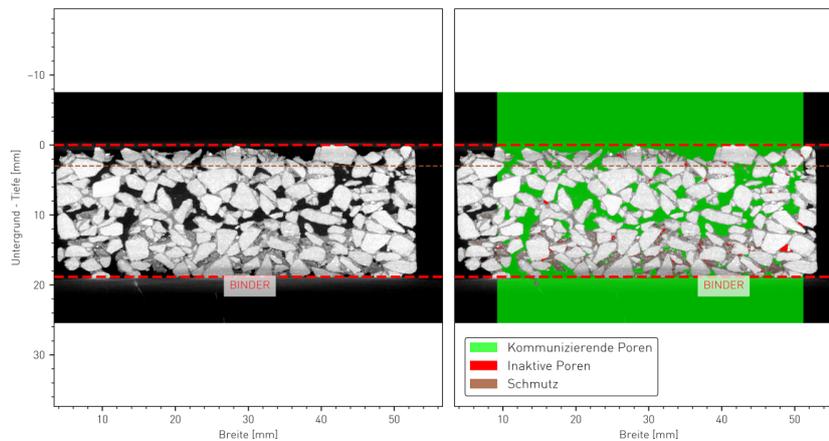
++ **G+P**  
INGENIEURE

**Querschnittsbilder:**

Schnitt-Nr: 800 (24 mm)



Schnitt-Nr: 1000 (30 mm)



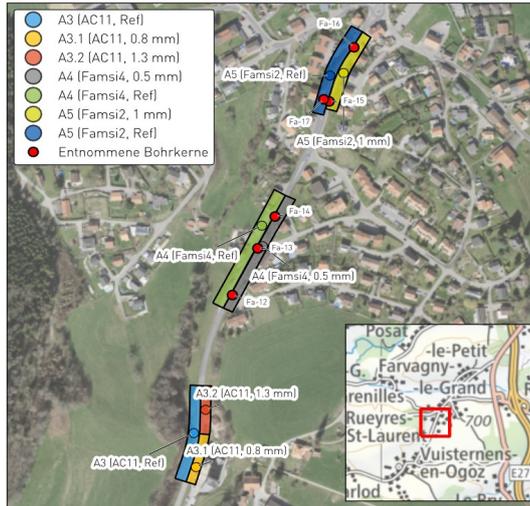
**Kommentare:**

- Gesamthohlraumgehalt am Bohrkern beträgt 14.5%
- Keine verbundenen Poren bis zur Deckschicht
  - 1 cm unterhalb der Fahrbahn sind mit 16.2 % zugänglicher Poren eine gut verbundene Schicht mit der Oberfläche vorhanden; Der Luftaustausch mit den tieferen Schichten kann

Grolimund + Partner AG  
Bern, Aarau, Zürich, Deitingen, Neuchâtel  
www.grolimund-partner.ch

**Akustische Hohlraumanalyse (AVCA)**

**Fa-15**



**Strasse**

Farvagny,  
Richtung:Nord, Rechte Radspur

**Belagstyp**

Famsi2, geschliffen 1 mm

**Entnahmepunkt**

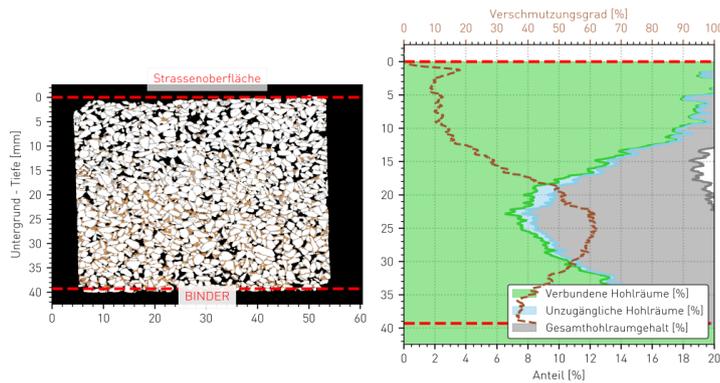
X = 2571355  
Y = 1174346  
Datum: Okt 22

**CT- Scan Analyse**

Schichtdicke: 39 mm  
Ø Hohlraumgehalt 13.8%

**Analyse zugänglicher Hohlräume**

	# zugänglicher Poren	zugänglicher HR-Gehalt [%]	Verschmutzungsgrad [%]	Gesamthohlraumgehalt [%]
Unterhalb Oberflächenporen	594	19.8%	9%	22%
10 mm unter Fahrbahn	616	17.6%	14%	21%
20 mm unter Fahrbahn	841	7.7%	53%	20%
30 mm unter Fahrbahn	1098	10.6%	54%	25%

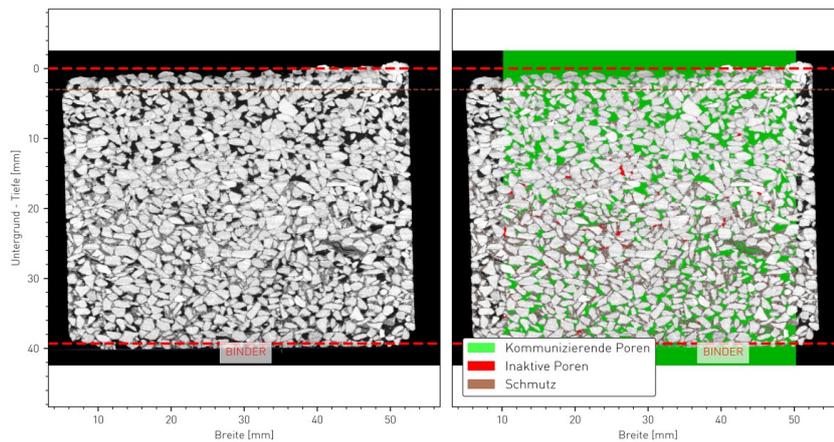


Grolimund + Partner AG  
Bern, Aarau, Zürich, Deitingen, Neuchâtel  
www.grolimund-partner.ch

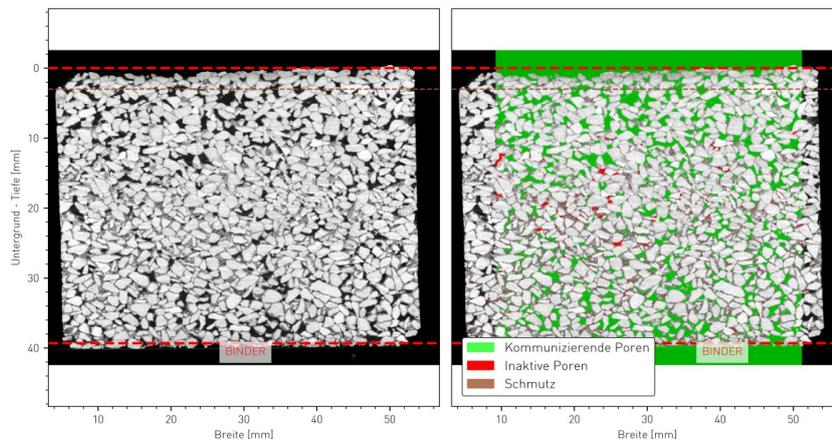
++ **G+P**  
INGENIEURE

Querschnittsbilder:

Schnitt-Nr: 800 (24 mm)



Schnitt-Nr: 1000 (30 mm)



**Kommentare:**

- Gesamthohlraumgehalt am Bohrkern beträgt 13.8%
- Es sind über den gesamten Bohrkern kommunizierende Poren vorhanden
  - 1 cm unterhalb der Fahrbahn sind mit 17.6 % zugänglicher Poren eine gut verbundene Schicht mit der Oberfläche vorhanden; Der Luftaustausch mit den tieferen Schichten kann



## F. La Verrerie

**Tabelle F.1:** Abschnitte in La Verrerie

Belag	Abschnitt	Fräsdatum	Fahrbahn	Länge	Abtrag	Bezeichnung in Plots
Famsi 4 (2012)	A1	22.05.2019	Rg Nord+Süd	2 x 950 m	0.4-1.7 mm (1x WZg)	A1 (Famsi 4, ca. 1mm)
	Ref (A2)		Rg Nord+Süd	2 x 100 m	ungeschliffen	Ref (Famsi 4)

### F.1. Übersichtskarte

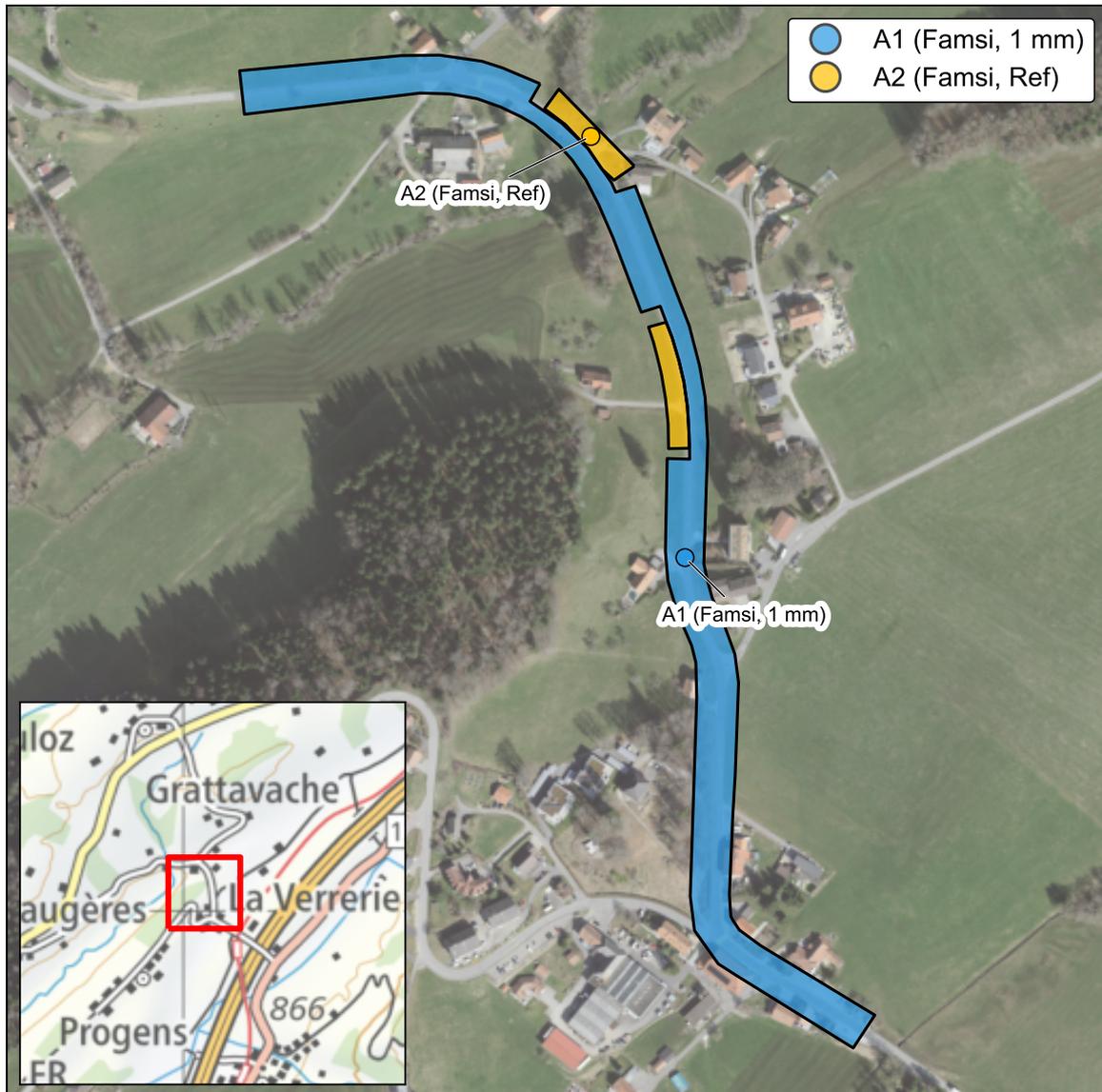
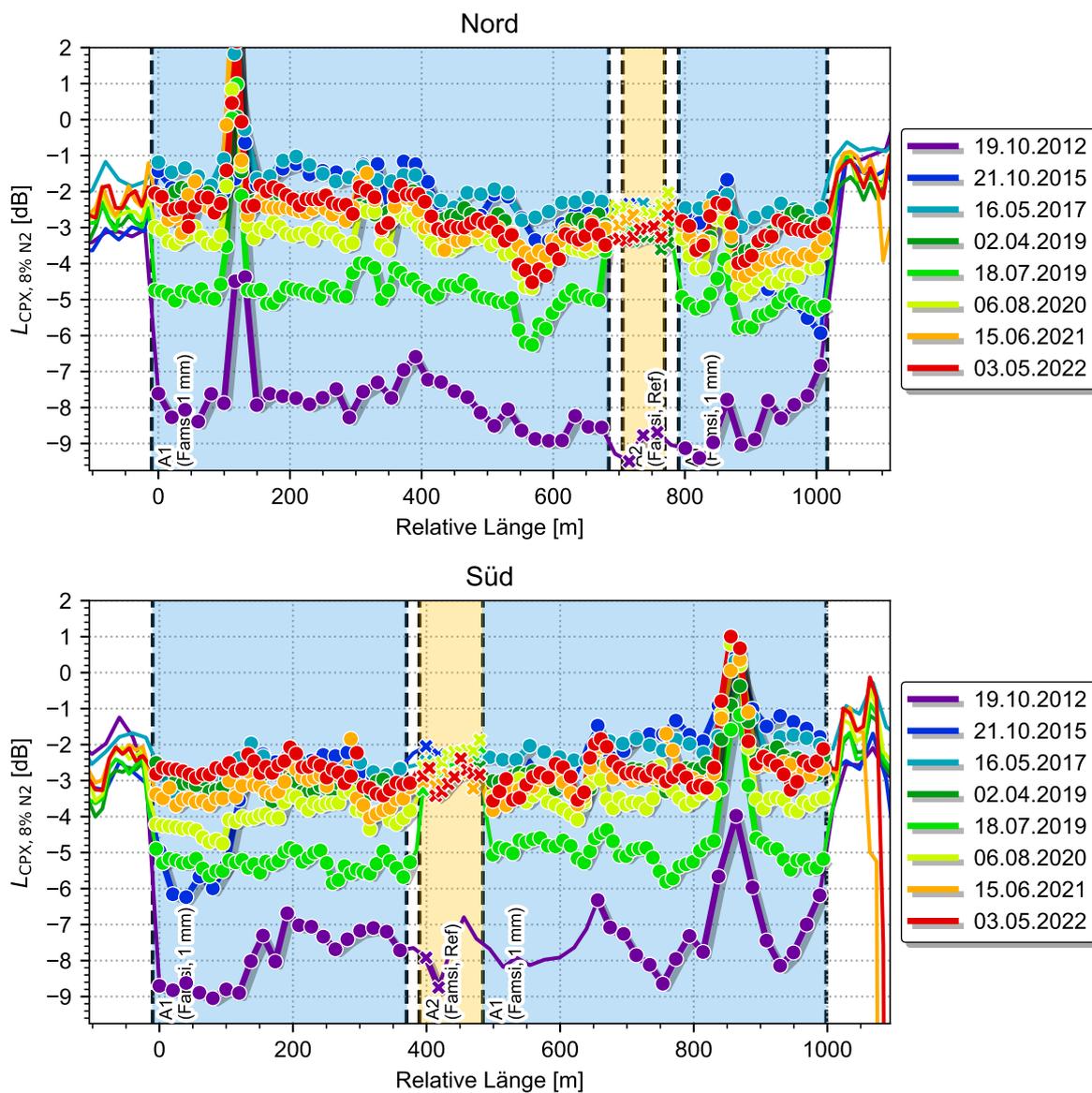


Abbildung F.1: Übersichtskarte La Verrerie, FR mit Lage der Abschnitte

## F.2. Akustische Resultate

### F.2.1 CPX-Streckenverlauf



**Abbildung F.2:** Streckenverlauf der CPX-Messungen in Streckenverlauf La Verrerie (Schleifdatum: 22.05.2019)

### F.2.2 CPX- Zeitverlauf

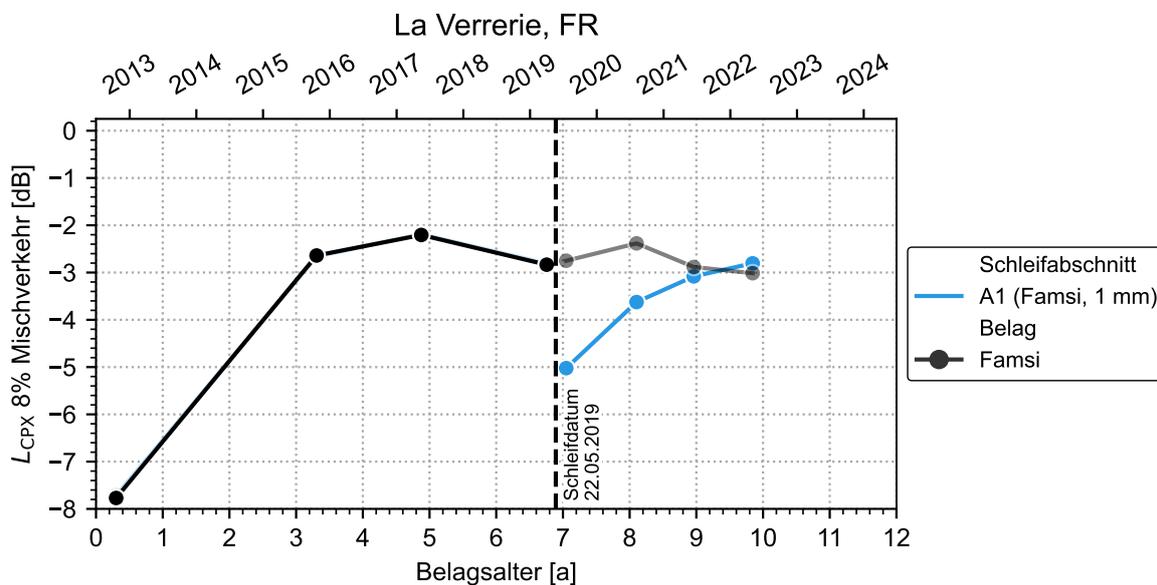


Abbildung F.3: Wirkung der Schleifmassnahmen La Verrerie

### F.2.3 Akustische Regeneration

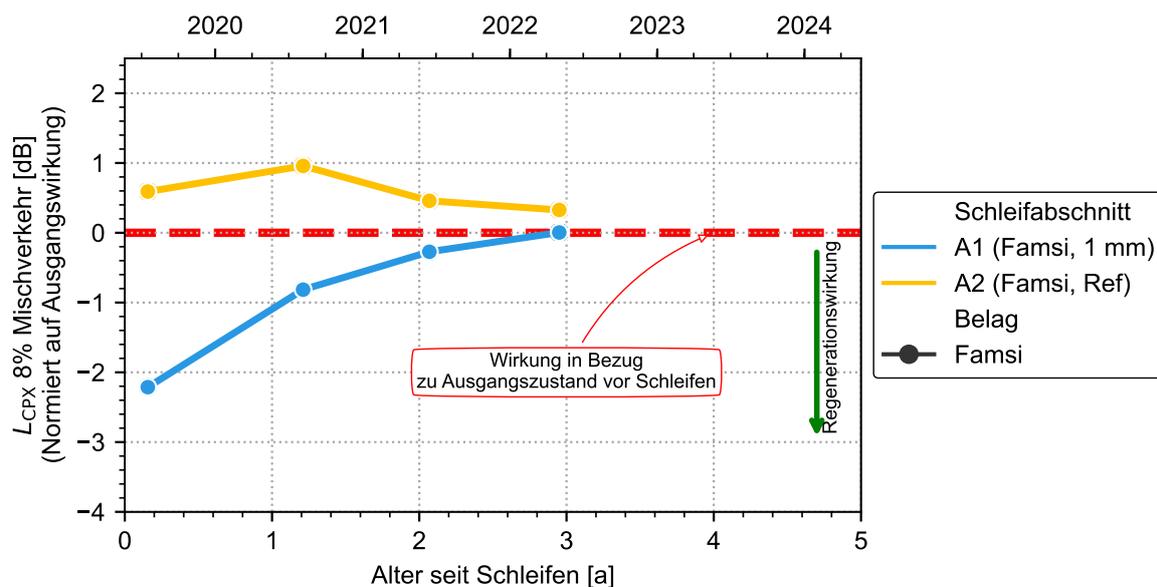


Abbildung F.4: Streckenverlauf La Verrerie

## F.2.4 Akustische Wirkung

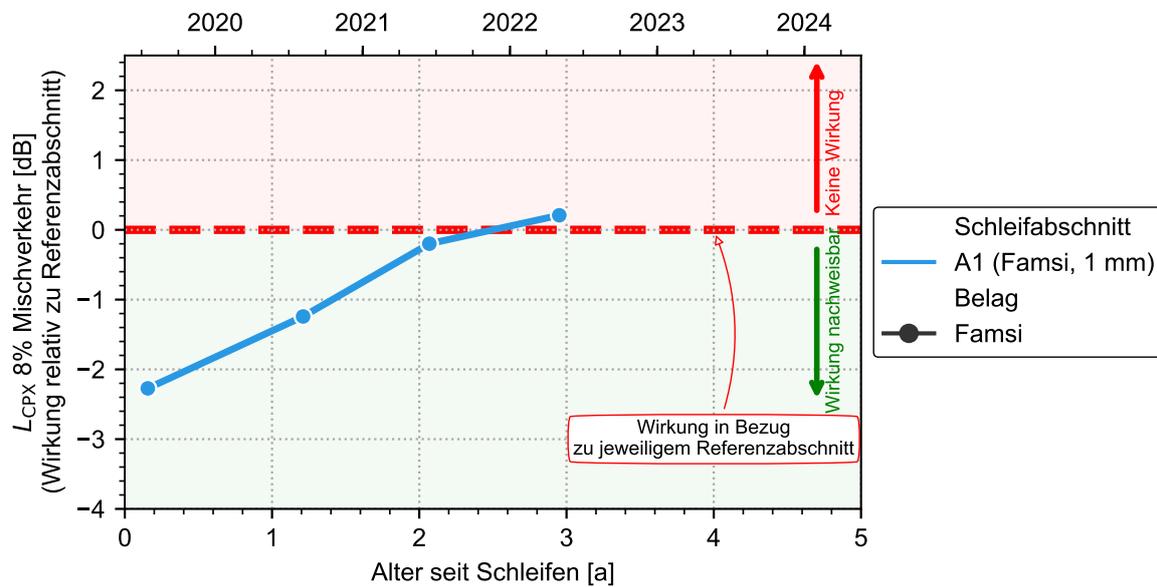


Abbildung F.5: Wirkung relativ zu Referenzabschnitt

## F.2.5 Spektralanalyse

Bei den Spektralanalysen wird jeweils die spektrale Veränderung der gemessenen CPX-Pegel im Zeitraum von der letzten Messung vor der Schleifmassnahme gezeigt. In den Abbildungen wird unterschieden zwischen den PKW und LKW Messreifen. Ebenfalls werden die Gesamtpegel im rechten Teil ebenfalls für PKW, LKW und den Mischverkehr (N2-Anteil von 8%) gezeigt.

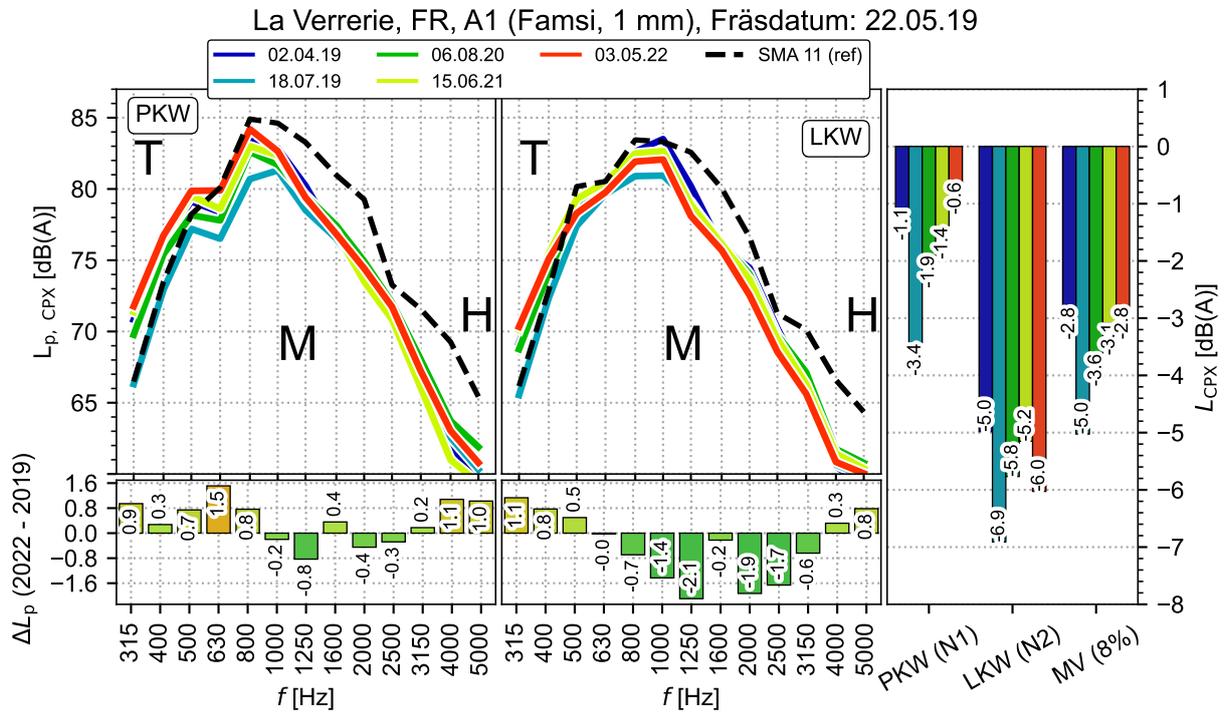


Abbildung F.6: Spektralanalyse in La Verrerie, Abschnitt A1, Famsi 1mm

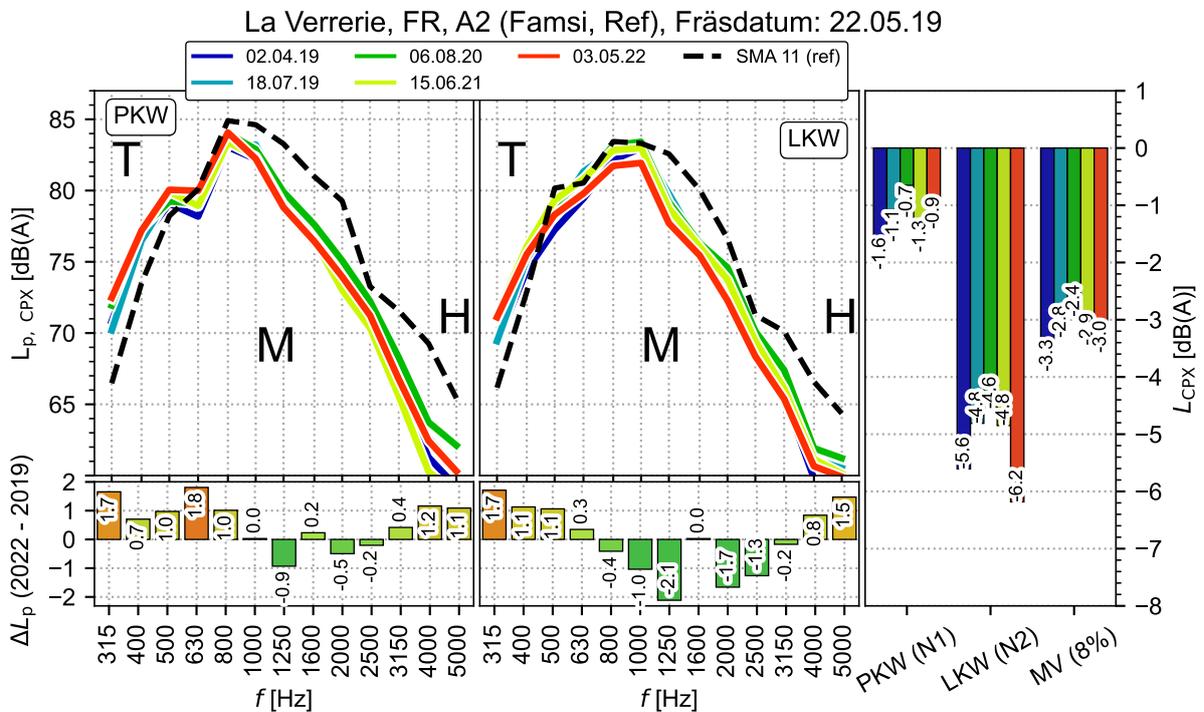


Abbildung F.7: Spektralanalyse in La Verrerie, Abschnitt A2, Famsi Ref.

## G. Landerswil, BE

### G.1. Übersichtskarte

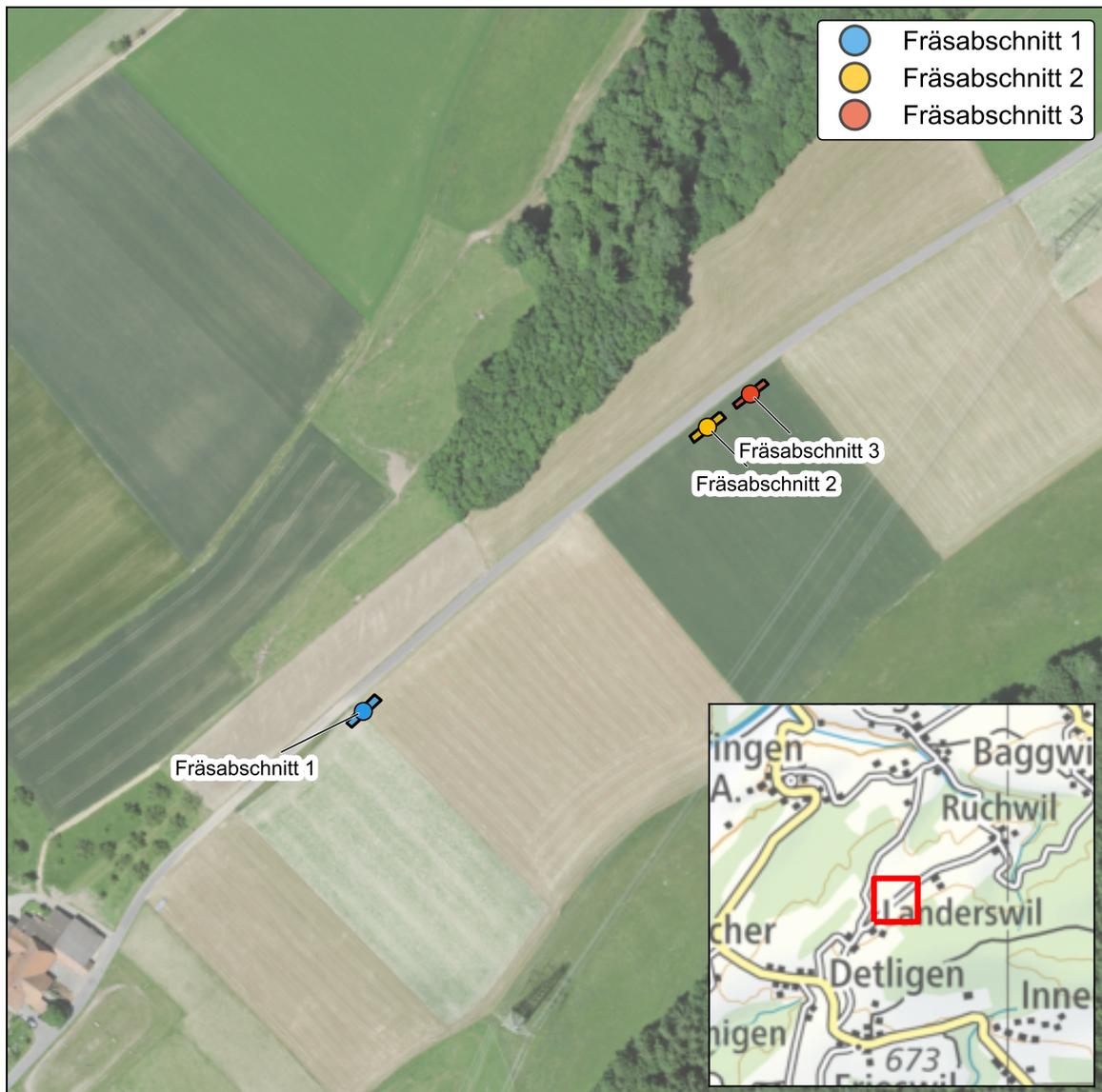


Abbildung G.1: Übersichtskarte Landerswil, BE mit Lage der Abschnitte

## G.2. Akustische Resultate

### G.2.1 CPX-Streckenverlauf

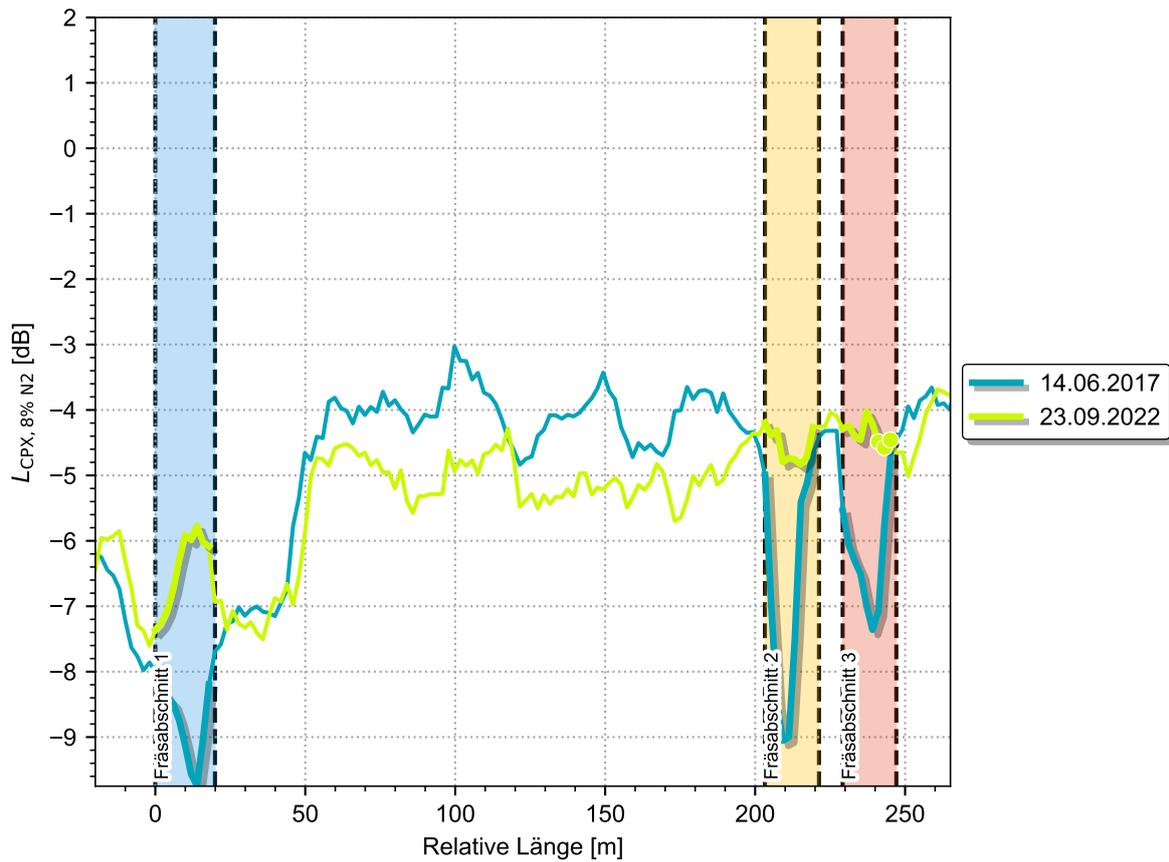


Abbildung G.2: Streckenverlauf der CPX-Messungen in Streckenverlauf Laanderswil.

## G.2.2 CPX- Zeitverlauf

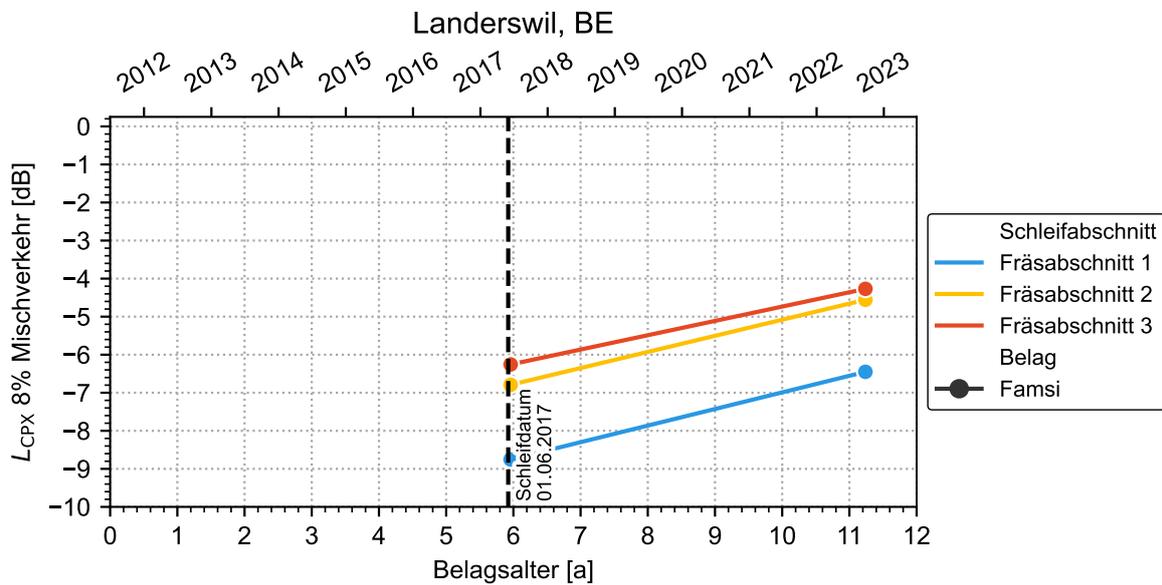


Abbildung G.3: Wirkung der Schleifmassnahme Landerswil, BE

## G.2.3 Akustische Regeneration

## G.2.4 Spektralanalyse

Bei den Spektralanalysen wird jeweils die spektrale Veränderung der gemessenen CPX-Pegel im Zeitraum von der letzten Messung vor der Schleifmassnahme gezeigt. In den Abbildungen wird unterschieden zwischen den PKW und LKW Messreifen. Ebenfalls werden die Gesamtpegel im rechten Teil ebenfalls für PKW, LKW und den Mischverkehr (N2-Anteil von 8%) gezeigt.

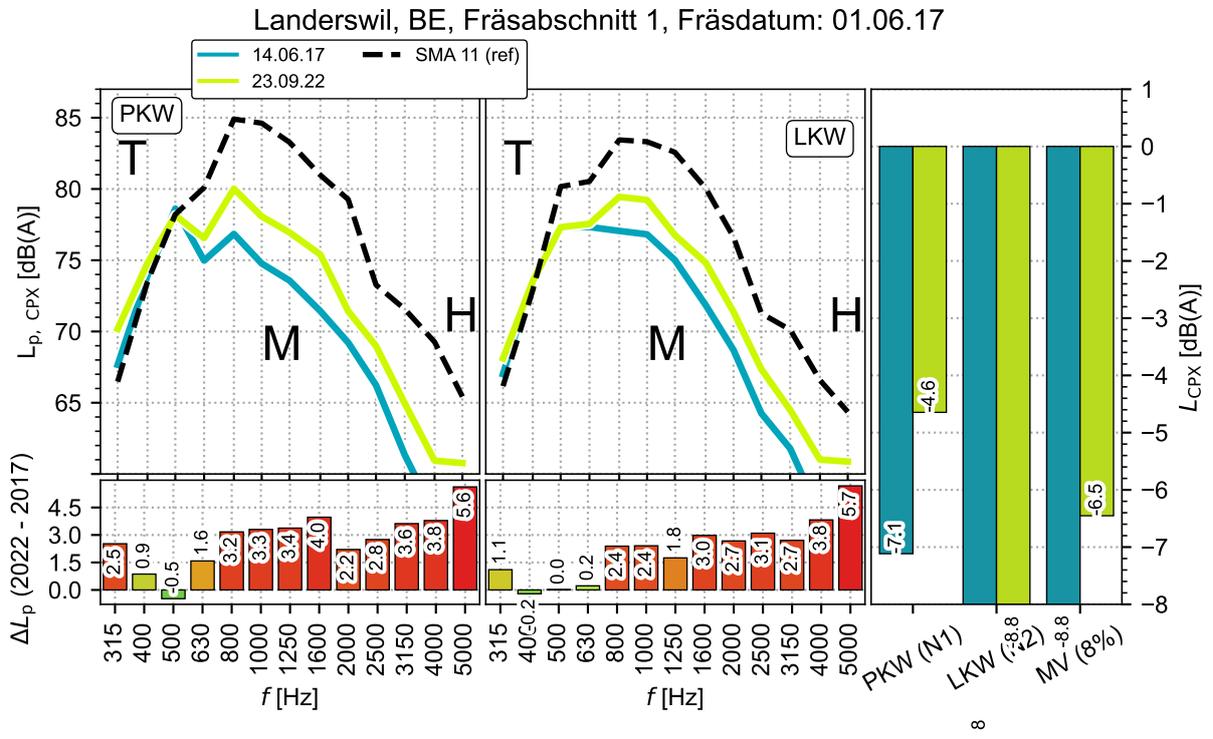


Abbildung G.4: Spektralanalyse in Landerswil, Fräsabschnitt 1

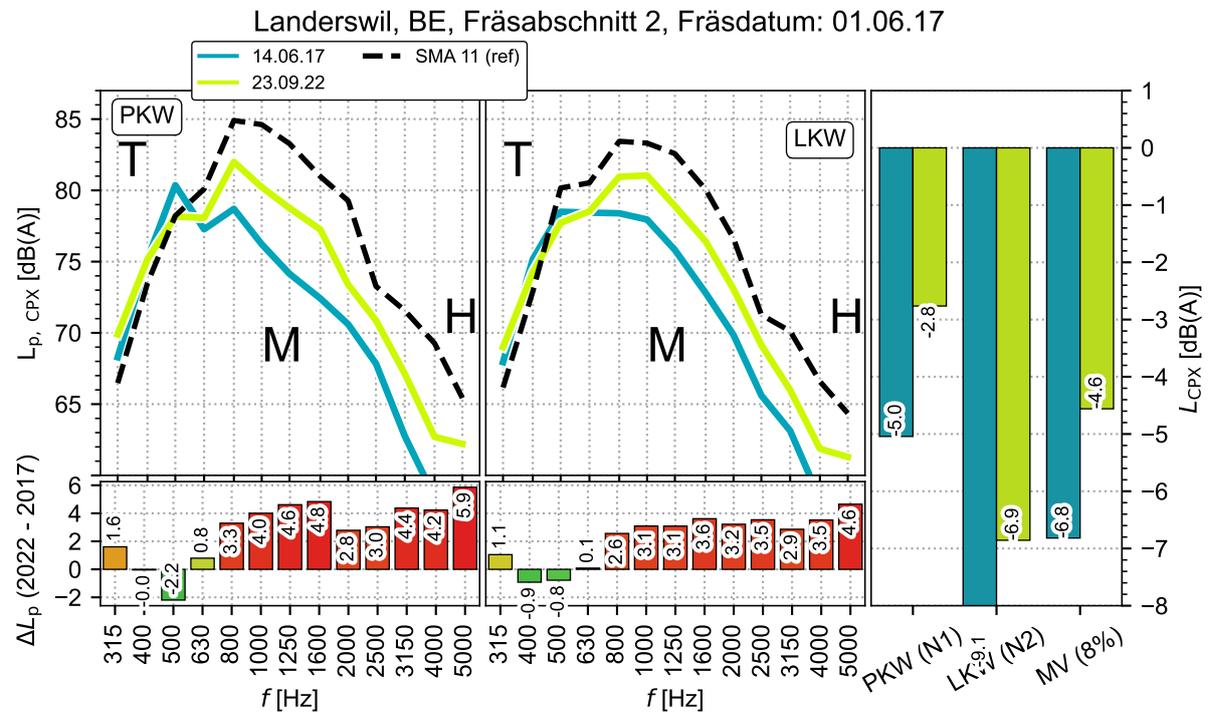


Abbildung G.5: Spektralanalyse in Landerswil, Fräsabschnitt 2

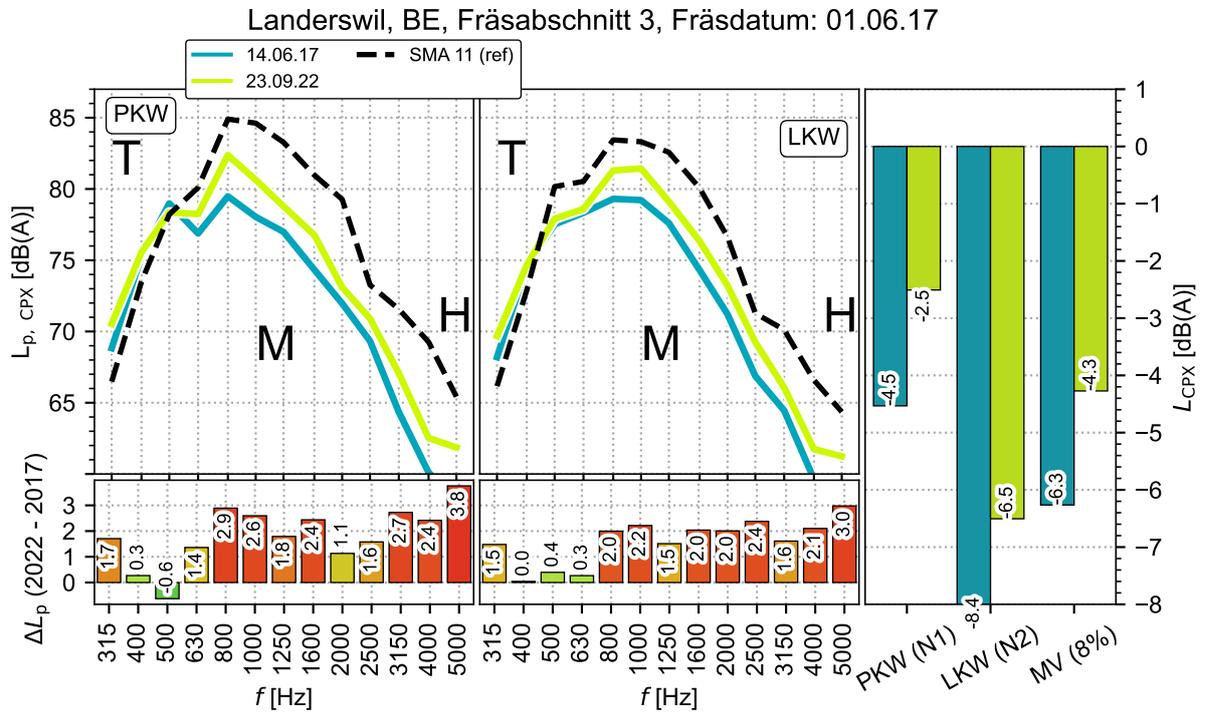


Abbildung G.6: Spektralanalyse in Landerswil, Fräsabschnitt 3

## H. Muri b. Bern

In Muri b. Bern wurde im Jahr 2019 der 2011 eingebaute SDA4-16 Belag abgeschliffen. Dabei wurden 4 verschiedene Schleiftiefen mit 3 verschiedenen Verfahren angewandt (Vgl. Tabelle H.1). In Muri ist allerdings der alte Belag kurz nach der Schleifmassnahme teilweise erneuert worden. Somit konnte der Abschnitt A1.2, A2.1, A2.2 und A5 nur bis ins Jahr 2020 beobachtet und vermessen werden.

**Tabelle H.1:** Abschnitte in Muri

Belag	Abschnitt	Fräsdatum	Fahrbahn	Länge	Abtrag	Bezeichnung in Plots	
SDA 4-16 (2011)	A1.1	24.09.2019	Rg NW	75 m	4.2 mm (1x WZg)	A1.1 (SDA 4-16, 4.2 mm)	
	A1.2	24.09.2019	Rg NW	75 m	4.2 mm (1x WZg)	A1.2 (SDA 4-16, 4.2 mm)	
	A2.1	24.09.2019	Rg NW	50 m	10.4 mm (VV, 2x WZg)	A2.1 (SDA 4-16, 10.4 mm)	
	A2.2	24.09.2019	Rg NW	50 m	8.9 mm (2x WZg)	A2.2 (SDA 4-16, 8.9 mm)	
	Referenz 1			Rg Südost	75 m	ungeschliffen	Ref1 (SDA 4-16)
	Referenz 2			Rg Südost	175 m	ungeschliffen	Ref2 (SDA 4-16)

## H.1. Übersichtskarte

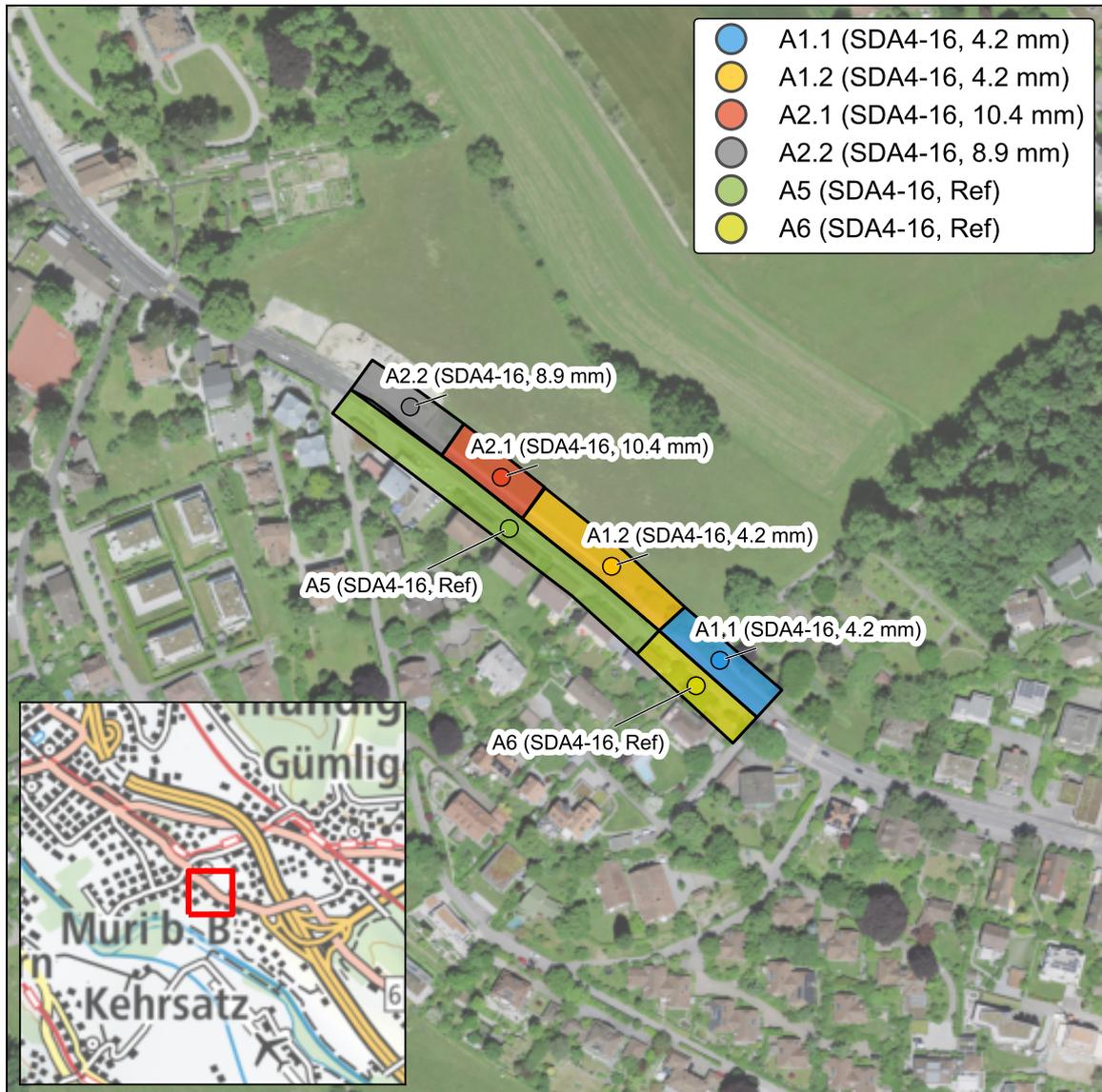
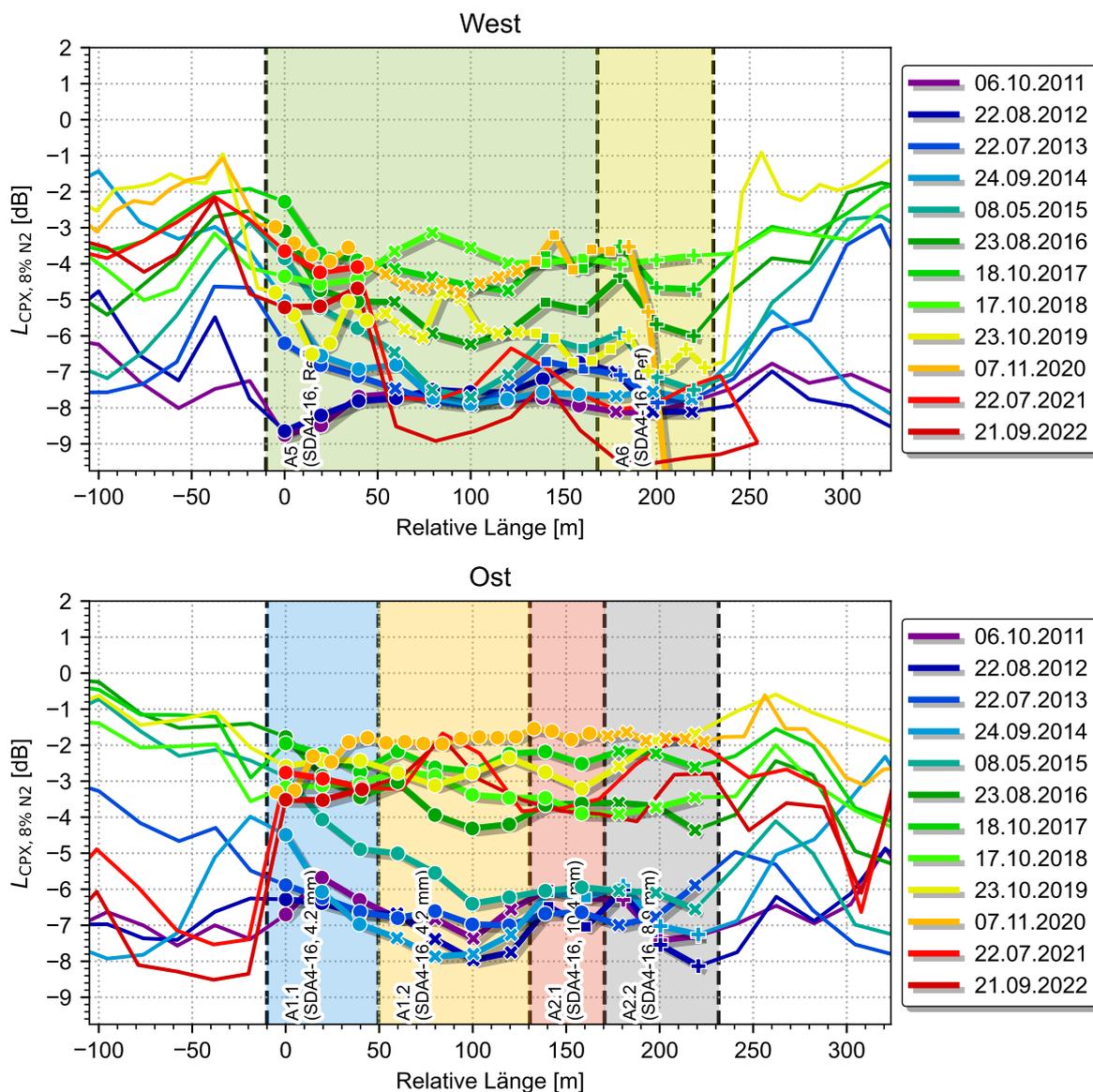


Abbildung H.1: Übersichtskarte Muri b. Bern mit Lage der Abschnitte

## H.2. Akustische Resultate

### H.2.1 CPX-Streckenverlauf



**Abbildung H.2:** Streckenverlauf der akustischen Belagsgüte (Mischverkehr mit 8% N2-Anteil) in Muri b. B. Dieser Abschnitt wurde am 24.09.2019 geschliffen. Zu beachten ist, dass ein Teil der Strecke im Frühjahr 2021 erneuert wurde. Dies ist insbesondere in der Fahrtrichtung West ersichtlich.

## H.2.2 Akustische Regeneration

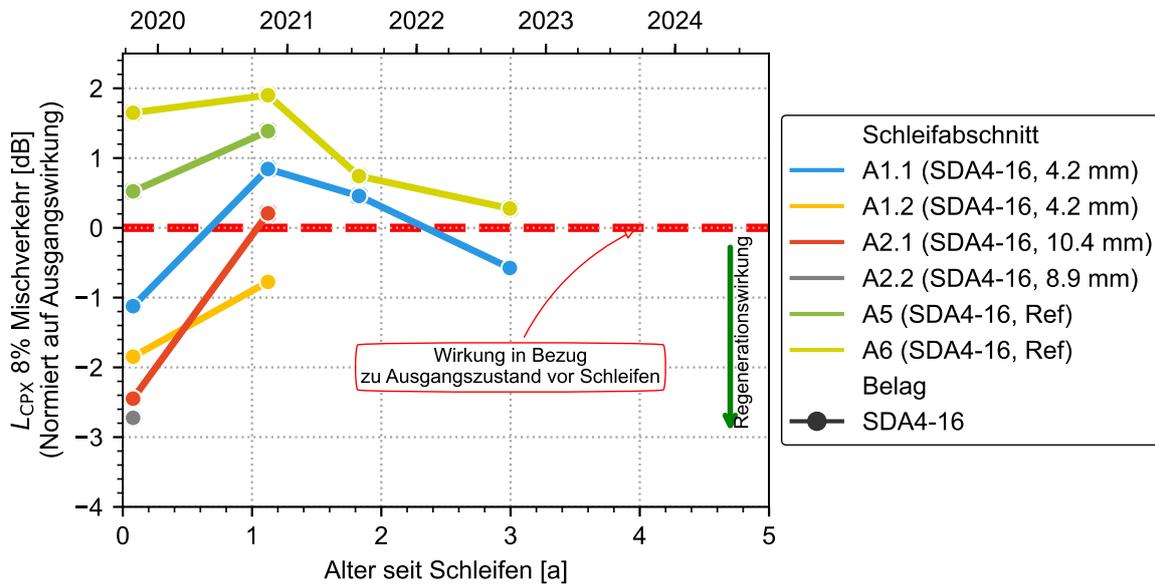


Abbildung H.3: Wirkung relativ zu Ausgangswirkung (Regenerationswirkung) in Muri b. Bern.

## H.2.3 Akustische Wirkung

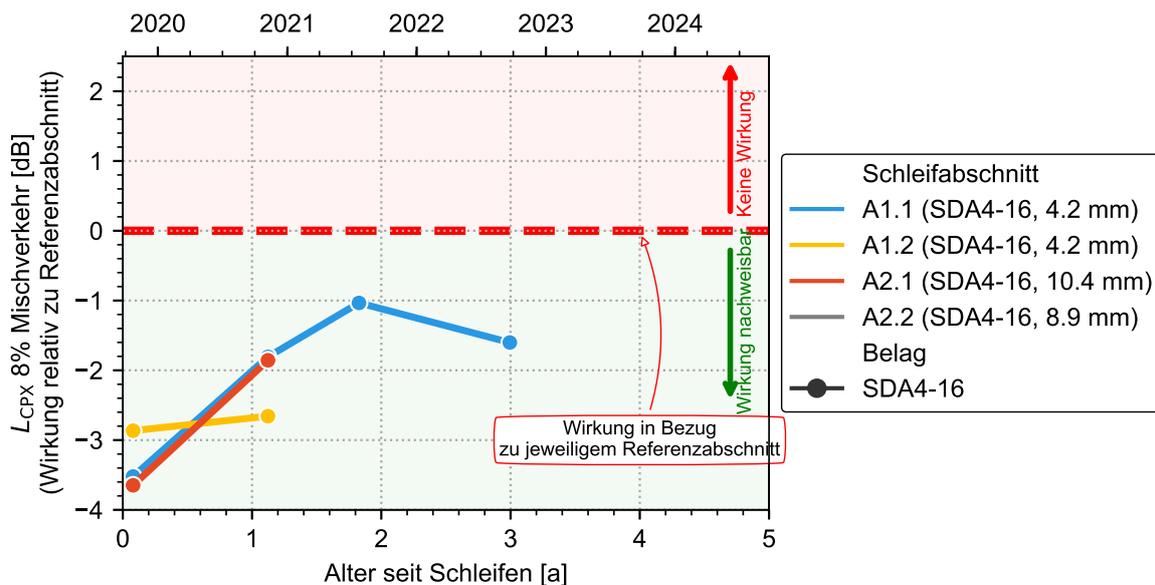


Abbildung H.4: Wirkung relativ zu Referenzabschnitt

## H.2.4 Spektralanalyse

Bei den Spektralanalysen wird jeweils die spektrale Veränderung der gemessenen CPX-Pegel im Zeitraum von der letzten Messung vor der Schleifmassnahme gezeigt. In den Abbildungen wird unterschieden zwischen den PKW und LKW Messreifen. Ebenfalls werden die Gesamtpegel im rechten Teil ebenfalls für PKW, LKW und den Mischverkehr (N2-Anteil von 8%) gezeigt.

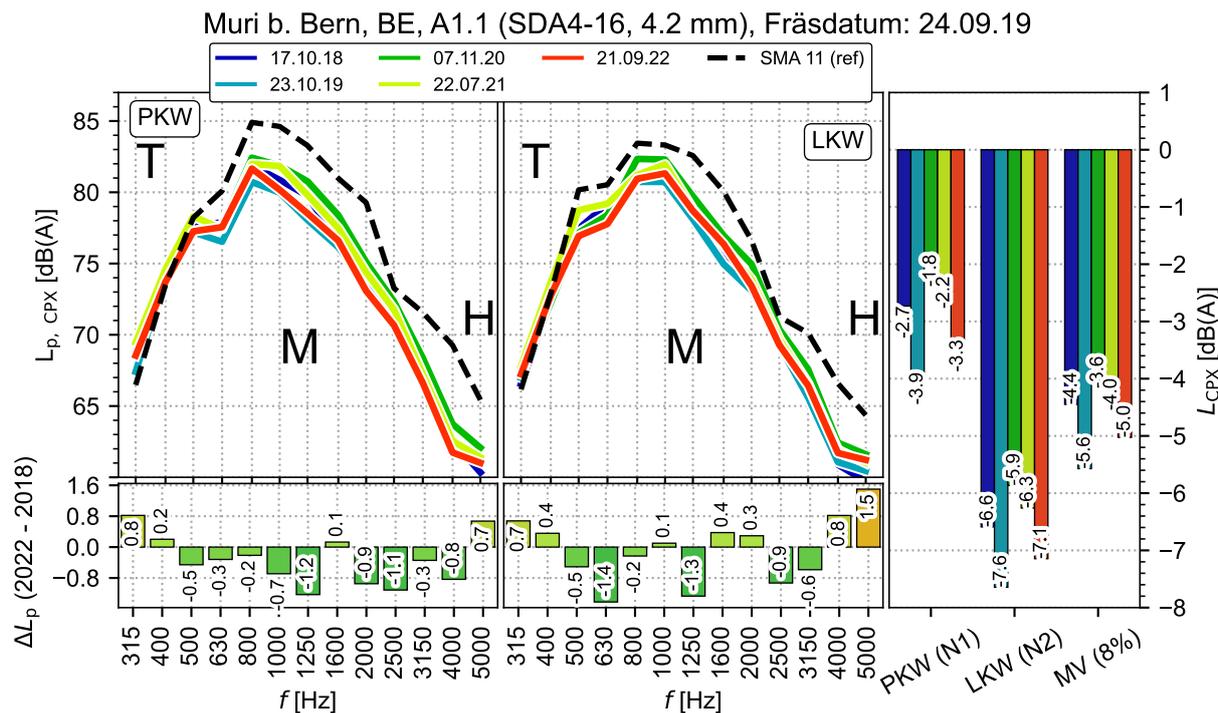


Abbildung H.5: Spektralanalyse in Muri, Fräsabschnitt A1

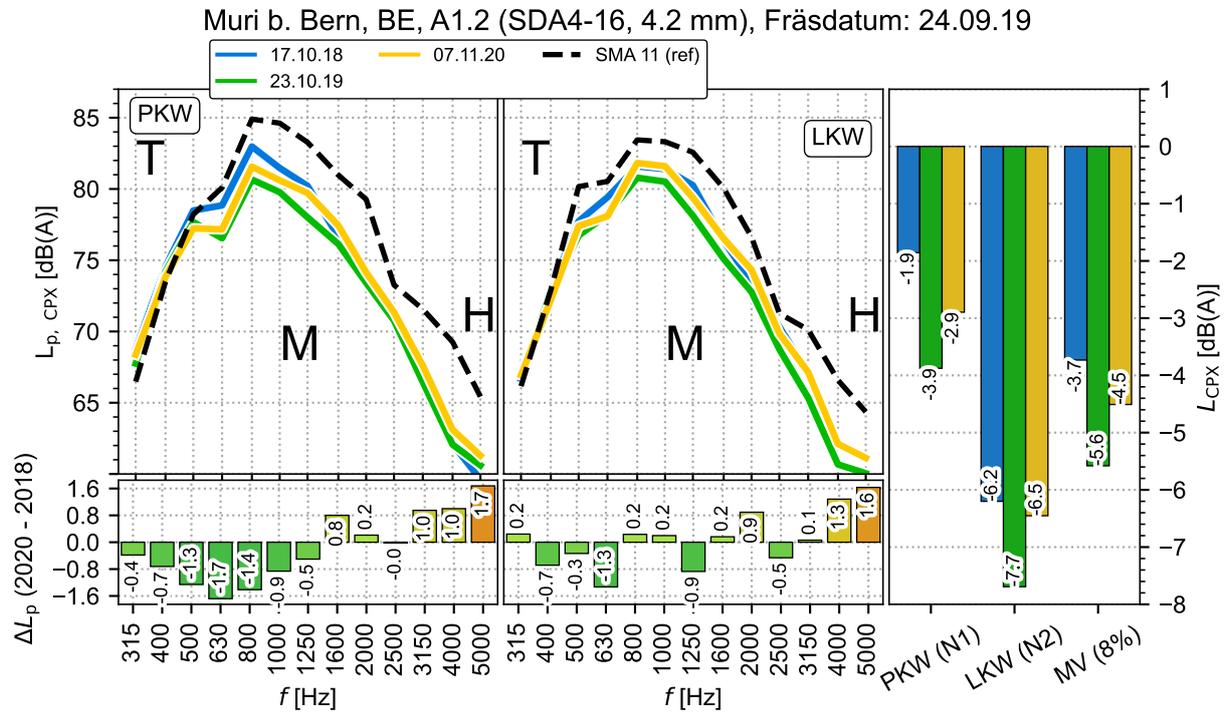


Abbildung H.6: Spektralanalyse in Muri, Fräsabschnitt A1.2

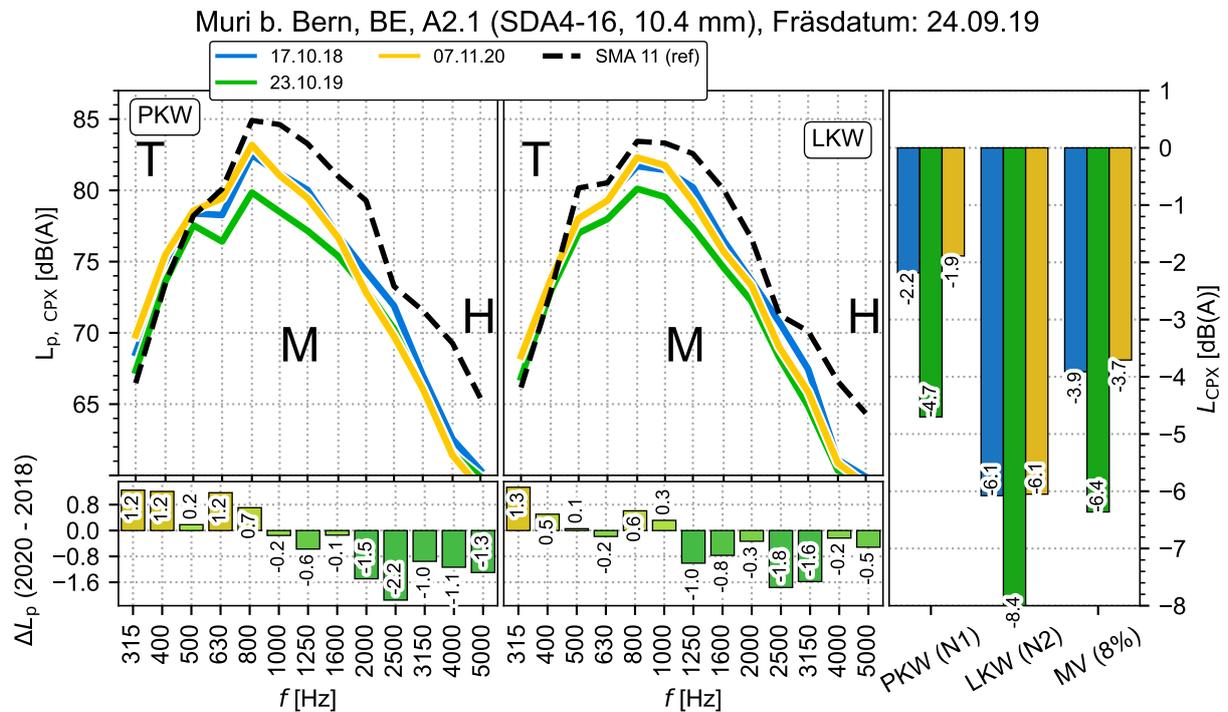


Abbildung H.7: Spektralanalyse in Muri, Fräsabschnitt A2.1

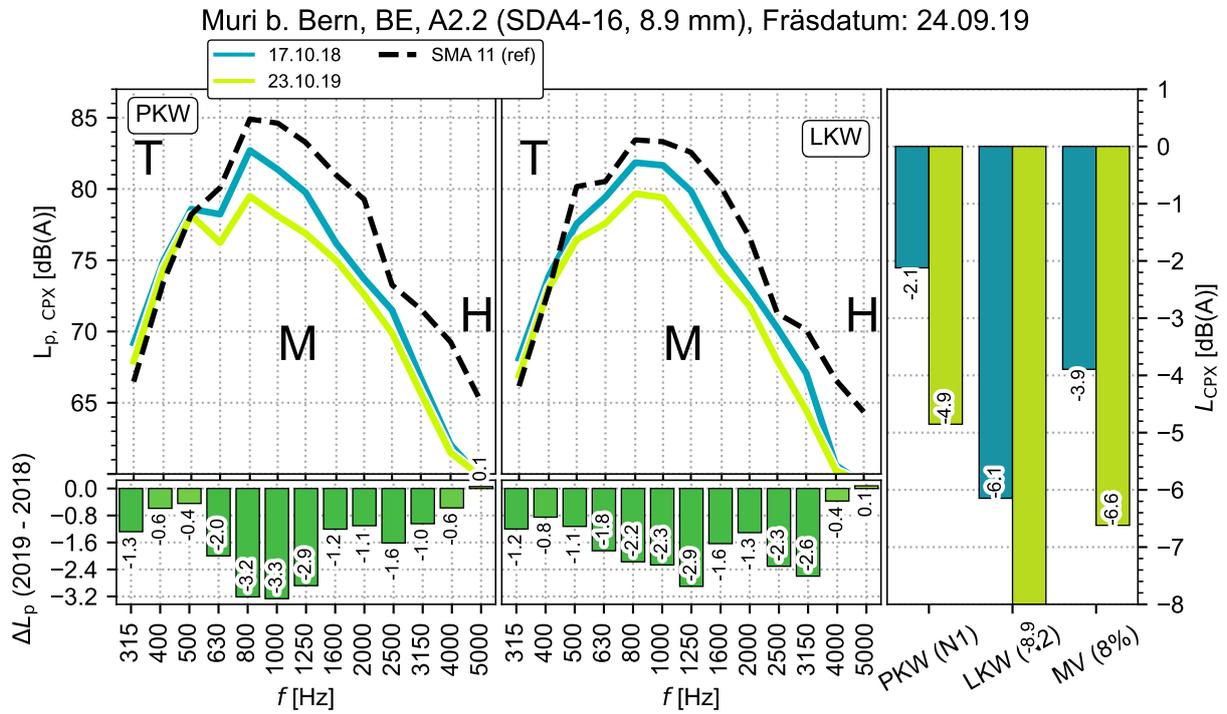


Abbildung H.8: Spektralanalyse in Muri, Fräsabschnitt A2.2

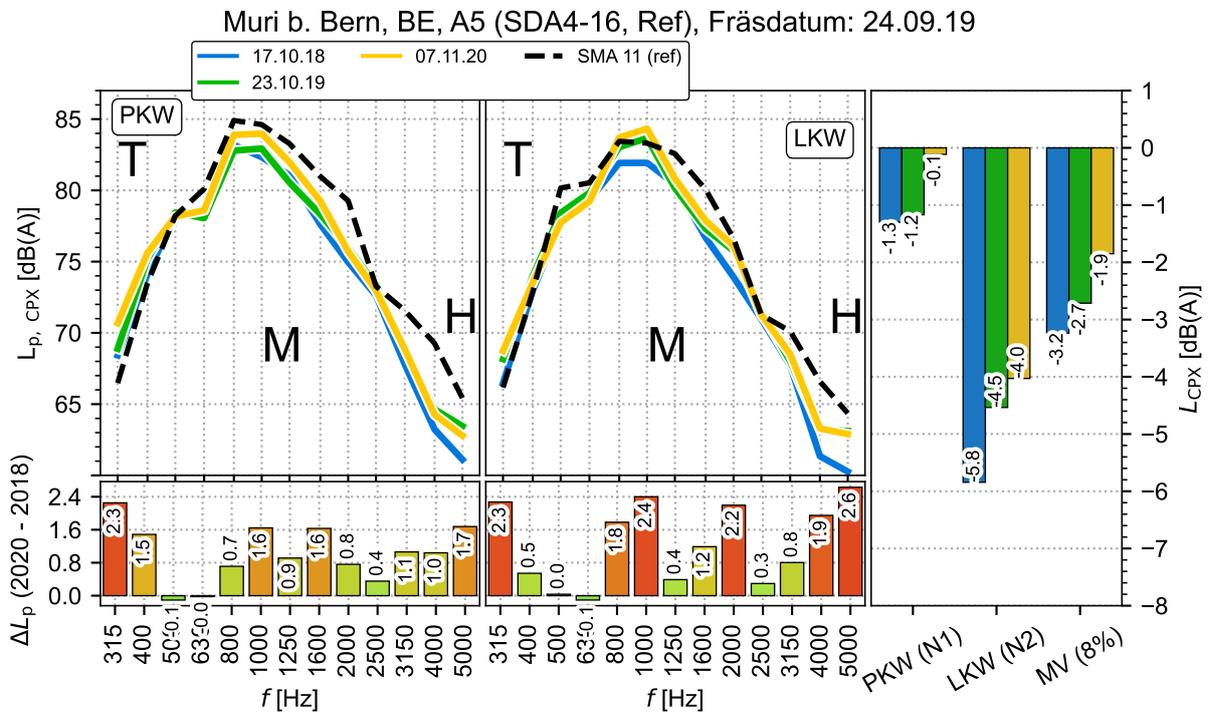


Abbildung H.9: Spektralanalyse in Muri, Fräsabschnitt A5

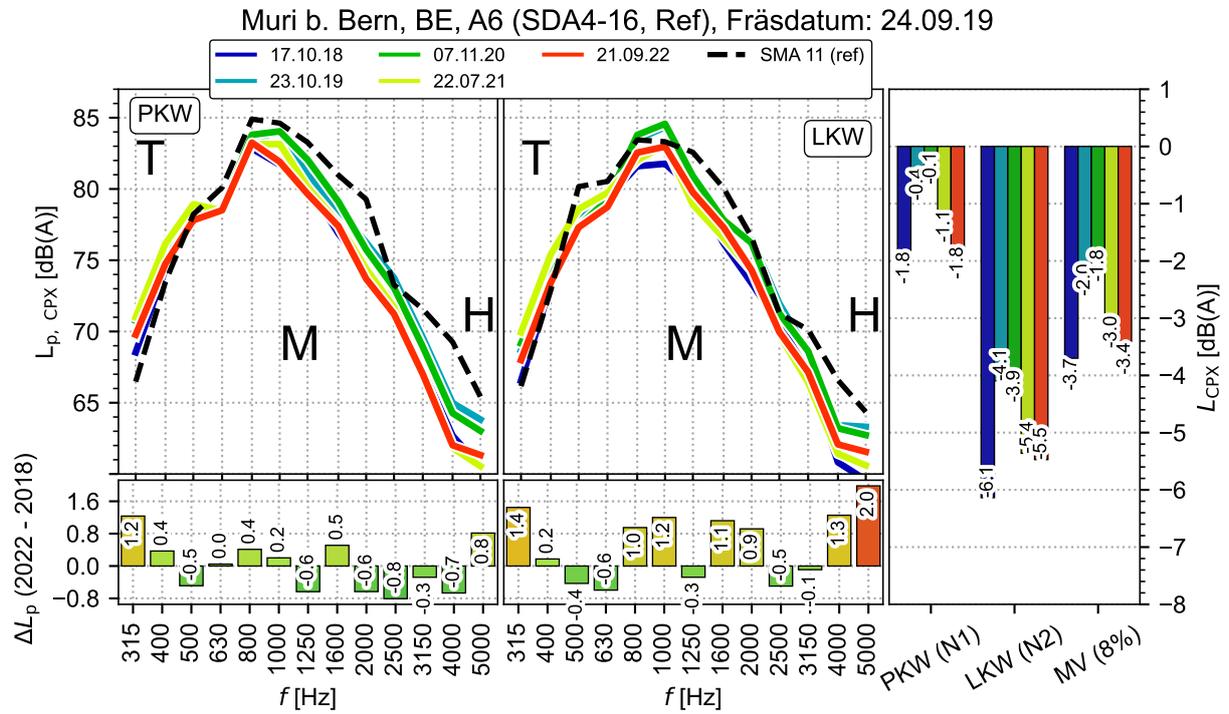


Abbildung H.10: Spektralanalyse in Muri, Fräsabschnitt A6

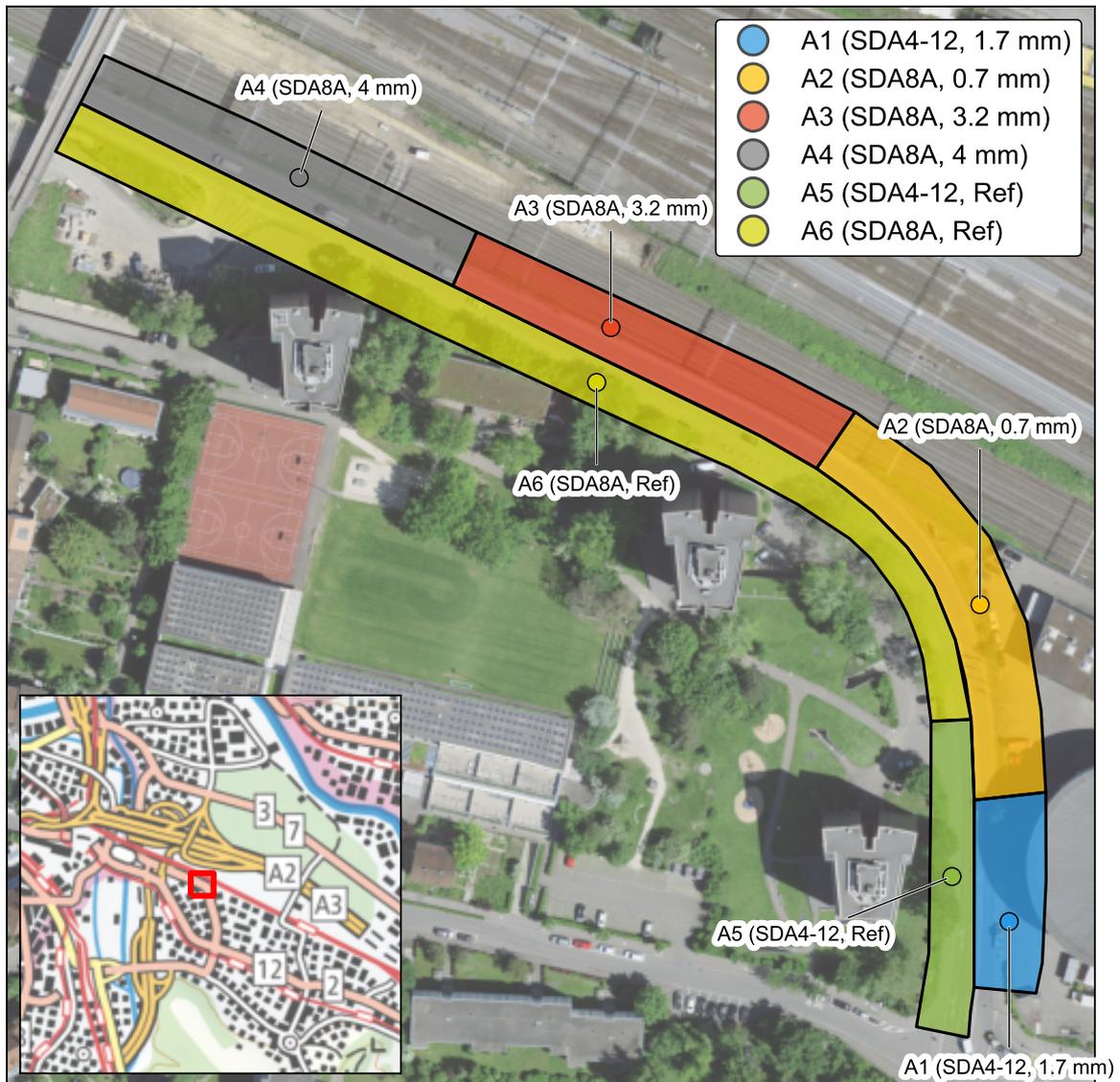
## I. MuttENZ, BL

In MuttENZ, BL wurde im Jahr 2020 der 2013 eingebaute SDA4 und SDA8A Belag abgeschliffen. Somit wurde dieser Belag nach 7 Jahren geschliffen. In beiden Richtungen ist bei dieser Teststrecke eine Referenz vorhanden.

**Tabelle I.1: Abschnitte in MuttENZ**

Belag	Abschnitt	Fräsdatum	Fahrbahn	Länge	Abtrag	Bezeichnung in Plots
SDA 4 A (2013)	A1	24.06.2020	Rg Nord	50 m	1.7 mm (1x WZb)	A1 (SDA 4 A, 1.7 mm)
	Referenz		Rg Süd	50 m	ungeschliffen	Ref (SDA 4 A)
SDA 8 A (2013)	A2	24.06.2020	Rg Nordwest	100 m	0.7 mm (1x WZb)	A2 (SDA 8 A, 0.7 mm)
	A3	24.06.2020	Rg Nordwest	100 m	3.2 mm (2x WZb)	A2 (SDA 8 A, 3.2 mm)
	A4	24.06.2020	Rg Nordwest	100 m	4.0 mm (3x WZb)	A2 (SDA 8 A, 4 mm)
	Referenz		Rg Südost	300 m	ungeschliffen	Ref (SDA 8 A)

## I.1. Übersichtskarte

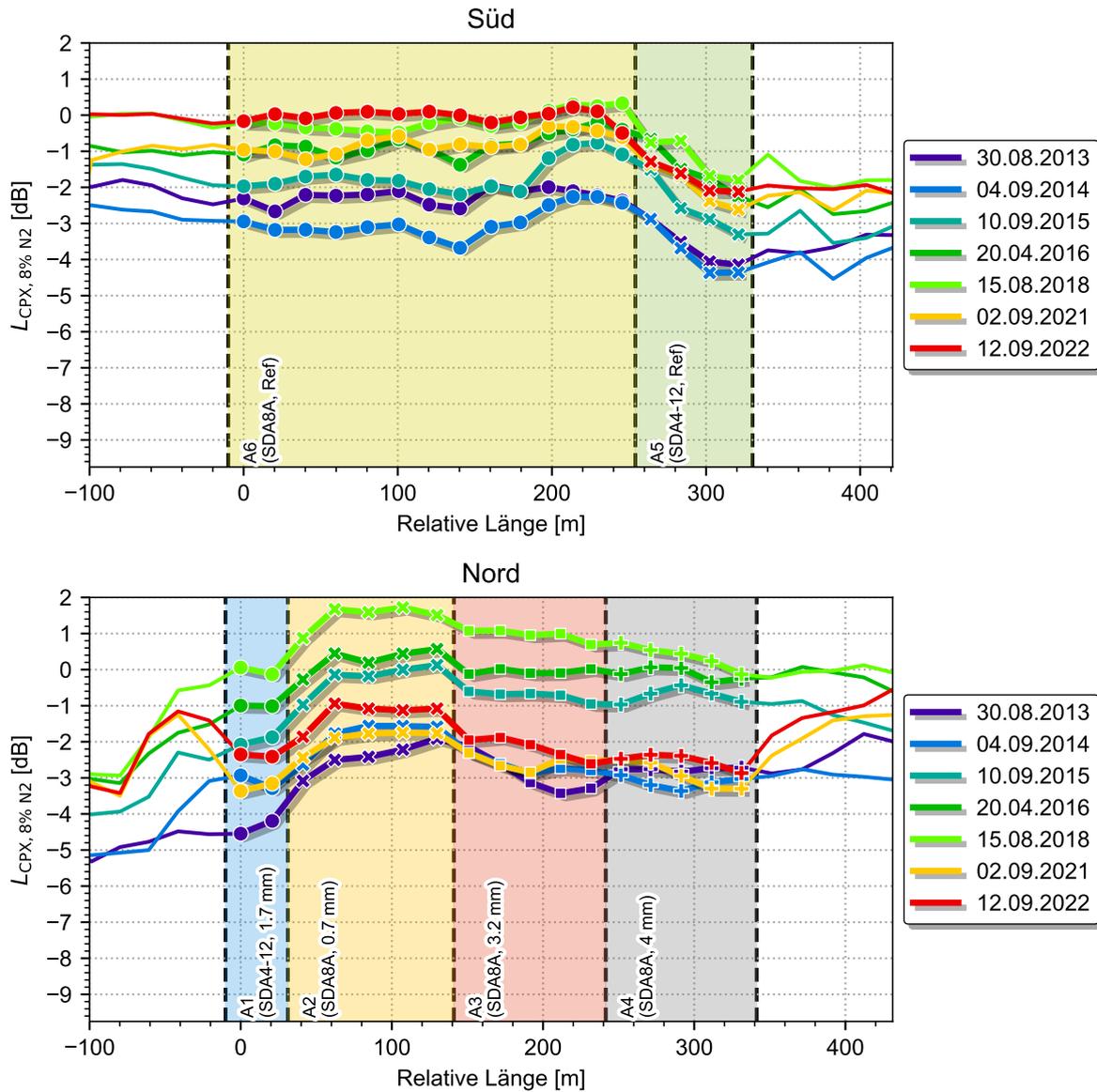


**Abbildung I.1:** Übersichtskarte Muttenz mit Lage der Abschnitte

## I.2. Akustische Resultate

In Muttenz wurden über einige Jahre Messungen von G+P durchgeführt (Bis ins Jahr 2019). Nachfolgend wurden hingegen die Messungen unmittelbar vor und nach der Schleifmassnahme von AeBo durchgeführt. Diese Messungen wurden für den Meta-Vergleich nicht berücksichtigt. (Vgl Kapitel A). Damit ergibt sich in Muttenz eine grössere Lücke zwischen dem Ausgangszustand (Messung 2019) und der Messung im Jahr 2021, welche knapp 1 Jahr nach der Massnahme durchgeführt wurde.

### I.2.1 CPX-Streckenverlauf



**Abbildung I.2:** Streckenverlauf der CPX-Messungen in Streckenverlauf Muttenz (Schleifdatum: 24.06.2020)

### I.2.2 CPX-Zeitverlauf

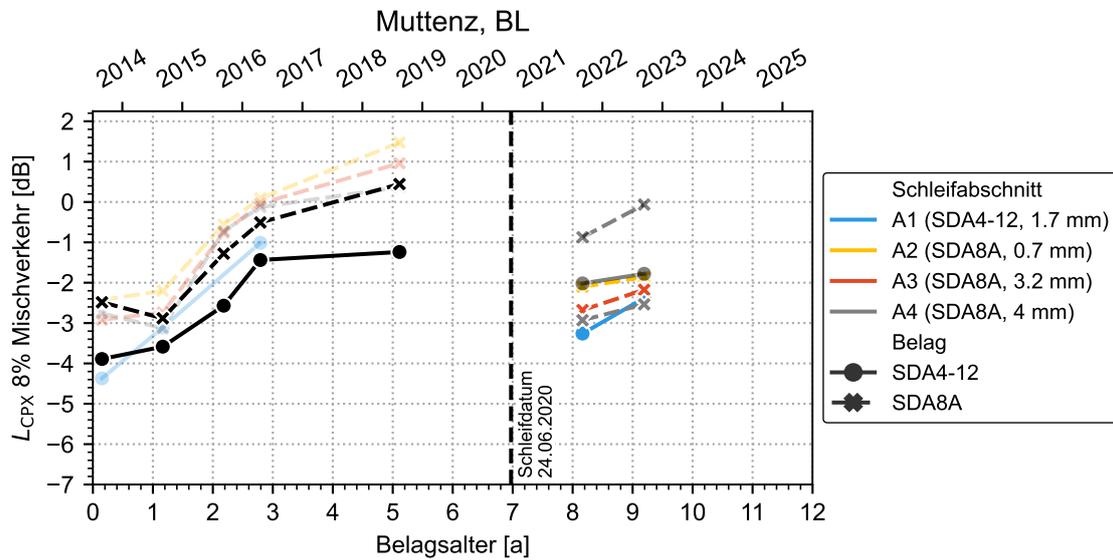


Abbildung I.3: Caption

### I.2.3 Akustische Regeneration

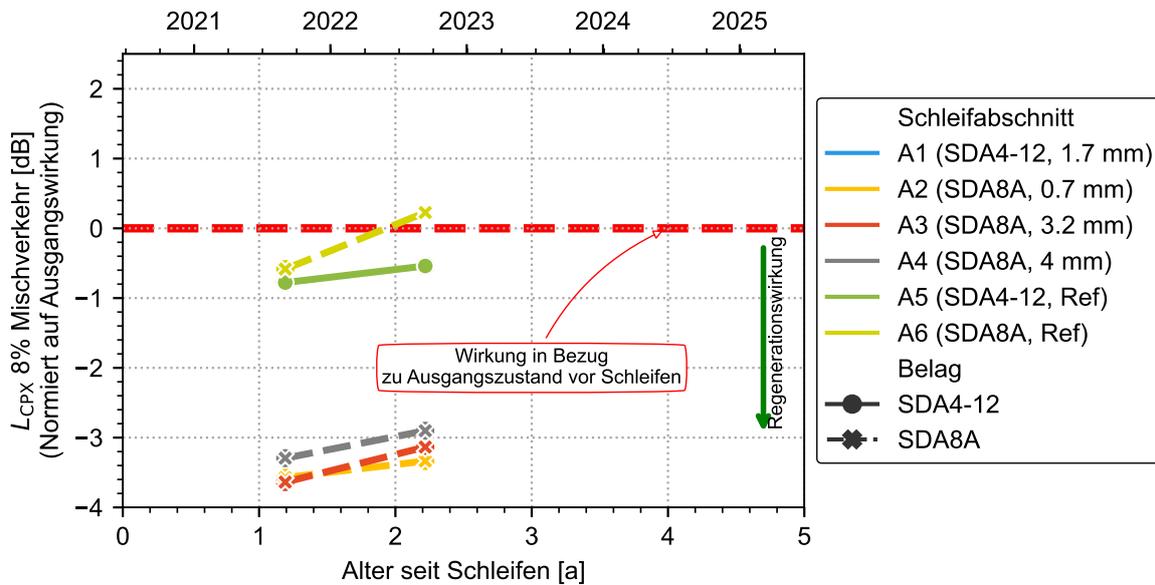


Abbildung I.4: Wirkung relativ zu Ausgangswirkung (Regenerationswirkung) in Muttenz, BL. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Ausgangsmessung in Muttenz ca. 2 Jahre zurückliegt.

## I.2.4 Akustische Wirkung

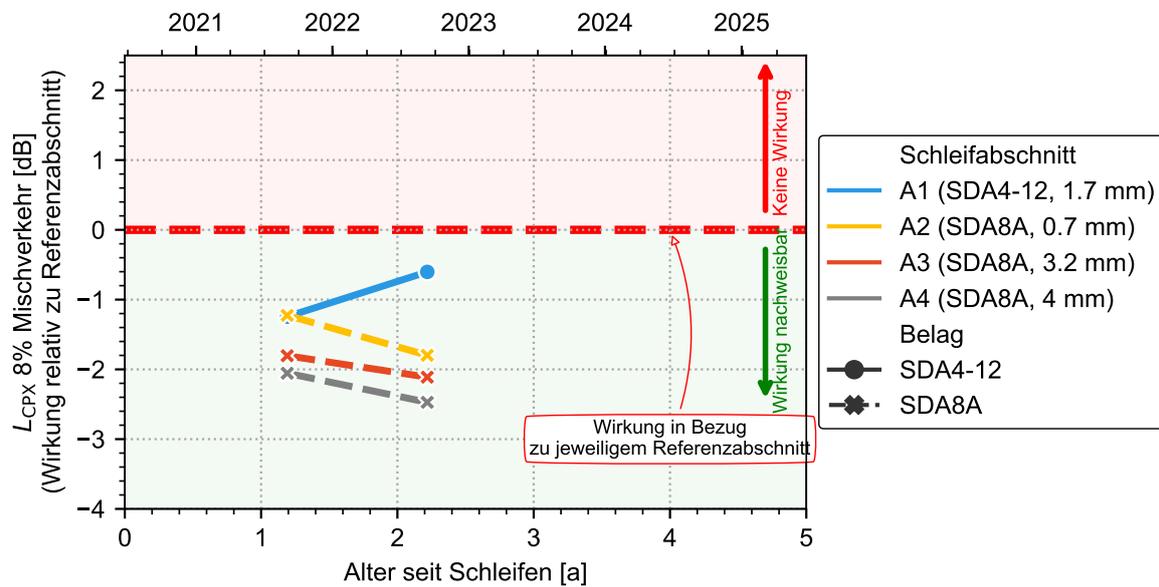


Abbildung I.5: Wirkung relativ zu Referenzabschnitt

## I.2.5 Resultate AeBo

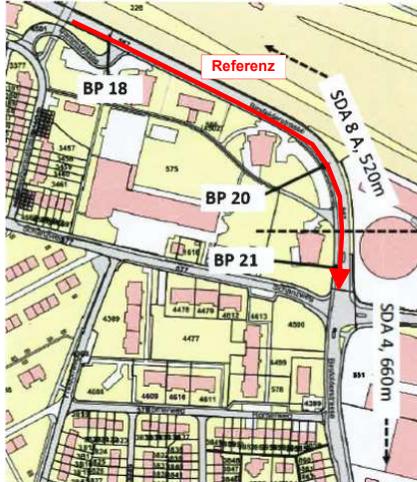
Auf der folgenden Seite sind die Resultate von AeBo für Muttenz dargestellt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich diese Resultate nur auf die PW-Reifen beziehen. Ebenfalls ist ein anderes CPX-System zur Messung verwendet worden. Nichtsdestotrotz konnten Initialwirkungen von -2.5 bis -3.5 dB erreicht werden. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen aus anderen Strecken.

## CPX-Messungen vor/nach Schleifarbeiten in Muttenz und Dittingen

### Synthese Muttenz, Birsfelderstrasse

Dargestellte Messdatenreihen:  
 Vorher, 20.04.2020, Run 092503  
 Nachher, 14.09.2020, Run 090812 und Run 090305

#### Referenzabschnitt (unveränderte Fahrbahn)



##### Vorher-Zustand: 20.04.2020

Birsfelderstrasse, Richtung S-SO, Vorher, 20.04.2020, Run 092752

Abschnitt	Längengrad [Dezimal]	Breitengrad [Dezimal]	T°Belag [°C]	V [km/h]	Pegel [dBA]	Kb (PW) [dBA]	Kb (PW) gerundet
Referenzabschnitt	7.63020	47.53948	23.1	49.2	<b>92.6</b>	1.7	<b>1.5</b>
(unveränderte Fahrbahn)	7.63310	47.53750					

##### Nachher-Zustand: 14.09.2020

Birsfelderstrasse, Richtung S-SO, Nachher, 14.09.2020, Run 090006

Abschnitt	Längengrad [Dezimal]	Breitengrad [Dezimal]	T°Belag [°C]	V [km/h]	Pegel [dBA]	Kb (PW) [dBA]	Kb (PW) gerundet
Referenzabschnitt	7.63022	47.53948	25.9	49.3	<b>92.5</b>	1.6	<b>1.5</b>
(unveränderte Fahrbahn)	7.63308	47.53751					

#### Farbskala für den Belagskennwert Kb (PW) und die Wirkung der Schleifarbeiten

Ungünstig bzw. Verschlechterung		Neutral		Günstig bzw. Verbesserung	
Kb-Wert	Farbskala	Kb-Wert	Farbskala	Kb-Wert	Farbskala
>=4.0	Dark Red	0.0	Light Green	-0.5	Light Green
3.5	Red			-1.0	Light Green
3.0	Orange-Red			-1.5	Light Green
2.5	Orange			-2.0	Light Green
2.0	Yellow-Orange			-2.5	Light Green
1.5	Yellow			-3.0	Light Green
1.0	Light Yellow			-3.5	Light Green
0.5	Yellow			-4.0	Light Green

#### Abschnitte mit Schleifarbeiten



##### Vorher-Zustand: 20.04.2020

Birsfelderstrasse, Richtung N-NW, Vorher, 20.04.2020, Run 092503

Abschnitt	Längengrad [Dezimal]	Breitengrad [Dezimal]	T°Belag [°C]	V [km/h]	Pegel [dBA]	Kb (PW) [dBA]	Kb (PW) gerundet
Abschnitte mit Schleifarbeiten	7.63319	47.53750	23.4	49.5	<b>93.0</b>	2.2	<b>2.0</b>
	7.63029	47.53952					
SDA 4 A_A1_1.7mm	7.63319	47.53750	24.2	49.5	93.1	2.2	<b>2.0</b>
	7.63322	47.53794					
SDA 8 A_A2_0.7mm	7.63322	47.53796	23.4	49.2	93.6	2.9	<b>3.0</b>
	7.63262	47.53872					
SDA 8 A_A3_3.2mm	7.63260	47.53872	22.9	49.8	93.1	2.3	<b>2.5</b>
	7.63147	47.53912					
SDA 8 A_A4_4.0mm	7.63145	47.53913	23.5	49.6	92.3	1.3	<b>1.5</b>
	7.63029	47.53952					

##### Nachher-Zustand: 14.09.2020

Birsfelderstrasse, Richtung N-NW, Nachher, 14.09.2020, Run 090305

Abschnitt	Längengrad [Dezimal]	Breitengrad [Dezimal]	T°Belag [°C]	V [km/h]	Pegel [dBA]	Kb (PW) [dBA]	Kb (PW) gerundet	WIRKUNG SCHLEIFEN
Abschnitte mit Schleifarbeiten	7.63319	47.53751	27.6	49.7	<b>90.7</b>	-0.7	<b>-0.5</b>	<b>-2.5</b>
	7.63030	47.53952						
SDA 4 A_A1_1.7mm	7.63319	47.53751	28.3	49.8	90.5	-1.0	<b>-1.0</b>	<b>-3.0</b>
	7.63321	47.53794						
SDA 8 A_A2_0.7mm	7.63321	47.53795	26.6	49.5	91.0	-0.3	<b>-0.5</b>	<b>-3.5</b>
	7.63269	47.53871						
SDA 8 A_A3_3.2mm	7.63267	47.53872	27.5	49.8	90.8	-0.6	<b>-0.5</b>	<b>-3.0</b>
	7.63150	47.53912						
SDA 8 A_A4_4.0mm	7.63148	47.53913	28.4	49.7	90.4	-1.0	<b>-1.0</b>	<b>-2.5</b>
	7.63030	47.53952						

### I.3. Texturanalysen

In Muttenz gibt es eine relativ lange Zeitreihe an Texturanalysen, welche mit dem Laserprofilmeter aufgenommen wurden. Dabei zeigt sich gerade hinsichtlich des MPD's deutlich, was mit den Schleifmassnahmen über die Zeit passiert. (Vgl. Abbildung I.6). In der ersten Phase kurz nach dem Schleifen sinkt die MPD deutlich ab, was auf die feinere Belagsoberfläche hindeutet. Mit zunehmender Zeit nimmt die MPD wiederum zu.

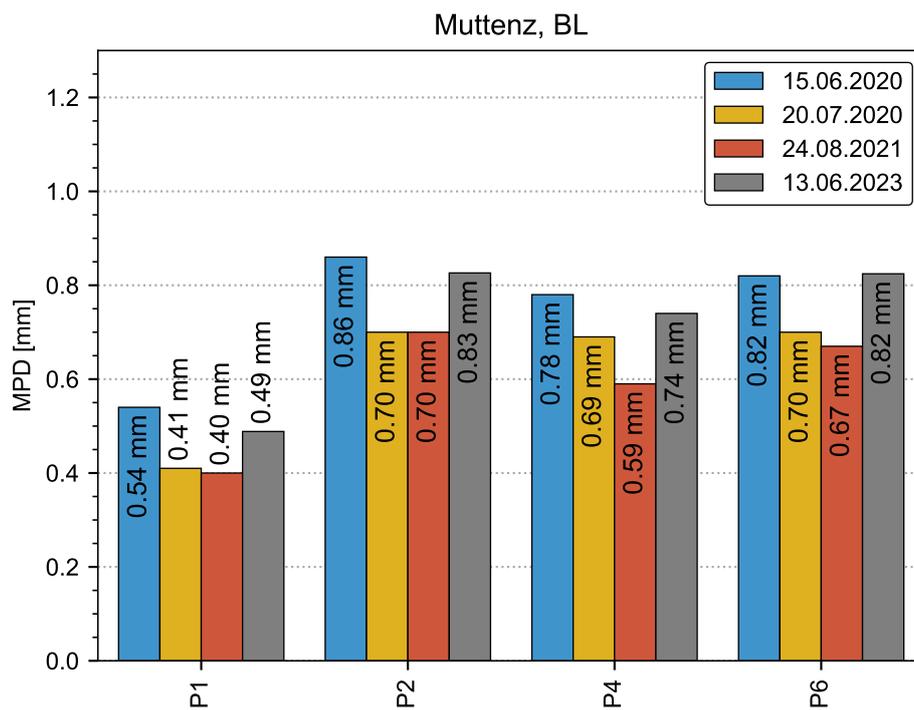


Abbildung I.6: MPD-Werte aus Lasertexturmessungen in Muttenz, BL.

#### I.3.1 Spektralanalysen

Ein ähnliches Verhalten zeigt sich ebenfalls in der spektralen Betrachtung TExturwellenlängen.

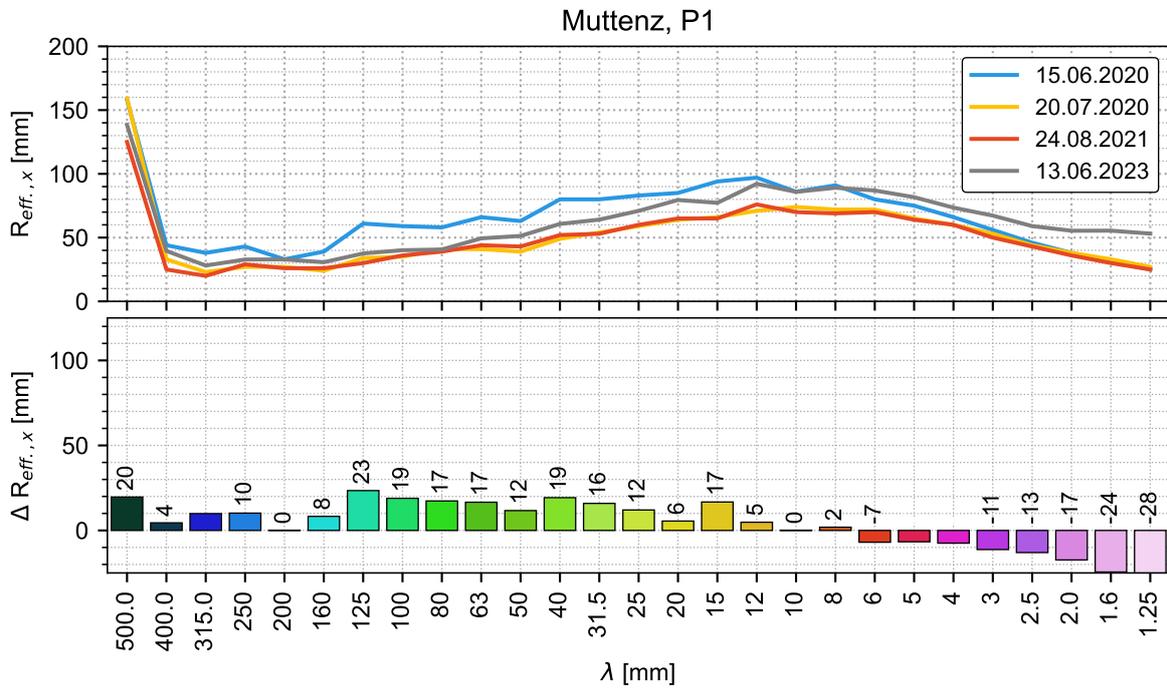


Abbildung I.7: Texturwellenlängenspektrum am Messpunkt P1 in MuttENZ.

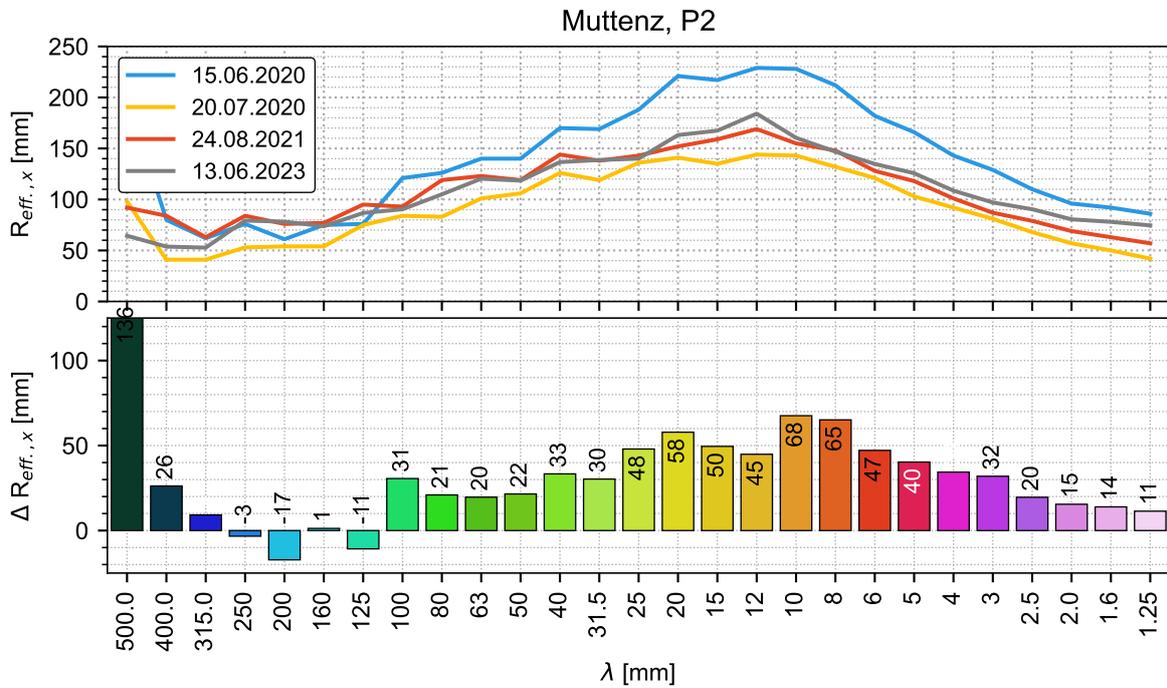


Abbildung I.8: Caption

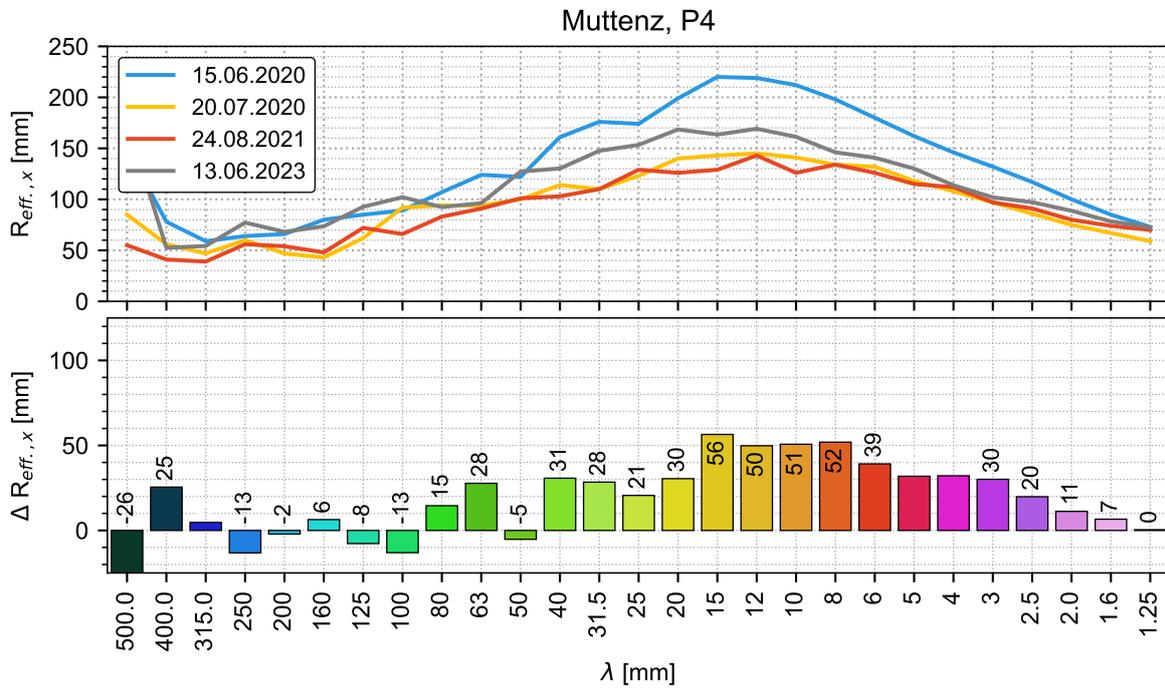


Abbildung I.9: Caption

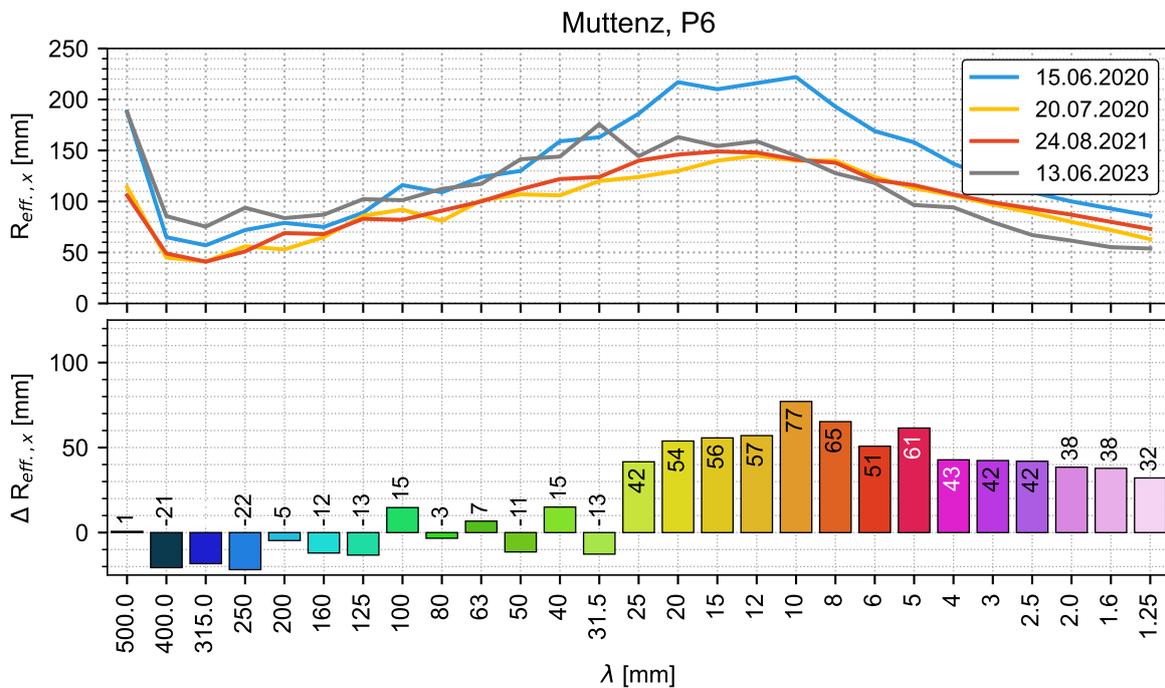


Abbildung I.10: Caption

### I.3.2 Spektralanalyse

Bei den Spektralanalysen wird jeweils die spektrale Veränderung der gemessenen CPX-Pegel im Zeitraum von der letzten Messung vor der Schleifmassnahme gezeigt. In den Abbildungen wird unterschieden zwischen den PKW und LKW Messreifen. Ebenfalls werden die Gesamtpegel im rechten Teil ebenfalls für PKW, LKW und den Mischverkehr (N2-Anteil von 8%) gezeigt.

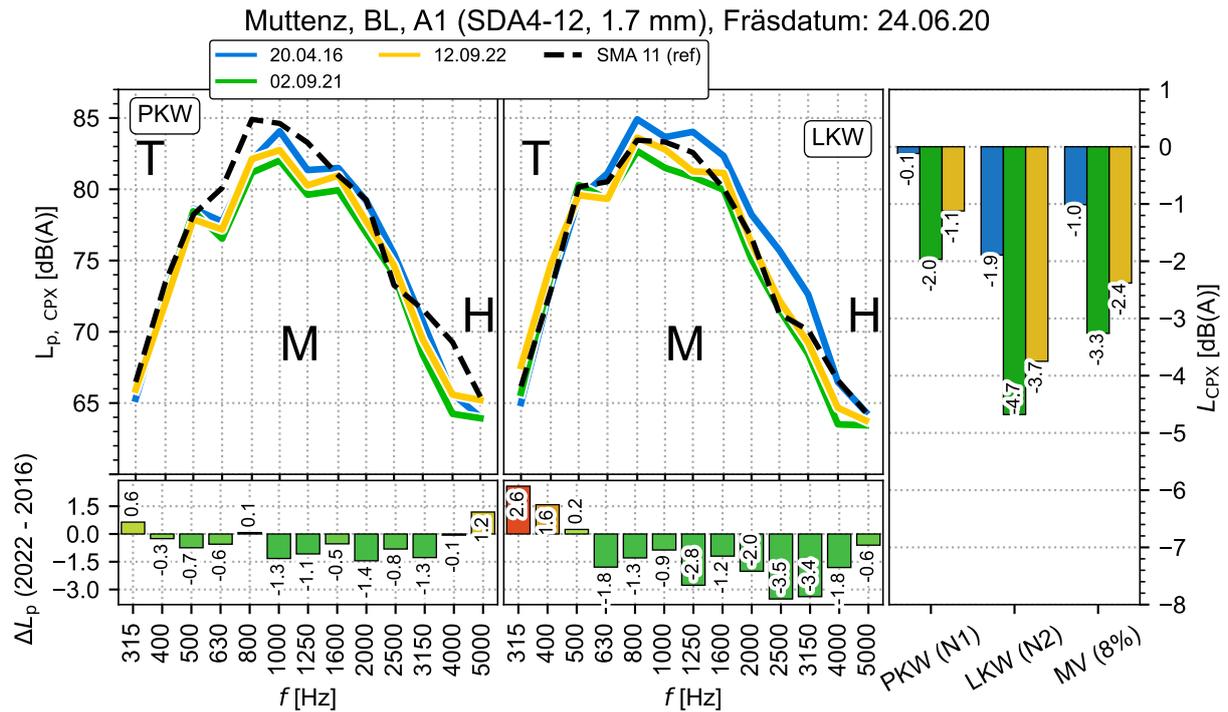


Abbildung I.11: Spektralanalyse in MuttENZ, A1

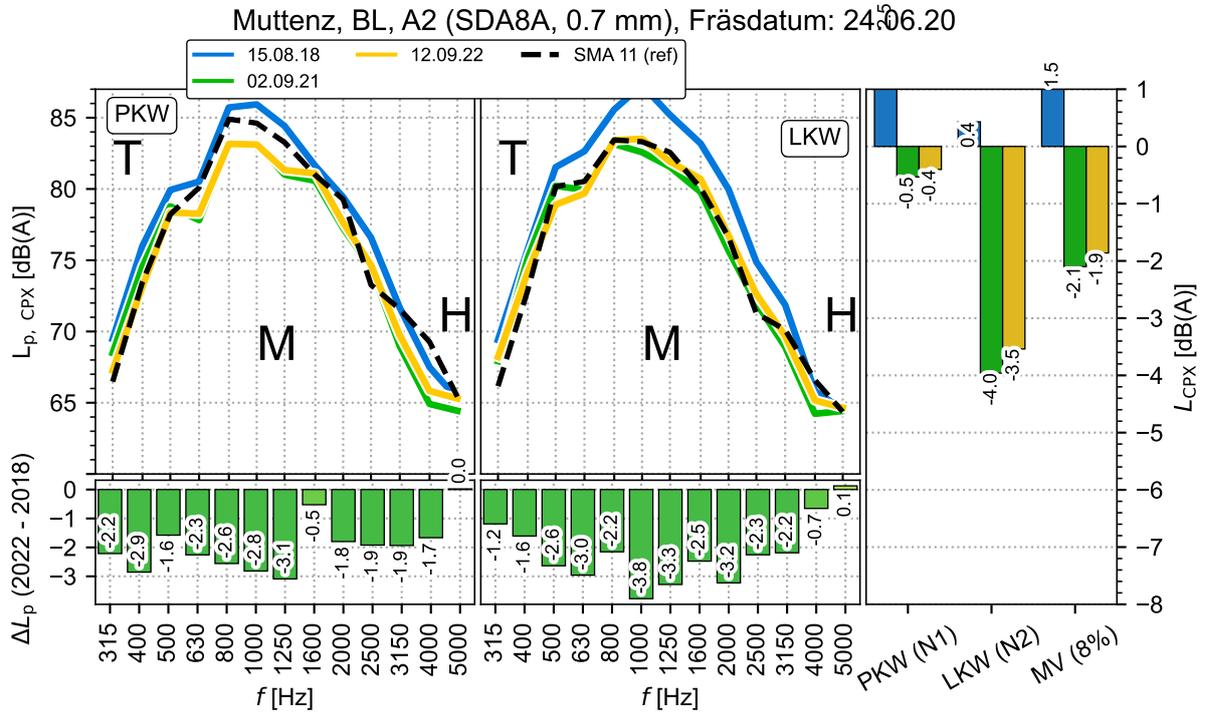


Abbildung I.12: Spektralanalyse in MuttENZ, A2

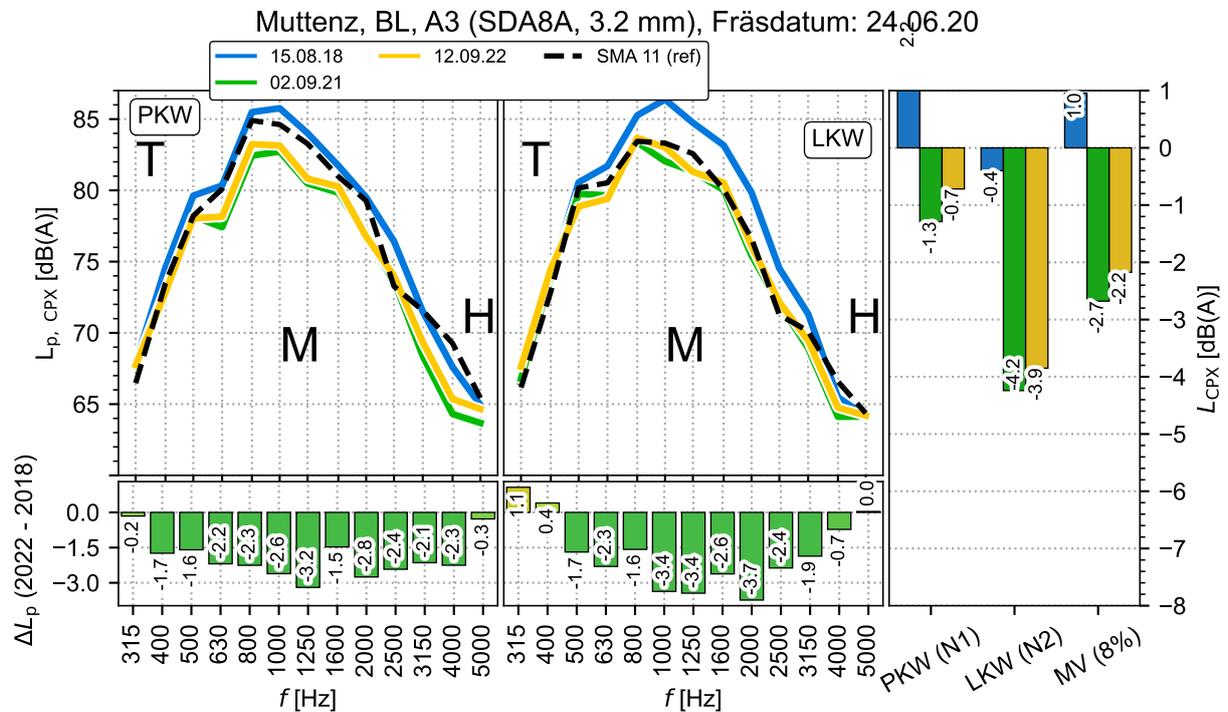


Abbildung I.13: Spektralanalyse in MuttENZ, A3

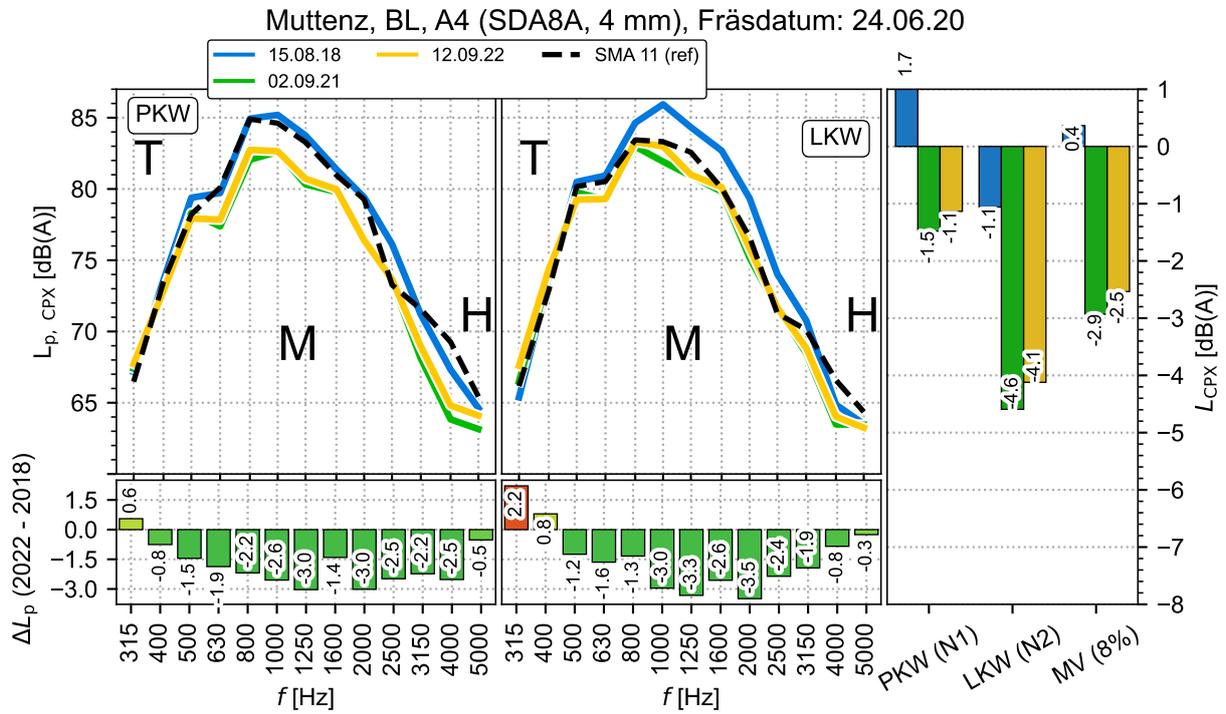


Abbildung I.14: Spektralanalyse in MuttENZ, A4

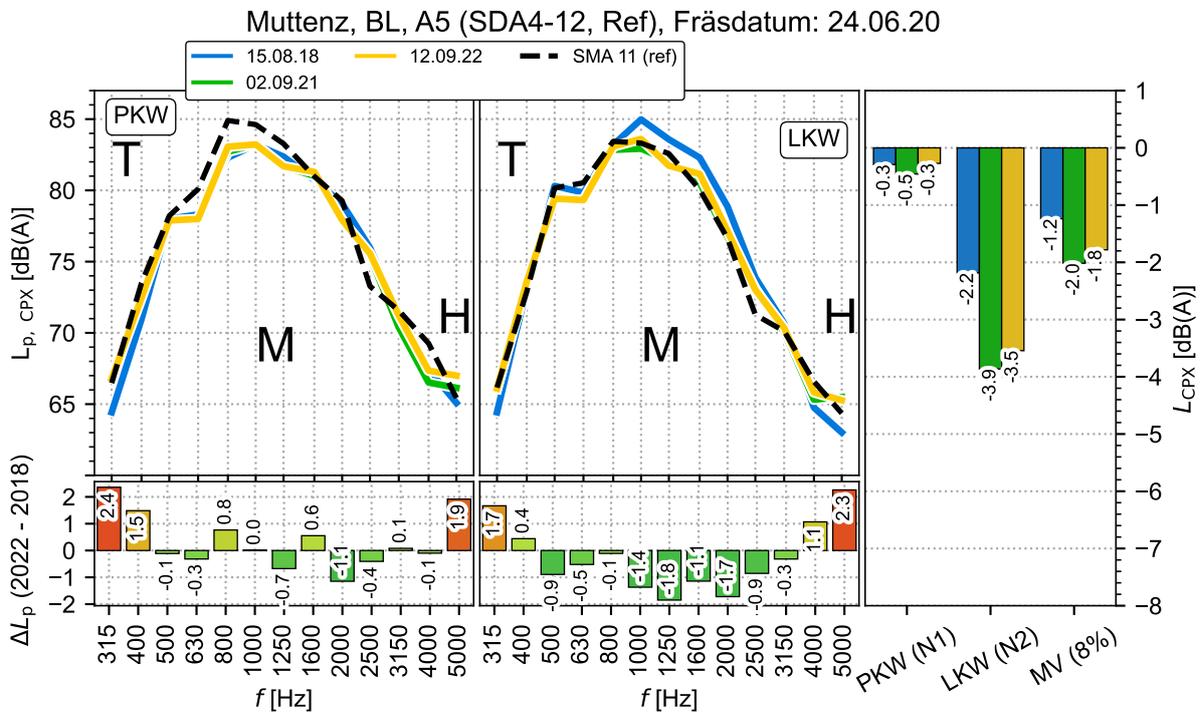


Abbildung I.15: Spektralanalyse in MuttENZ, A5

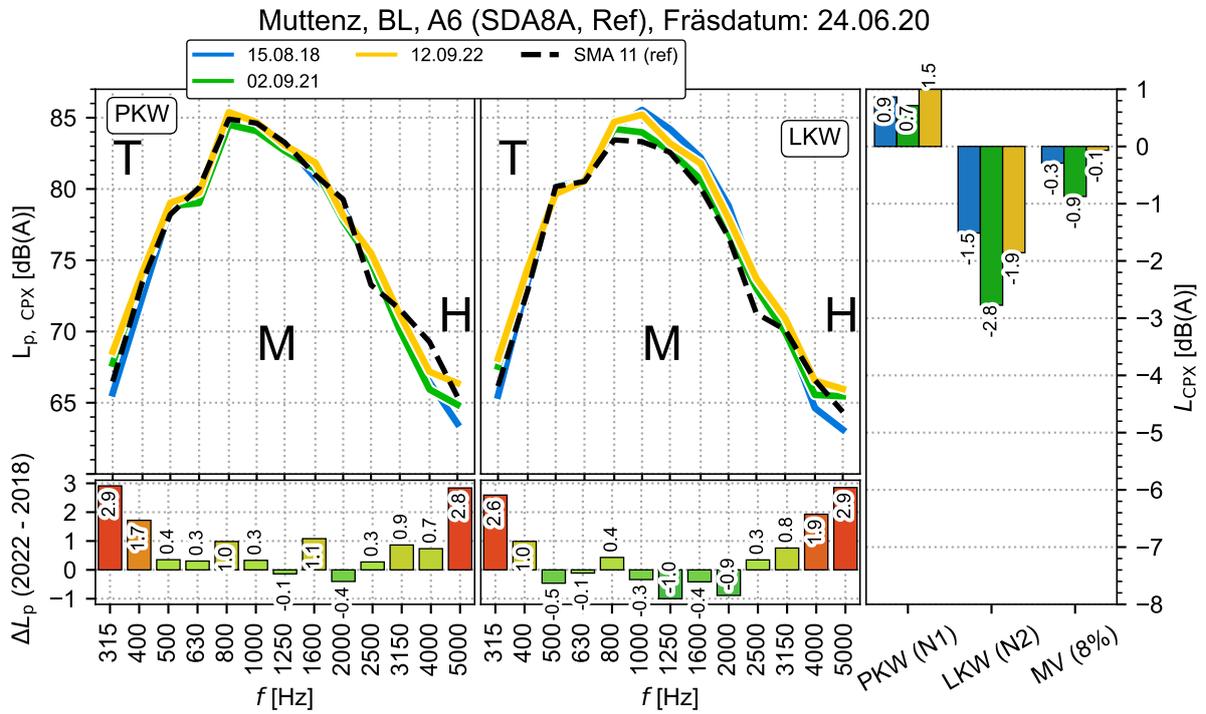


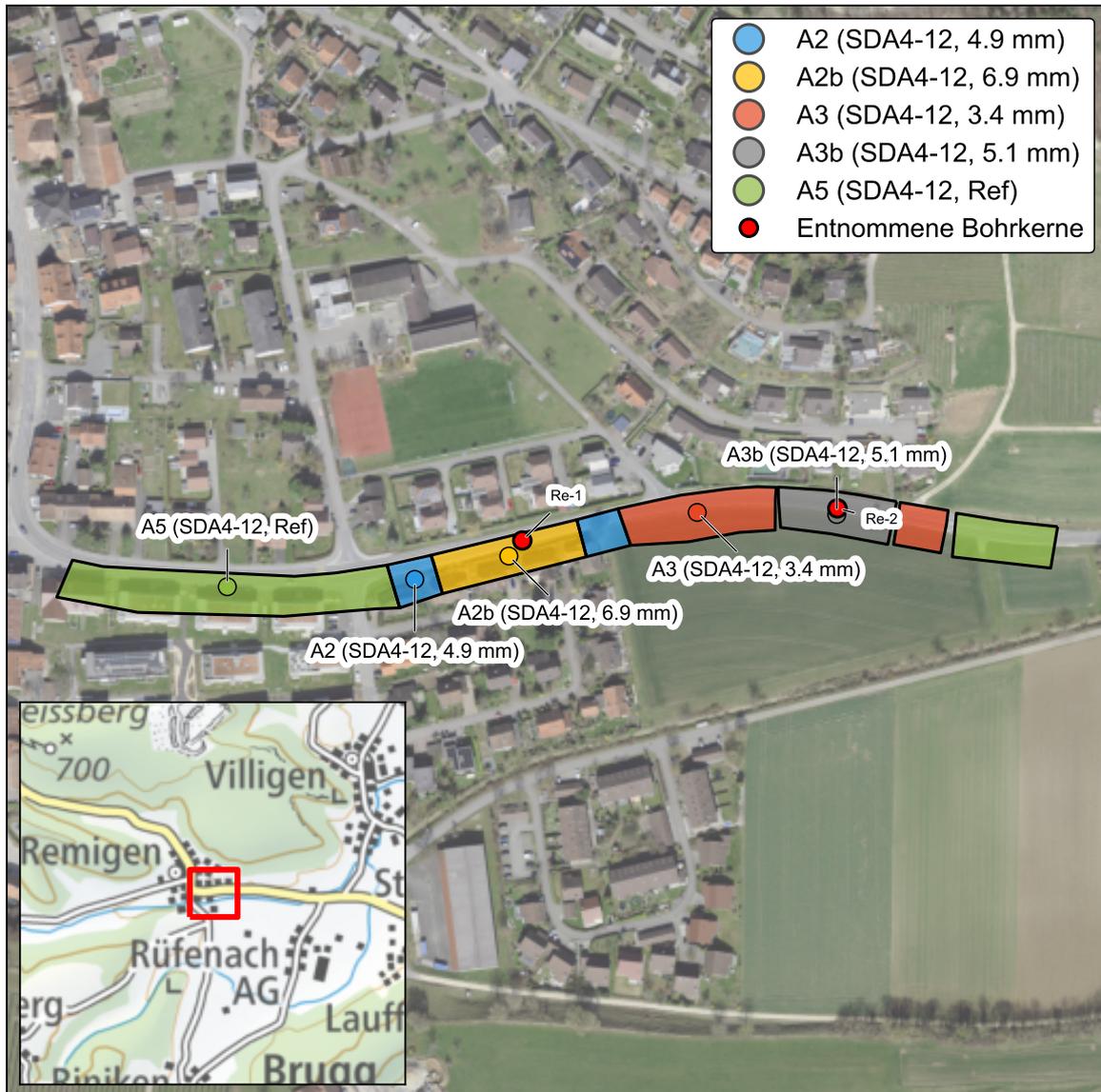
Abbildung I.16: Spektralanalyse in MuttENZ, A6, Ref

## J. Remigen, AG

**Tabelle J.1:** Beschreibung der Schleifabschnitte in Remigen, AG.

Belag	Abschnitt	Fräsdatum	Fahrbahn	Länge	Abtrag	Bezeichnung in Plots
SDA 4-12 (2016)	A2	27.08.2020	Rg Ost	50 m	4.9 mm (3x WZb)	A2 (SDA 4-12, 4.9 mm)
	A2b	27.08.2020	Rg Ost	60 m	6.9 mm (6x WZb)	A2b (SDA 4-12, 6.9 mm)
	A3	27.08.2020	Rg Ost	120 m	3.4 mm (2x WZb)	A3 (SDA 4-12, 3.4 mm)
	A3b	27.08.2020	Rg Ost	50 m	5.1 mm (4x WZb)	A3b (SDA 4-12, 5.1 mm)
	Referenz		Rg Ost	150+50 m	ungeschliffen	Ref (SDA 4-12)

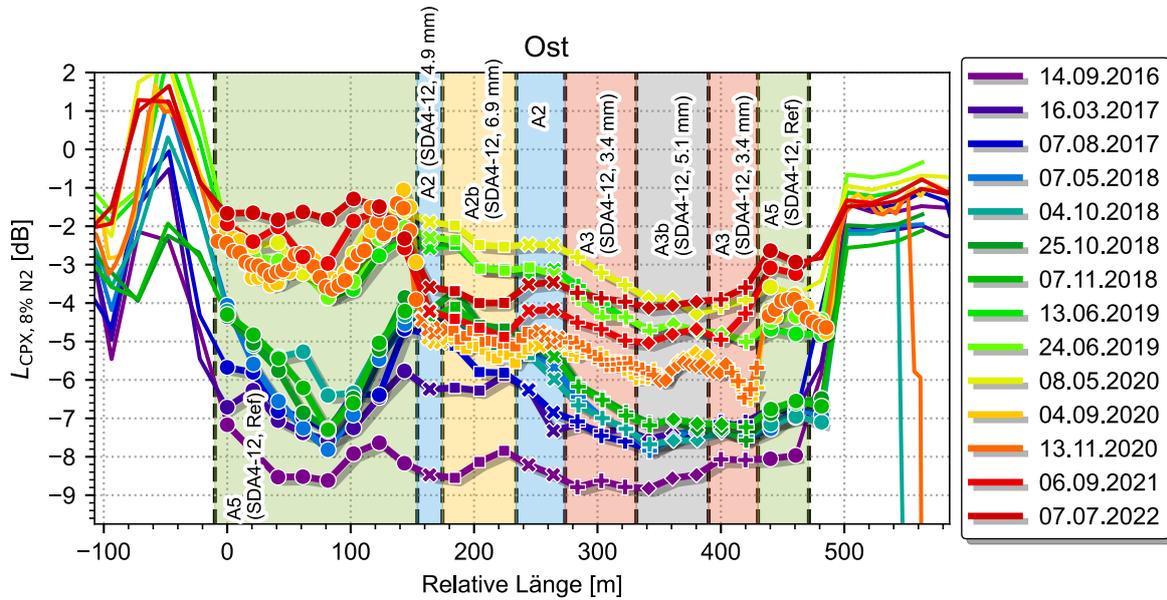
## J.1. Übersichtskarte



**Abbildung J.1:** Übersichtskarte Remigen mit Lage der Abschnitte und inklusive der entnommenen Bohrkern Re-1 und Re-2.

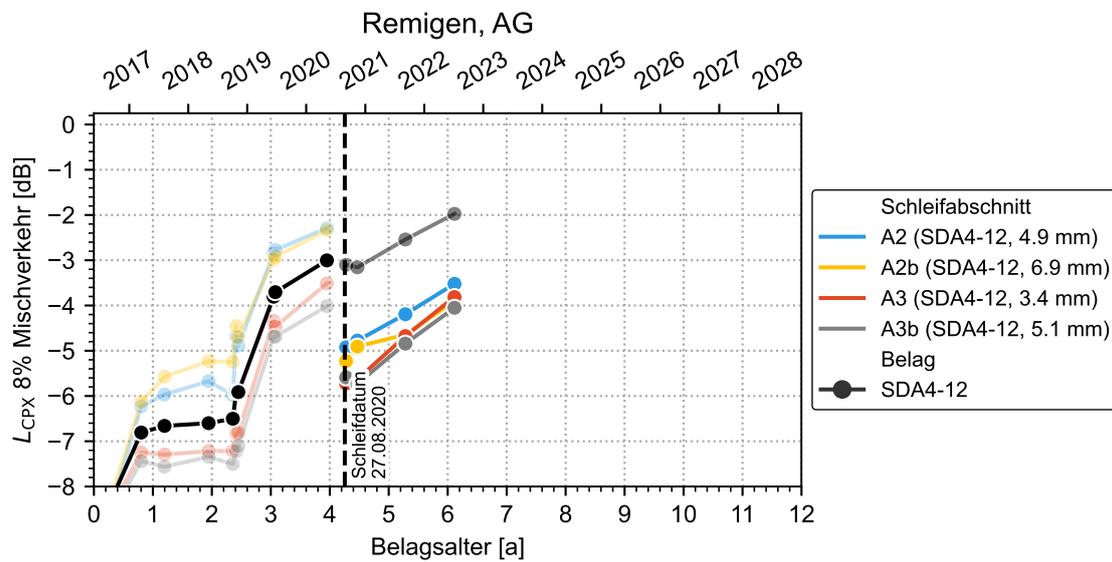
## J.2. Akustische Resultate

### J.2.1 CPX-Streckenverlauf



**Abbildung J.2:** Verlauf der akustischen Belagsgüte (Mischverkehr mit 8% N<sub>2</sub>-Anteil in Remigen in Fahrtrichtung Ost über verschiedene Messdaten. Remigen wurde am 27.08.2020 geschliffen.

### J.2.2 CPX- Zeitverlauf



**Abbildung J.3:** Zeitlicher Verlauf (Abschnittsmittelwerte) der akustischen Belagsgüte (Mischverkehr mit 8% N<sub>2</sub>-Anteil in Remigen. In dieser Abbildung ist die alternde Referenz nach der Schleifmassnahme ebenfalls eingezeichnet (schwach schwarze Linie).

### J.2.3 Akustische Regeneration

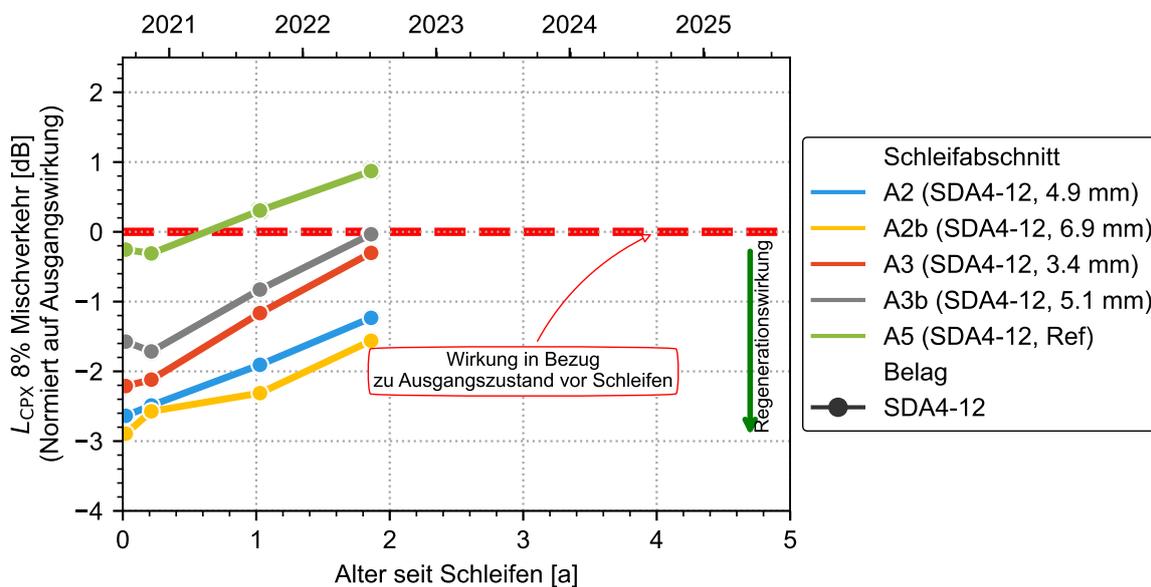


Abbildung J.4: Wirkung der Schleifmassnahme relativ zum Ausgangszustand ab Zeitpunkt der Massnahme in Remigen

### J.2.4 Akustische Wirkung

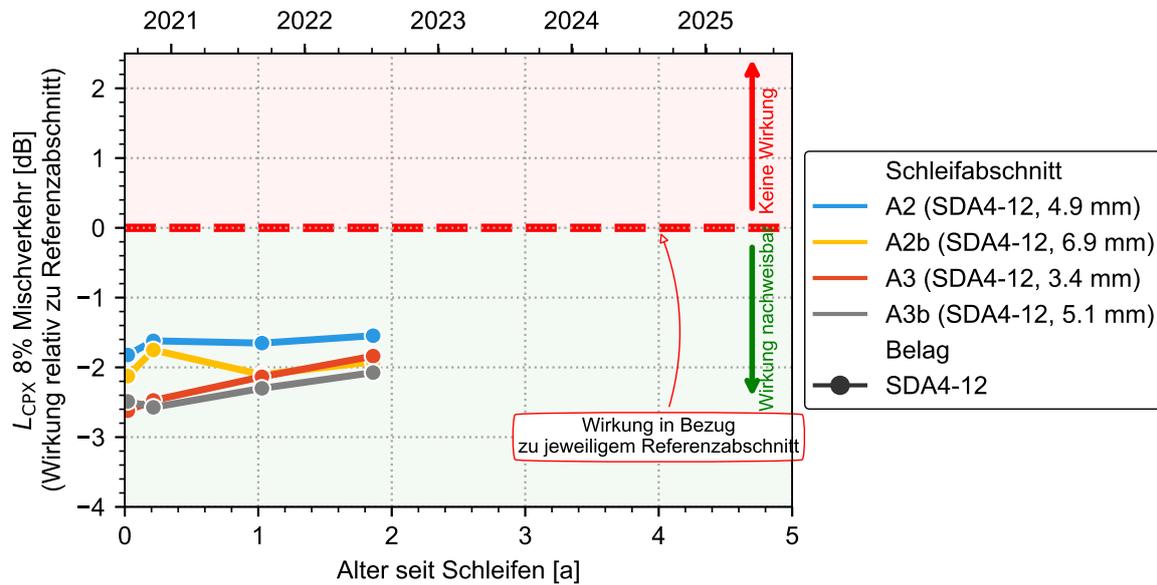


Abbildung J.5: Wirkung relativ zu Referenzabschnitt in Remigen.

### J.2.5 Spektralanalyse

Bei den Spektralanalysen wird jeweils die spektrale Veränderung der gemessenen CPX-Pegel im Zeitraum von der letzten Messung vor der Schleifmassnahme gezeigt. In den Abbildungen wird unterschieden zwischen den PKW und LKW Messreifen. Ebenfalls werden die Gesamtpegel im rechten Teil ebenfalls für PKW, LKW und den Mischverkehr (N2-Anteil von 8%) gezeigt.

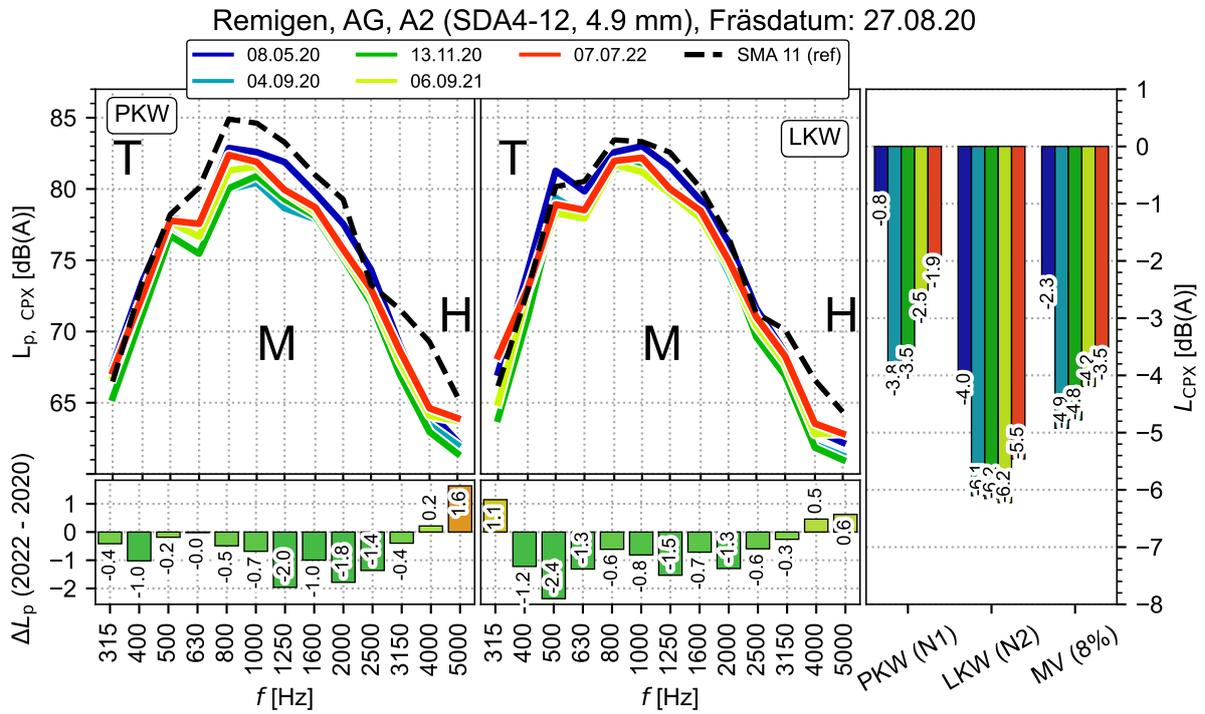


Abbildung J.6: Spektralanalyse in Remigen, A2

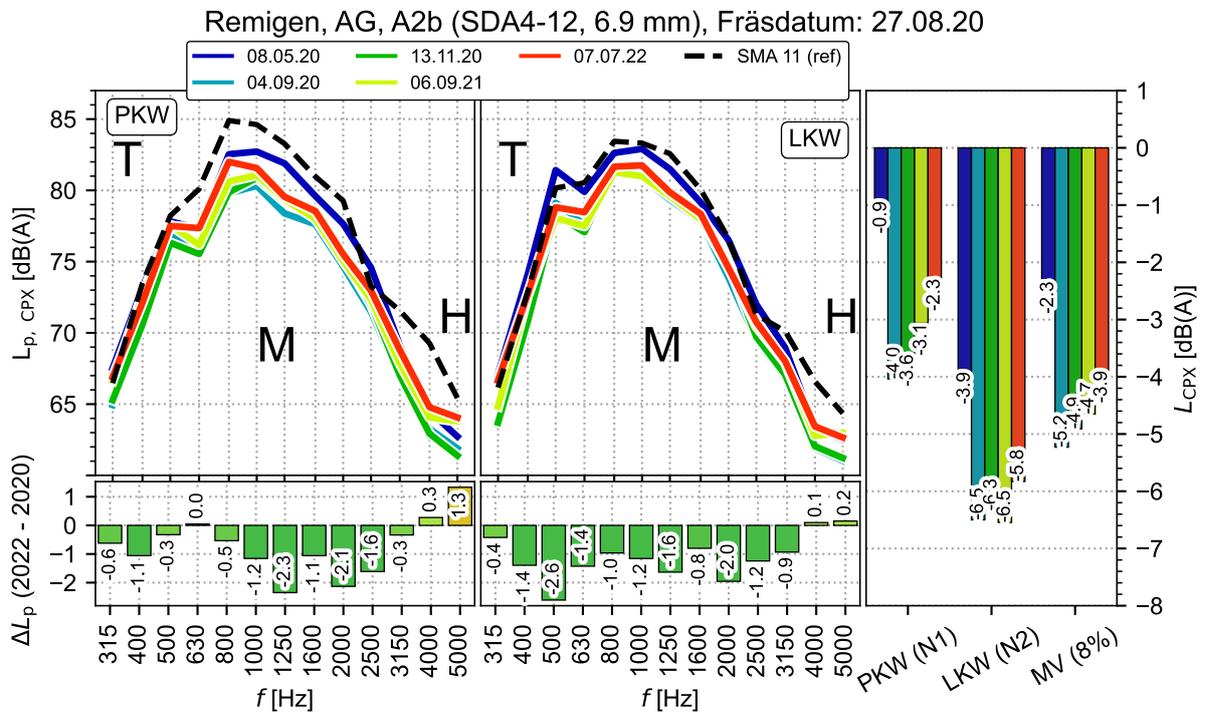


Abbildung J.7: Spektralanalyse in Remigen, A2b

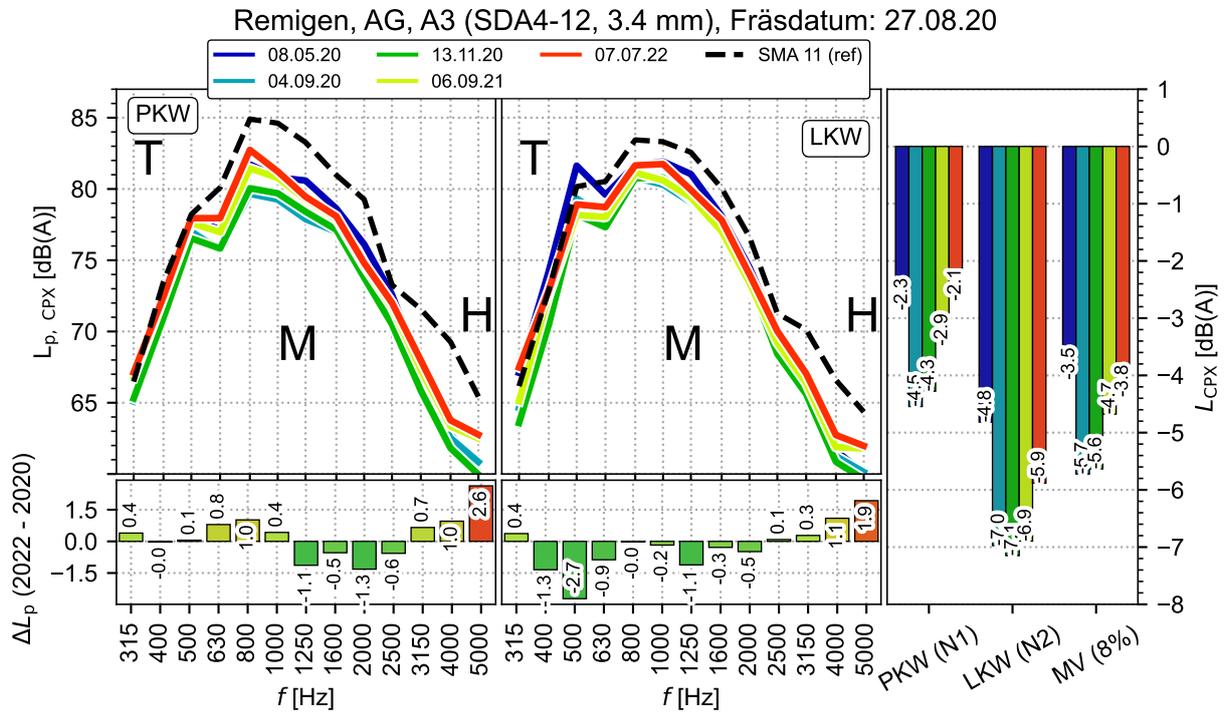


Abbildung J.8: Spektralanalyse in Remigen, A3

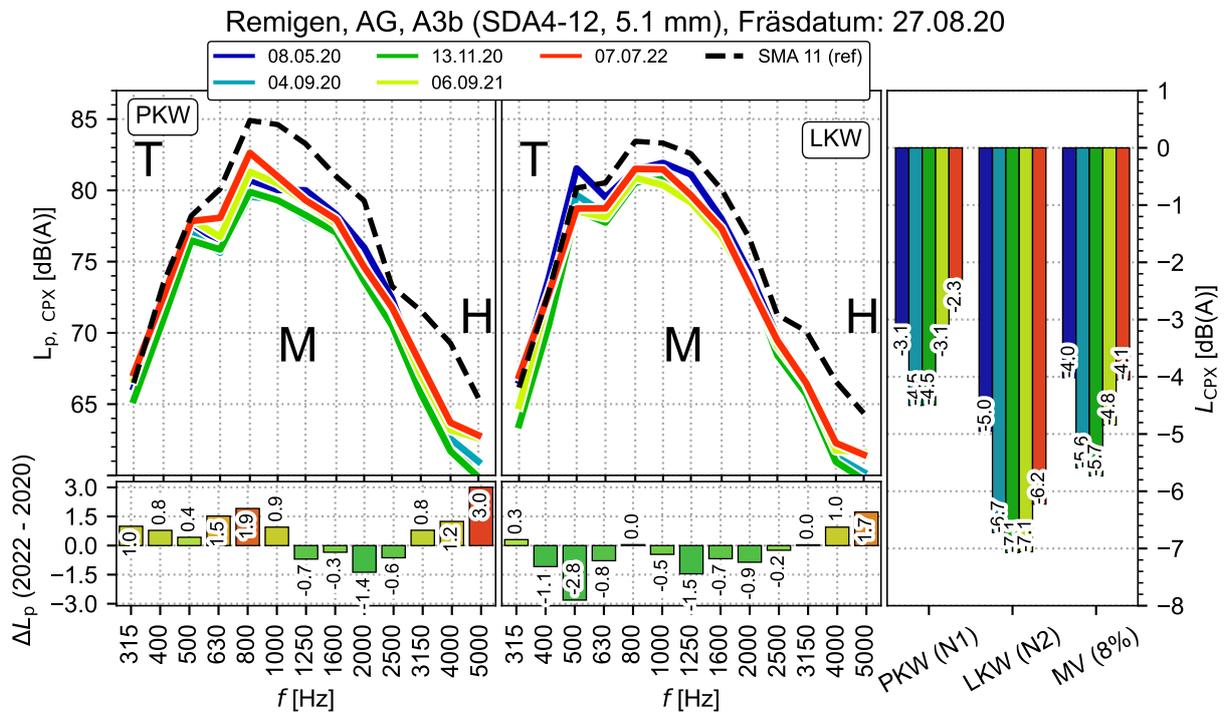


Abbildung J.9: Spektralanalyse in Remigen, A3b

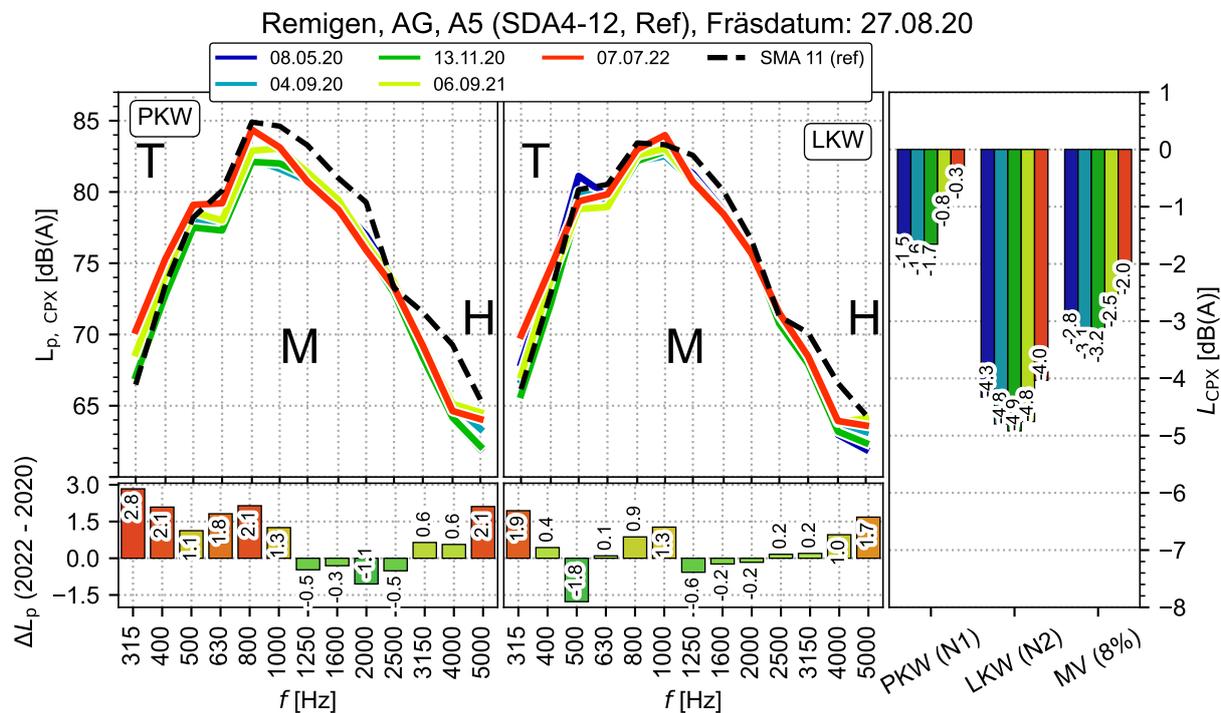


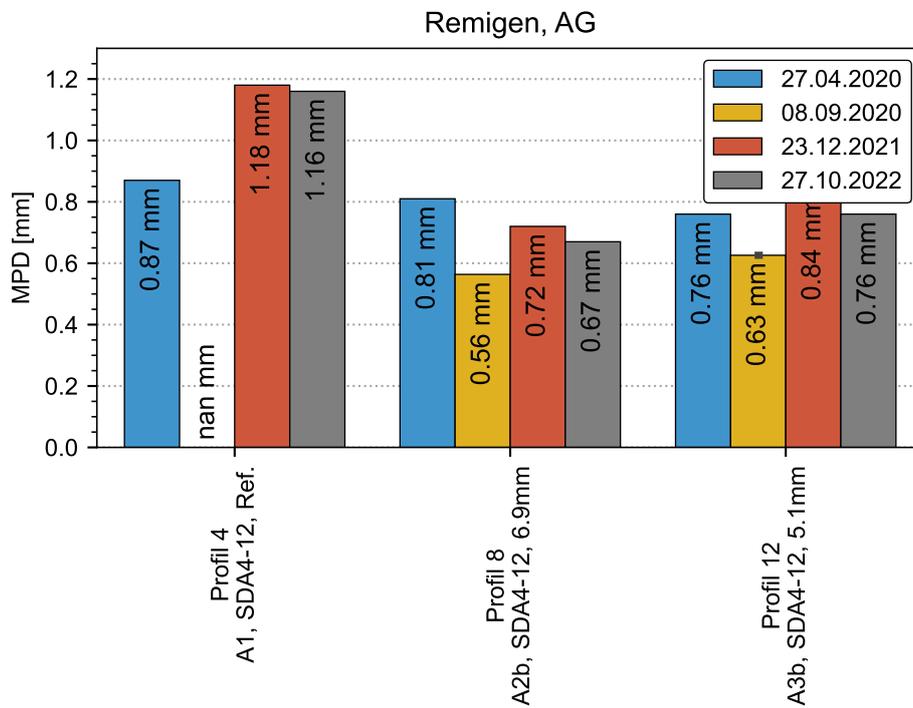
Abbildung J.10: Spektralanalyse in Remigen, A5 (Referenz)

### J.3. Texturmessungen

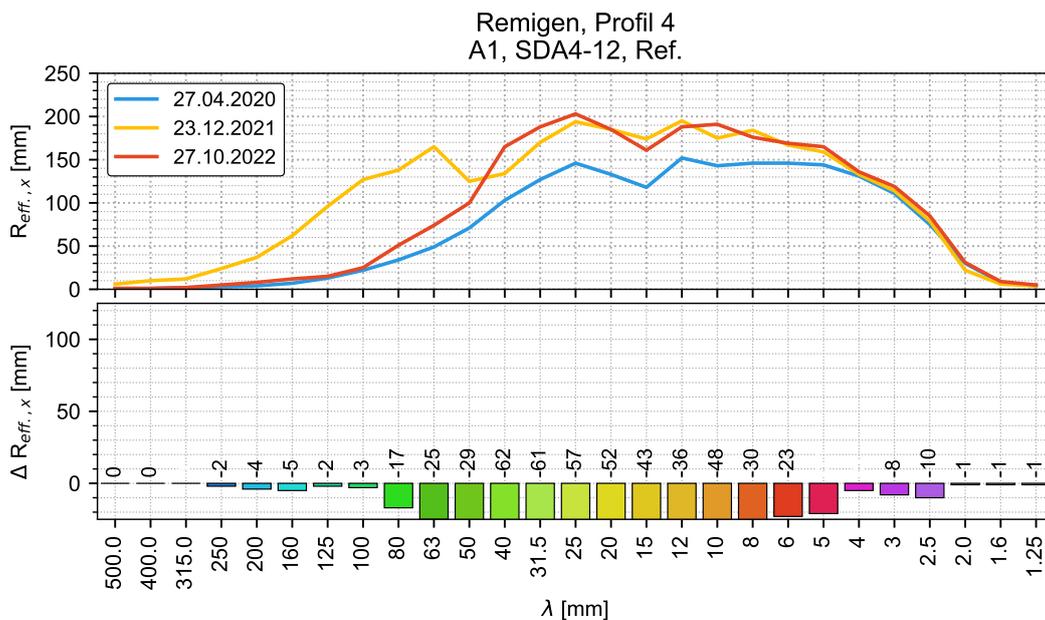
In Remigen wurden verschiedene Texturmessungen durch die IMP Bautest AG durchgeführt. Dabei wurden nicht immerdieselben Messverfahren eingesetzt. Tabelle J.2 zeigt, dass bis ins Jahr 2020 hauptsächlich Greenwood-Messungen (Dynamisches Verfahren) durchgeführt wurden. Wie sich zeigte, hat das auf die Vergleichbarkeit der Messwerte einen Einfluss.

**Tabelle J.2:** Messprogramm Texturmessungen in Remigen. G = Greenwood-Messungen (Dynamisches Verfahren). B = Laserbalken (statisches Verfahren)

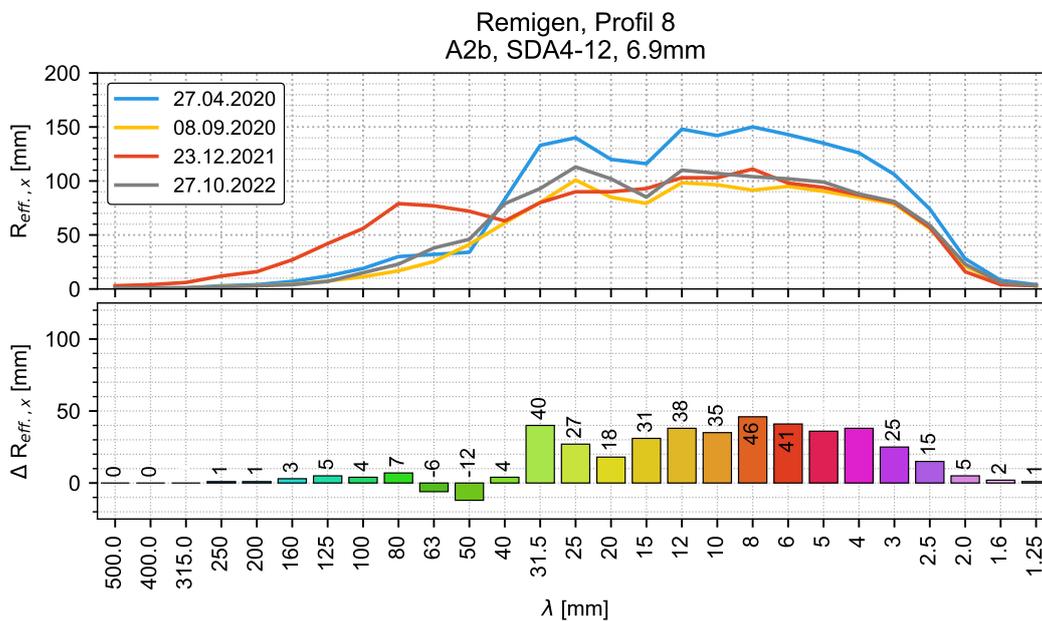
Datum	Profil 4	Profil 8	Profil 12
27.04.2020 (vorher)		G	G
20.08.2020 Schleifen			
08.09.2020		G	G
25.10.2021	B,G	B,G	B,G
20.10.2022	B,G	B,G	G
13.06.2023	-	B	B



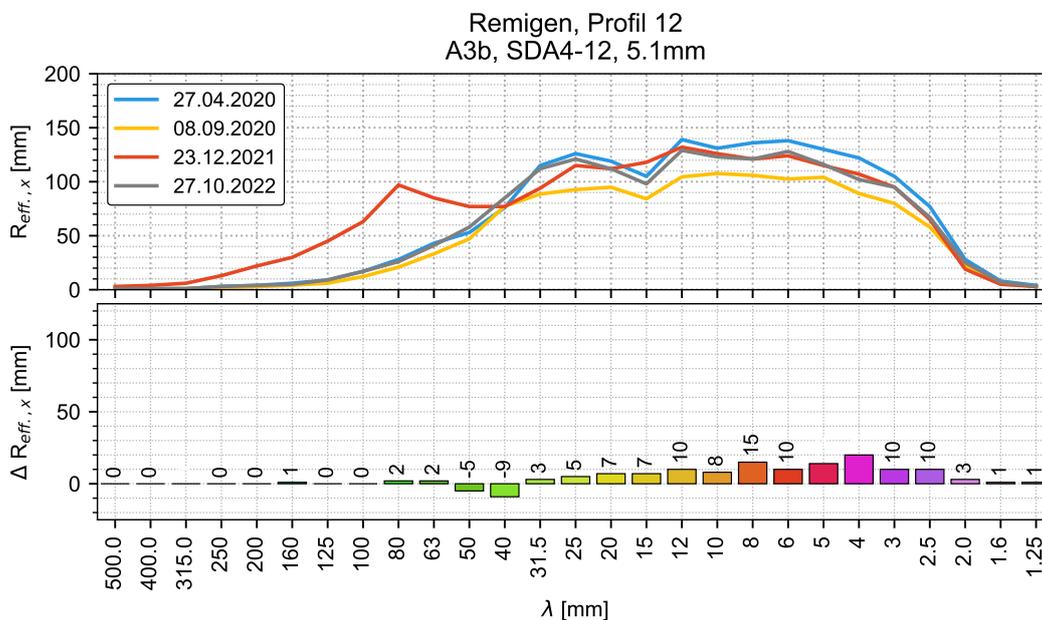
**Abbildung J.11:** Lasertexturmessung MPD in Remigen, AG für drei Profile 4, 8 und 12. In diesem Fall wurden die Greenwood-Messungen verwendet, da sie ein komplettere Zeitreihe aufweisen.



**Abbildung J.12:** Effektive Rauigkeitstiefe für Remigen (Vorher) am Profil 4

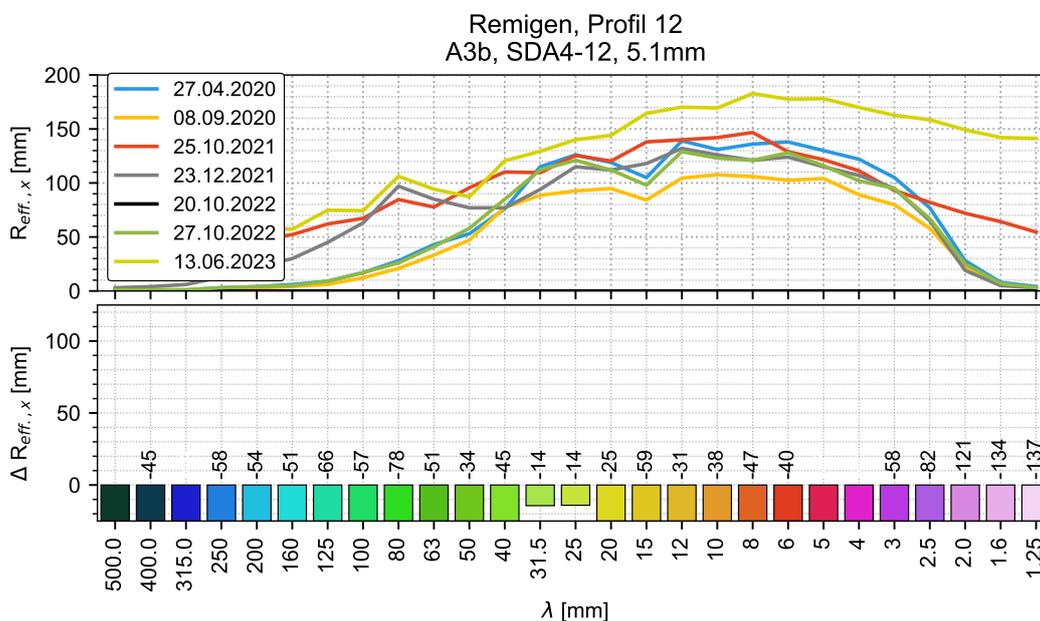


**Abbildung J.13:** Verlauf der spektralen effektiven Rauigkeitstiefe für Remigen am Profil 12 (Abschnitt A3b, SDA4-12, 5.1 mm). Gemessen mit dem Greenwood-System.



**Abbildung J.14:** Verlauf der spektralen effektiven Rauigkeitstiefe für Remigen am Profil 12 (Abschnitt A3b, SDA4-12, 5.1 mm). Gemessen mit dem Greenwood-System.

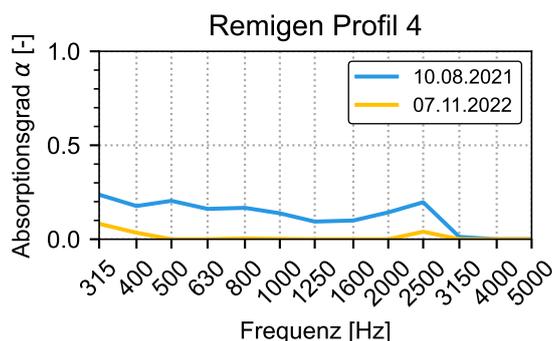
Zum Vergleich zu Abbildung J.14 ist in der folgenden Abbildung J.15 die Messwerte aller Messverfahren (Greenwood & Laserbalken).



**Abbildung J.15:** Verlauf der spektralen effektiven Rauigkeitstiefe für Remigen am Profil 12 (Abschnitt A3b, SDA4-12, 5.1 mm). Gemessen mit dem Greenwood-System.

#### J.4. Schallabsorptionsmessungen

In Remigen wurden sowohl im Jahr 2021, wie auch im Jahr 2022 Schallabsorptionsmessungen durchgeführt. Dabei entsprechen die Messtandorte den Orten der Bohrkernentnahme in Abbildung J.1. (Re-1 entspricht Profil 8 und Re-2 entspricht Profil 12). Das Profil 4 ist im unbehandelten Teil (Referenz in östlicher Fahrtrichtung gelegen).



**Abbildung J.16:** Schallabsorptionsmessungen in Remigen am Profil 4.

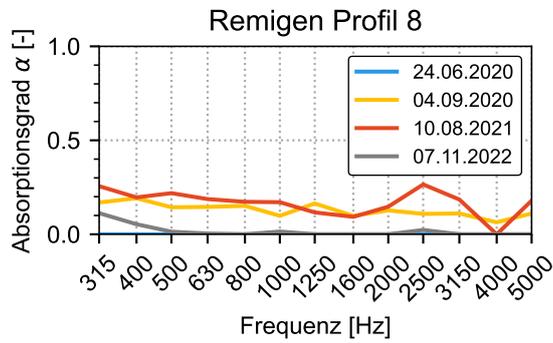


Abbildung J.17: Schallabsorptionsmessungen in Remigen am Profil 8.

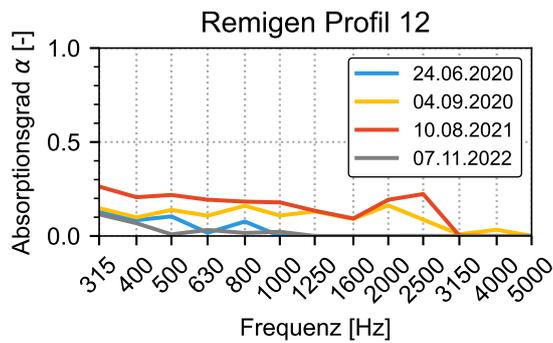


Abbildung J.18: Schallabsorptionsmessungen in Remigen am Profil 12.

## J.5. Lufttopfmessungen

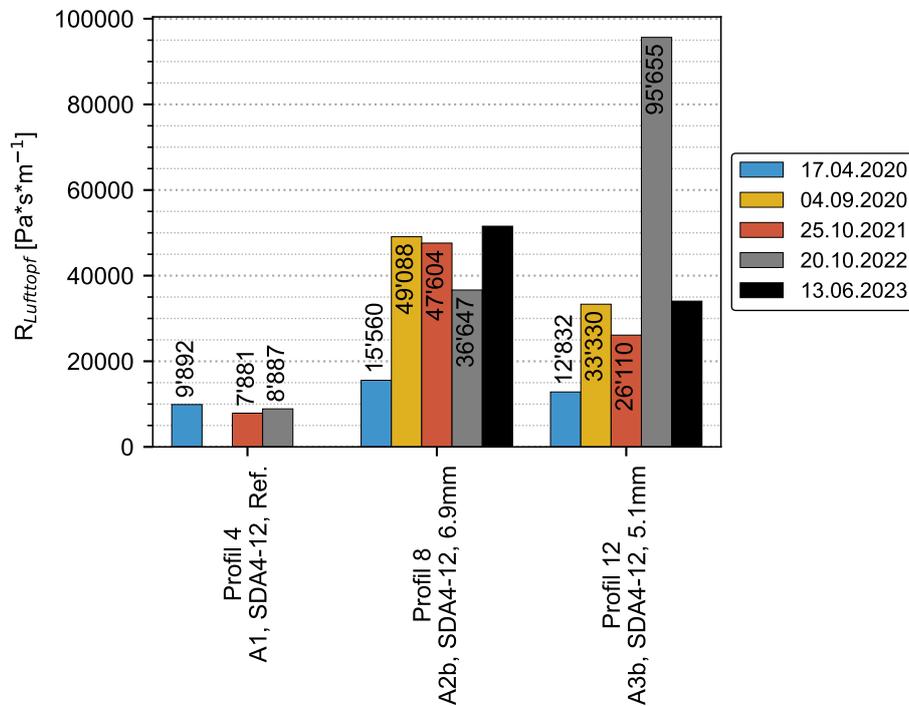


Abbildung J.19: Lufttopfmessungen in Remigen

## J.6. Bohrkernuntersuchungen

### J.6.1 AVCA

In Remigen wurden im Rahmen dieses Projekts 2 AVCA-Untersuchungen durchgeführt (Vgl. Messprogramm 2.4). Die Orte der Entnahmepunkte sind in der Karte J.1 ersichtlich und tragen folgende Bezeichnungen:

- Re-1 (Abschnitt A2b SDA4-12, 6.9 mm Schleiftiefe)
- Re-2 (Abschnitt A3b, SDA4-12, 5.1 mm Schleiftiefe)

Die folgende Tabelle J.3 zeigt eine (kurz-) Zusammenfassung der Ergebnisse. Es zeigt sich, dass an beiden Standorten eine breit verteilte Schmutzschicht über die Beläge liegt, was insgesamt die Porosität und die zugänglichen Hohlräume etwas limitiert. Grundsätzlich sind aber in beiden Fällen (Wenn auch wenig/schwach) verbundene Poren ersichtlich. Dies war bereits in der letzten Untersuchung (2020) so befunden worden. Die akustischen Werte (gemäss Tabelle J.3) deuten ebenfalls in diese Richtung, dass eventuell noch etwas von den schwach zugänglichen Poren verfügbar sein könnte. Grundsätzlich hat aber die Verschmutzung wiederum eine Abnahme im zugänglichen Hohlraum bewirkt.



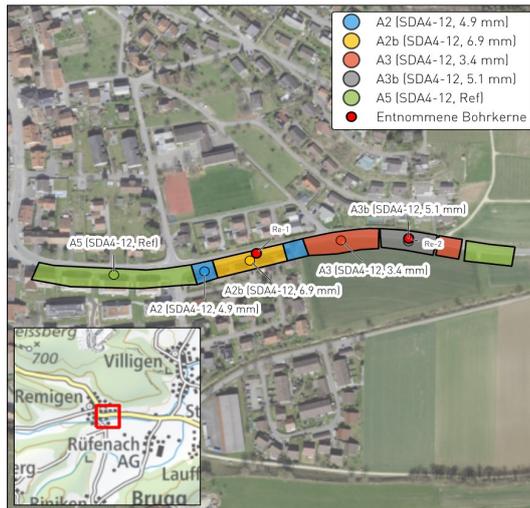
**Tabelle J.3:** Zusammenfassung AVCA für Remigen

Messpunkt	AVCA-Bezeichnung	$L_{CPX}$		Min. (zugängliche) Porosität	
		2020	2022	2020	2022
Re-1 Abschnitt A2b SDA4-12, 6.9 mm	Re-1	-5.2	-3.9	6.8% (14.5 mm)	4.8% (10.7 mm)
Re-2 Abschnitt A3b, SDA4-12, 5.1 mm	R2-2	-5.6	-4.1	5.9% (19.9 mm)	2.4% (5.4 mm)

Grolimund + Partner AG  
Bern, Aarau, Zürich, Deitingen, Neuchâtel  
www.grolimund-partner.ch

**Akustische Hohlraumanalyse (AVCA)**

Re-1



**Strasse**

Remigen, Villigerstrasse  
Richtung: Ost, Radspur Rechts

**Belagstyp**

SDA4-12, geschliffen 6.9 mm

**Entnahmepunkt**

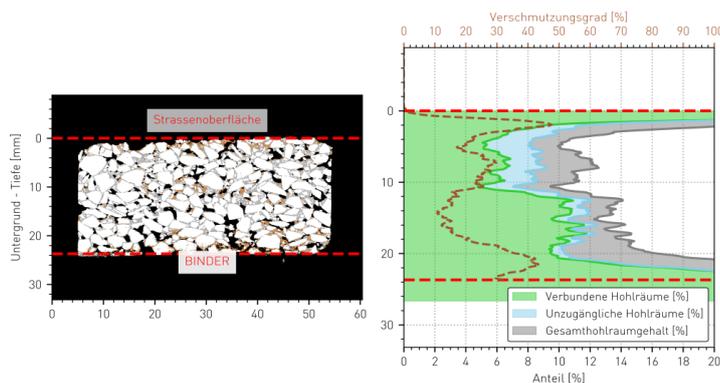
X = 2656786  
Y = 1262929  
Datum: Okt 22

**CT- Scan Analyse**

Schichtdicke: 24 mm  
Ø Hohlraumgehalt 11.5%

**Analyse zugänglicher Hohlräume**

	# zugänglicher Poren	zugänglicher HR-Gehalt [%]	Verschmutzungsgrad [%]	Gesamthohlraumgehalt [%]
Unterhalb Oberflächenporen	173	5.7%	22%	11%
10 mm unter Fahrbahn	252	5.9%	24%	11%
20 mm unter Fahrbahn	302	9.5%	36%	16%
30 mm unter Fahrbahn	0	0.0%	0%	0%

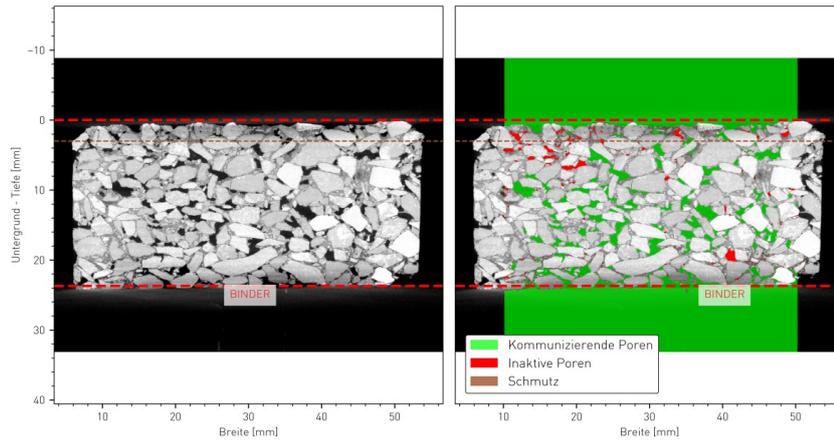


Grolimund + Partner AG  
Bern, Aarau, Zürich, Deitingen, Neuchâtel  
www.grolimund-partner.ch

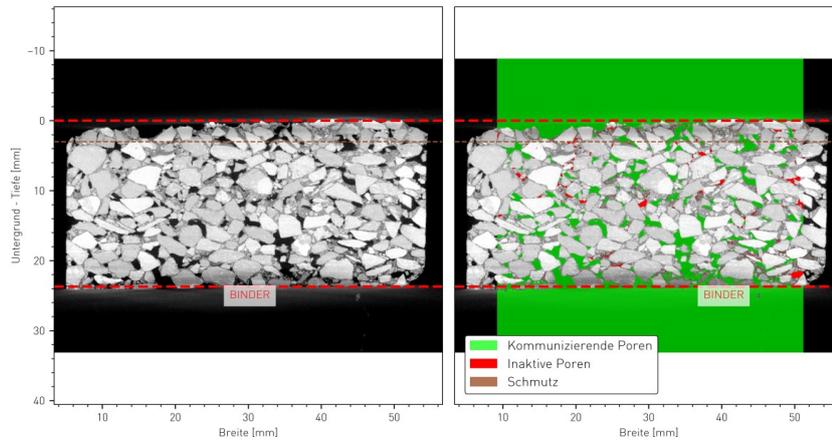
++ **G+P**  
INGENIEURE

Querschnittsbilder:

Schnitt-Nr: 800 (24 mm)



Schnitt-Nr: 1000 (30 mm)



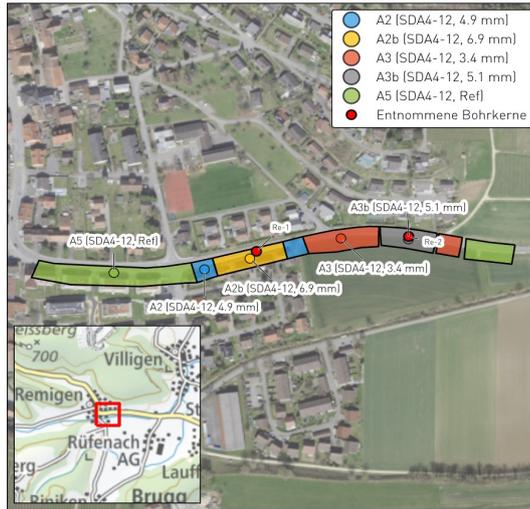
**Kommentare:**

- Gesamthohlraumgehalt am Bohrkern beträgt 11.5%
- Keine verbundenen Poren bis zur Deckschicht
- 1 cm unterhalb der Fahrbahn sind mit 5.9 % zugänglicher Poren eine gut verbundene Schicht mit der Oberfläche vorhanden; Der Luftaustausch mit den tieferen Schichten kann stattfinden

Grolimund + Partner AG  
Bern, Aarau, Zürich, Deitingen, Neuchâtel  
www.grolimund-partner.ch

**Akustische Hohlraumanalyse (AVCA)**

Re-2



**Strasse**

Remigen, Villigerstrasse  
Richtung: Ost, Radspur Rechts

**Belagstyp**

SDA4-12, geschliffen 6.9 mm

**Entnahmepunkt**

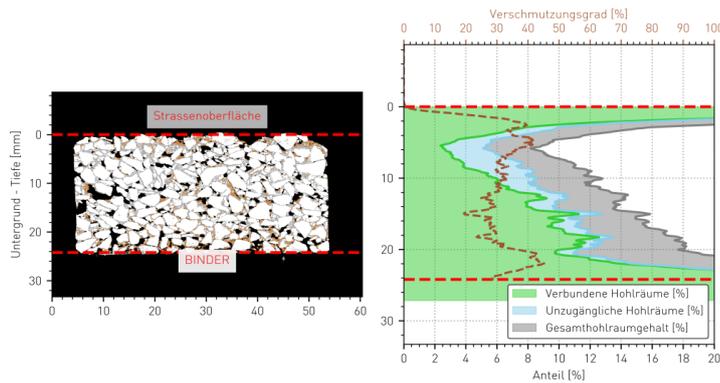
X = 2656942  
Y = 1262945  
Datum: Okt 22

**CT- Scan Analyse**

Schichtdicke: 24 mm  
Ø Hohlraumgehalt 11.2%

**Analyse zugänglicher Hohlräume**

	# zugänglicher Poren	zugänglicher HR-Gehalt [%]	Verschmutzungsgrad [%]	Gesamthohlraumgehalt [%]
Unterhalb Oberflächenporen	198	5.3%	35%	12%
10 mm unter Fahrbahn	227	6.0%	32%	13%
20 mm unter Fahrbahn	335	10.2%	36%	18%
30 mm unter Fahrbahn	0	0.0%	0%	0%

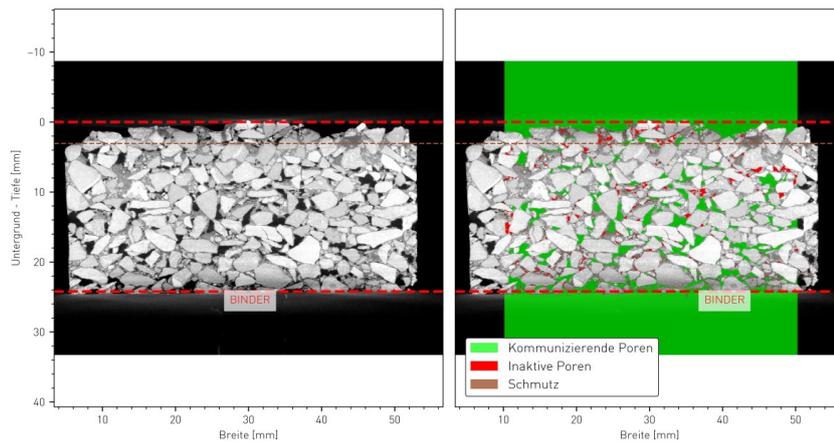


Grolimund + Partner AG  
Bern, Aarau, Zürich, Deitingen, Neuchâtel  
www.grolimund-partner.ch

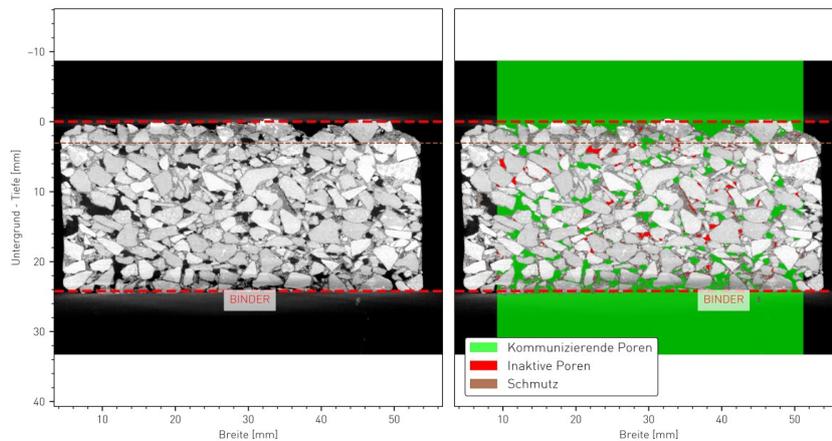
++ **G+P**  
INGENIEURE

Querschnittsbilder:

Schnitt-Nr: 800 (24 mm)



Schnitt-Nr: 1000 (30 mm)



**Kommentare:**

- Gesamthohlraumgehalt am Bohrkern beträgt 11.2%
- Keine verbundenen Poren bis zur Deckschicht
- 1 cm unterhalb der Fahrbahn sind mit 6 % zugänglicher Poren eine gut verbundene Schicht mit der Oberfläche vorhanden; Der Luftaustausch mit den tieferen Schichten kann stattfinden

## K. Romont, FR

Tabelle K.1: Abschnitte in Romont

Belag	Abschnitt	Fräsdatum	Fahrbahn	Länge	Abtrag	Bezeichnung in Plots
Famsi 4 (2011)	A1	06.11.2018	Rg Nord+Süd	2 x 535 m	3 mm (1x WZb)	A1 (Famsi 4, 3 mm)

### K.1. Übersichtskarte

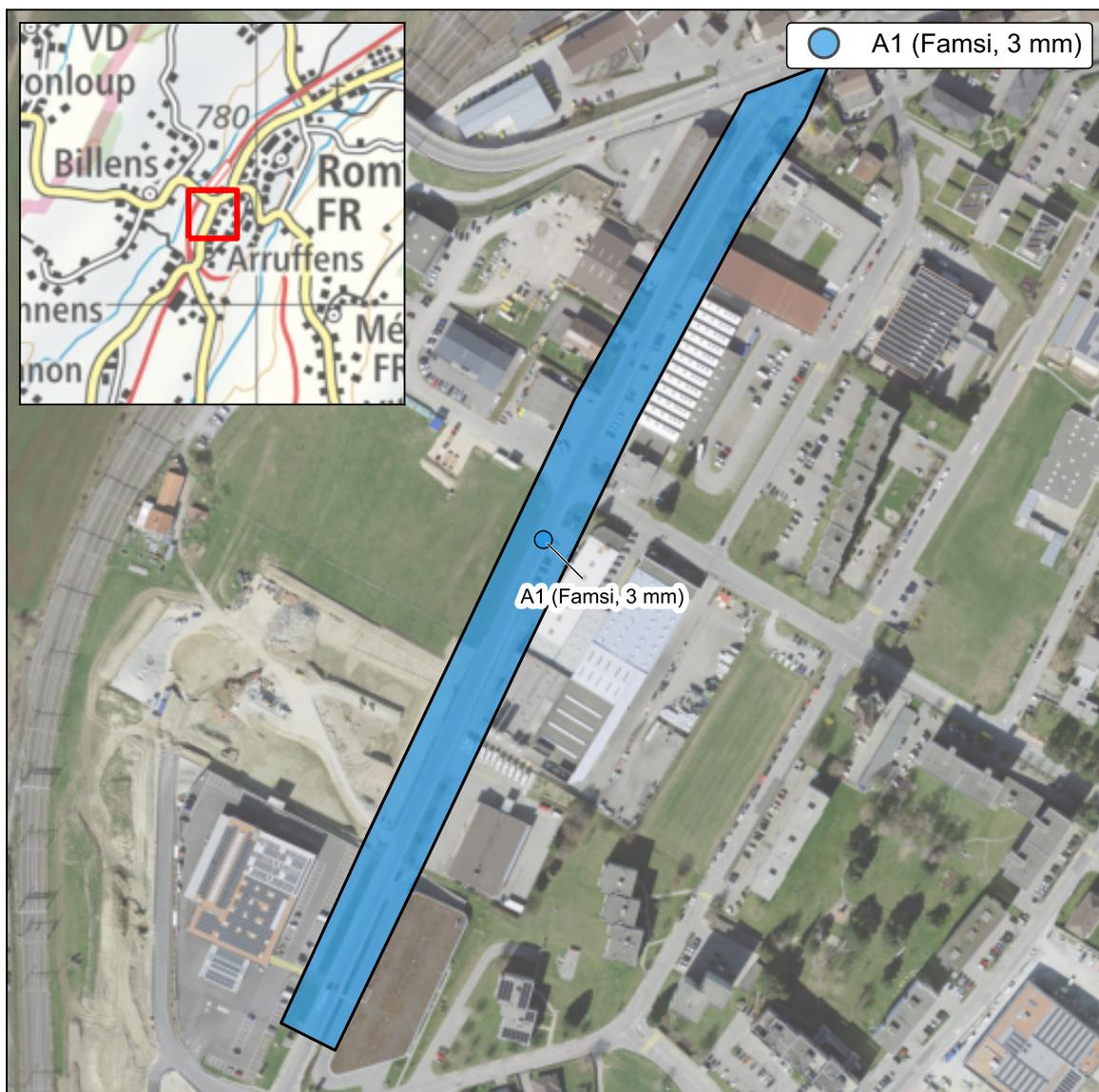
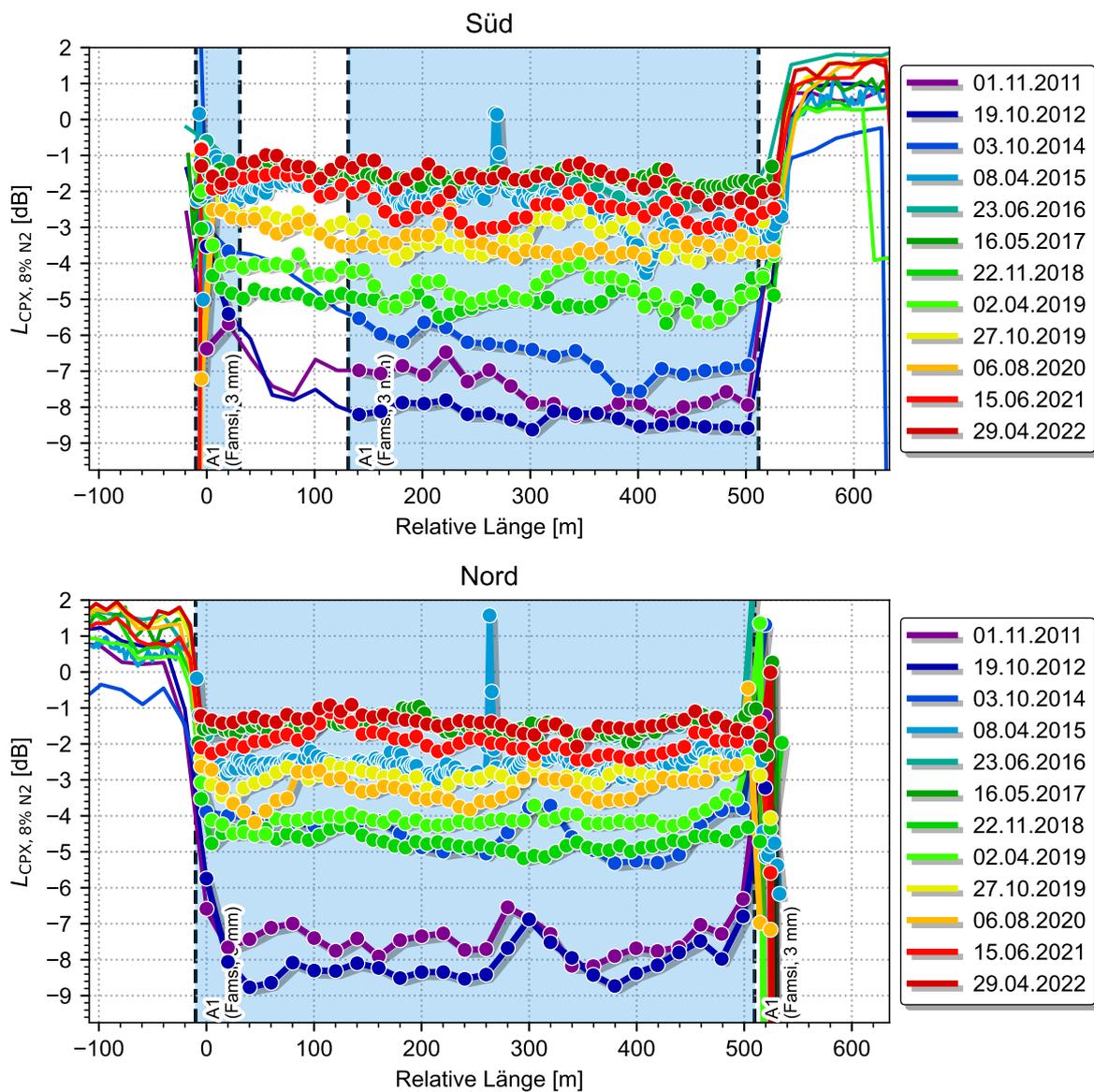


Abbildung K.1: Übersichtskarte Romont mit Lage der Abschnitte

## K.2. Akustische Resultate

### K.2.1 CPX-Streckenverlauf



**Abbildung K.2:** Verlauf der akustischen Belagsgüte (Mischverkehr mit 8% N2-Anteil) in beiden Fahr-richtungen in Romont, FR. Das Schleifdatum war an dieser Strecke der 06.11.2018.

### K.2.2 CPX- Zeitverlauf

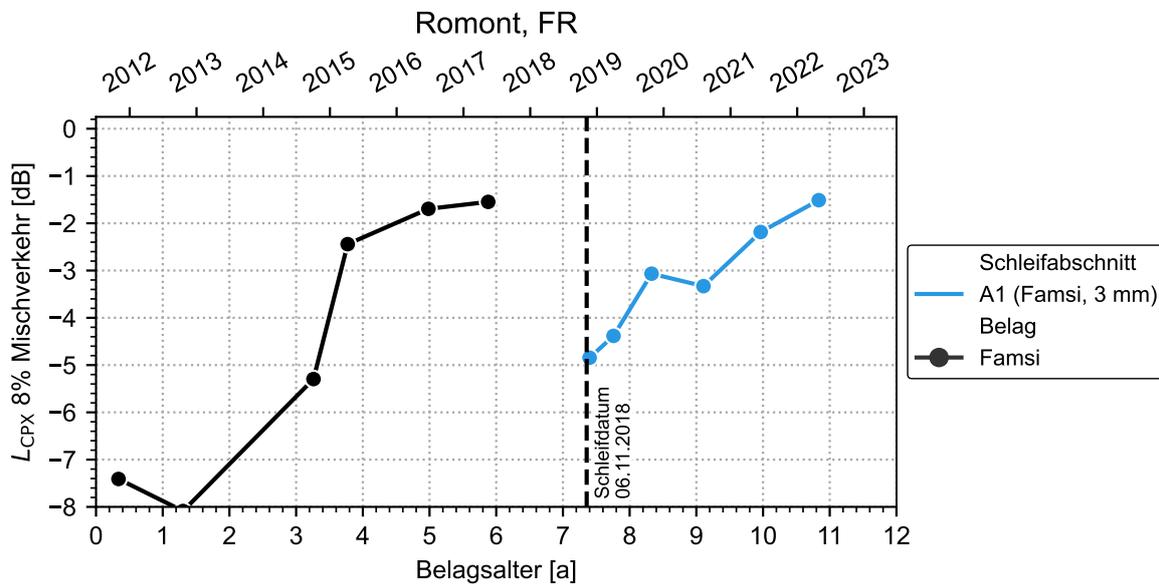


Abbildung K.3: Wirkung der Schleifmassnahmen Romont, FR

### K.2.3 Akustische Regeneration

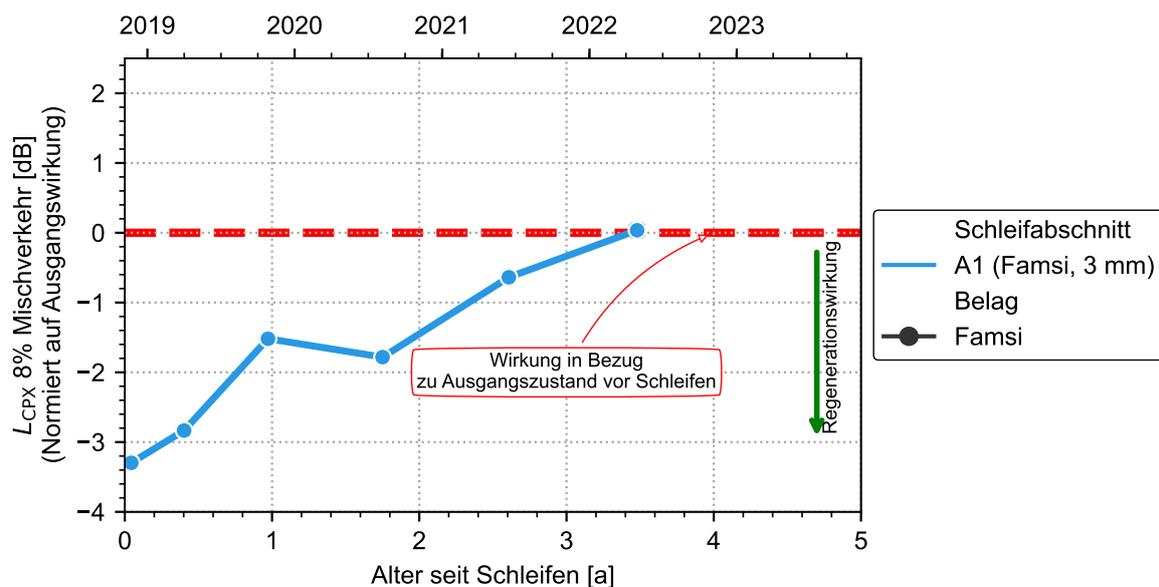


Abbildung K.4: Streckenverlauf Romont, FR

### K.2.4 Akustische Wirkung

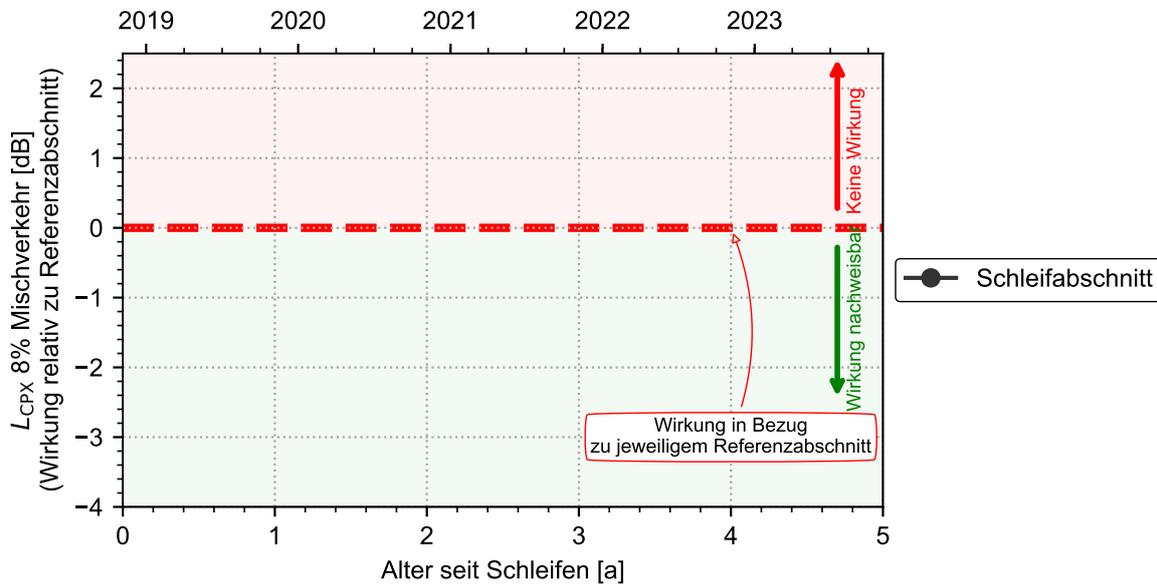


Abbildung K.5: Wirkung relativ zu Referenzabschnitt

### K.2.5 Spektralanalyse

Bei den Spektralanalysen wird jeweils die spektrale Veränderung der gemessenen CPX-Pegel im Zeitraum von der letzten Messung vor der Schleifmassnahme gezeigt. In den Abbildungen wird unterschieden zwischen den PKW und LKW Messreifen. Ebenfalls werden die Gesamtpegel im rechten Teil ebenfalls für PKW, LKW und den Mischverkehr (N2-Anteil von 8%) gezeigt.

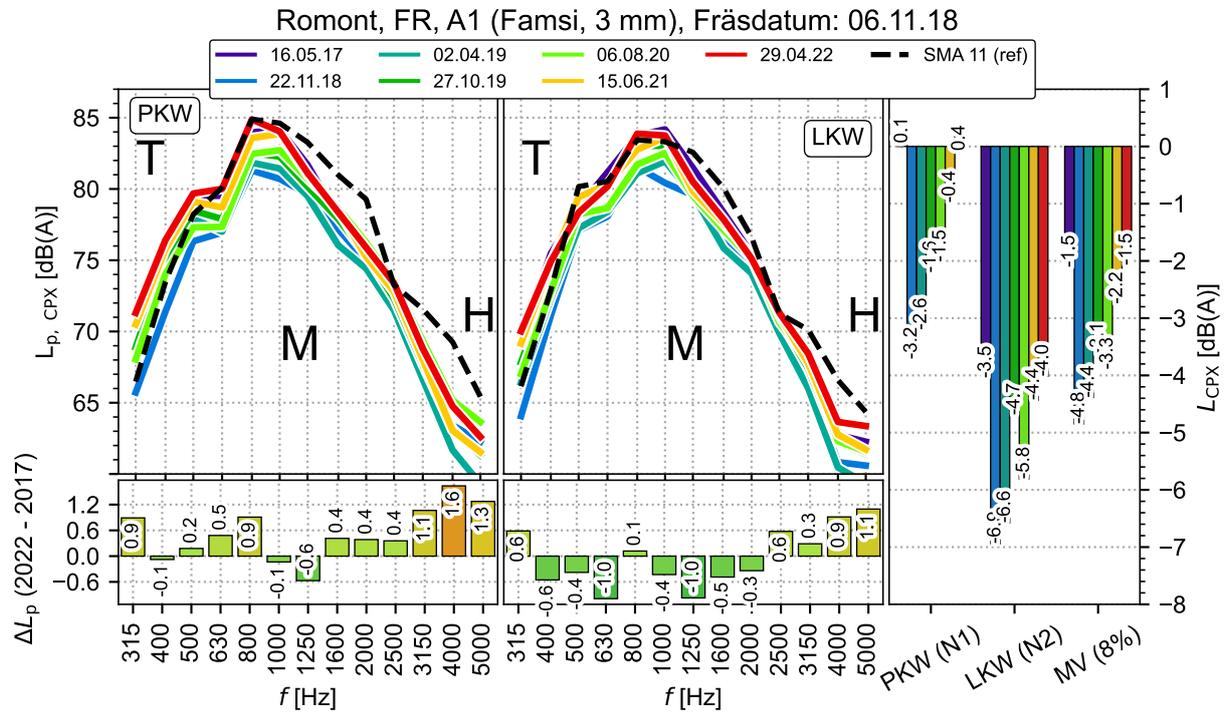


Abbildung K.6: Spektralanalyse in Romont

## L. Rüthi, SG

**Tabelle L.1:** Abschnitte in Rüthi, SG.

Belag	Abschnitt	Fräsdatum	Fahrbahn	Länge	Abtrag	Bezeichnung in Plots
SDA 8 A (2014)	A1	25.08.2020	Rg Nord	100 m	1.1 mm (1x WZb)	A1 (SDA 8 A, 1.1 mm)
	A2	25.08.2020	Rg Nord	100 m	0.7 mm (1x WZb/fast)	A2 (SDA 8 A, 0.7 mm)
	A3	25.08.2020	Rg Süd	100 m	2.5 mm (2x WZb)	A3 (SDA 8 A, 2.5 mm)
	A4	25.08.2020	Rg Süd	100 m	4.1 mm (3x WZb)	A4 (SDA 8 A, 4.1 mm)
	Referenz			Rg Nord+Süd	2 x 250 m	ungeschliffen

### L.1. Übersichtskarte

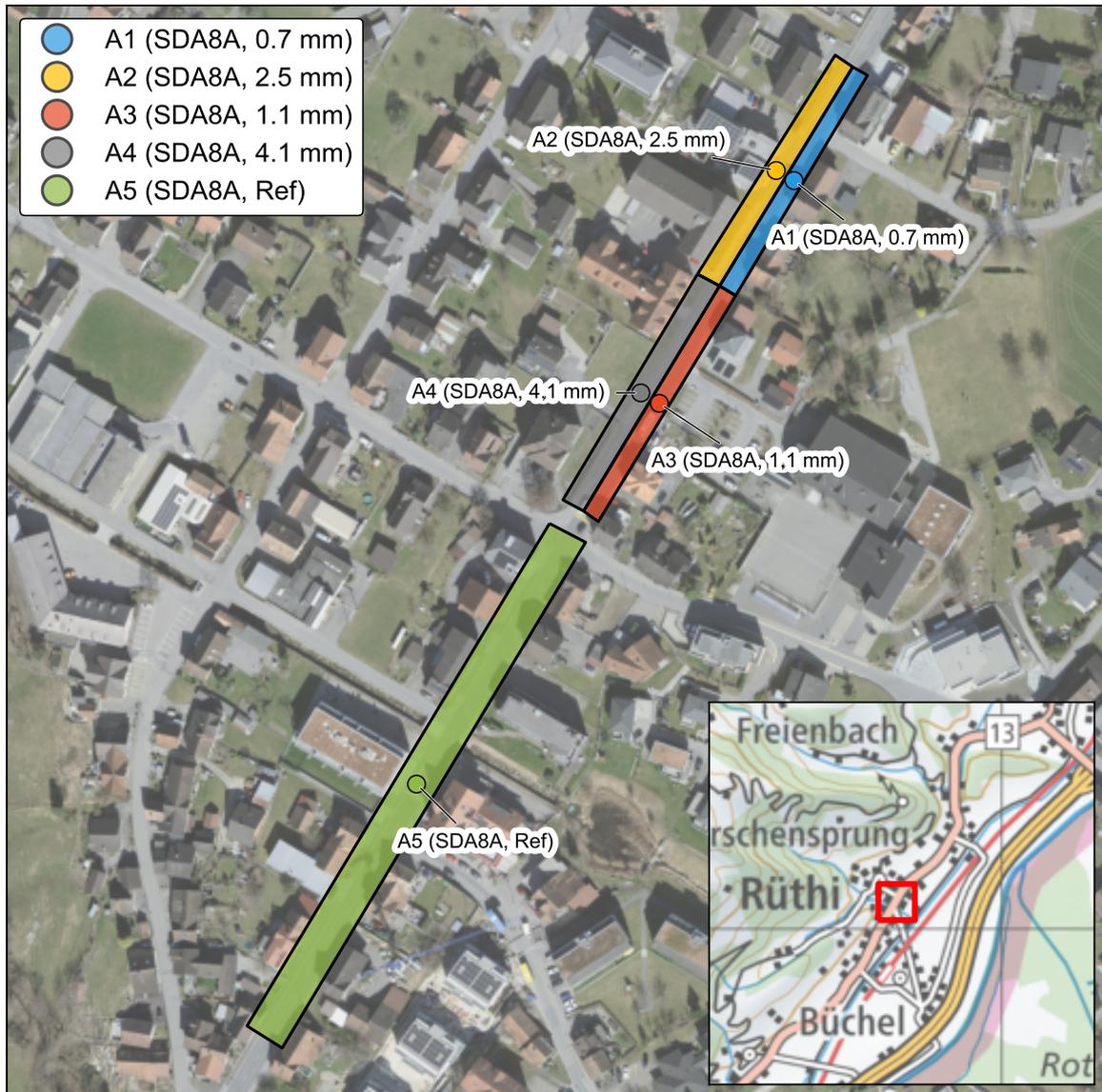


Abbildung L.1: Übersichtskarte Rüthi, SG mit Lage der Abschnitte

## L.2. Akustische Resultate

### L.2.1 CPX- Zeitverlauf

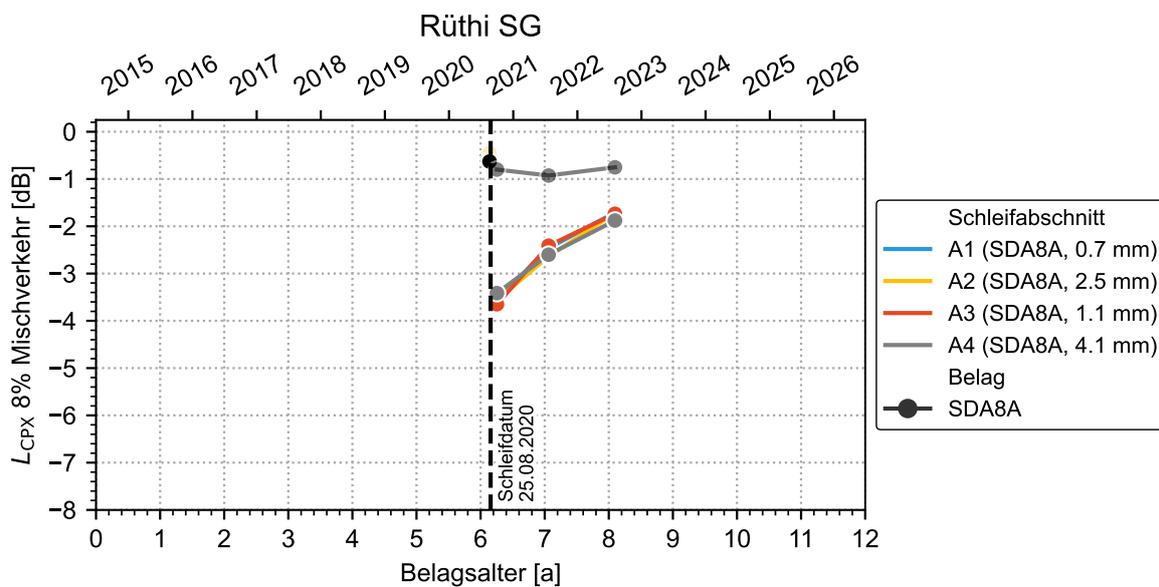


Abbildung L.2: Wirkung der Schleifmassnahmen Ruethi, SG

## L.2.2 Akustische Regeneration

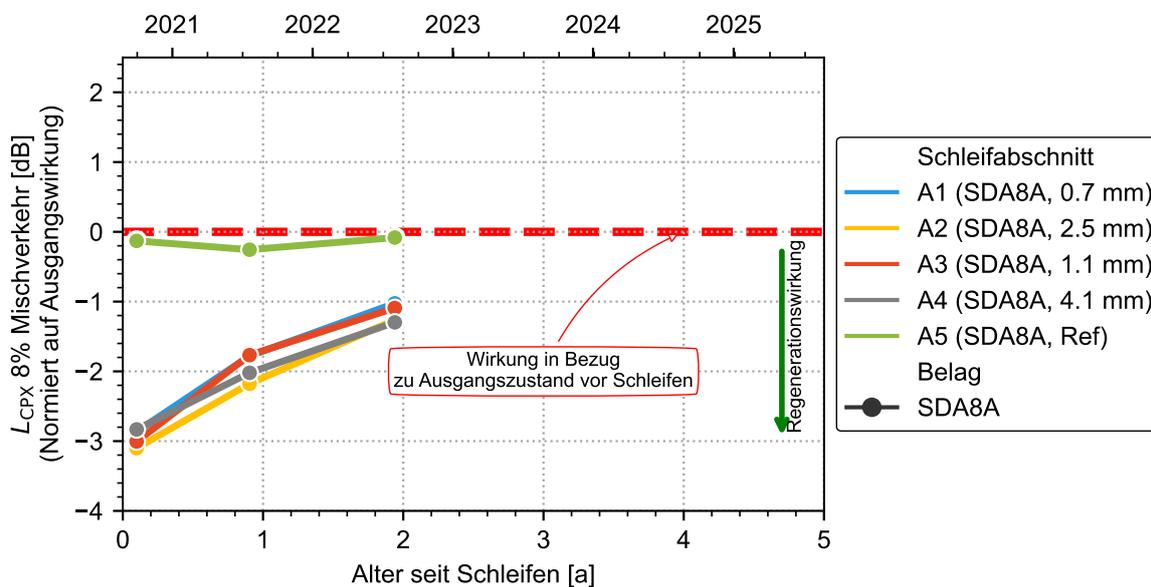


Abbildung L.3: Streckenverlauf Rüthi, SG

## L.2.3 Akustische Wirkung

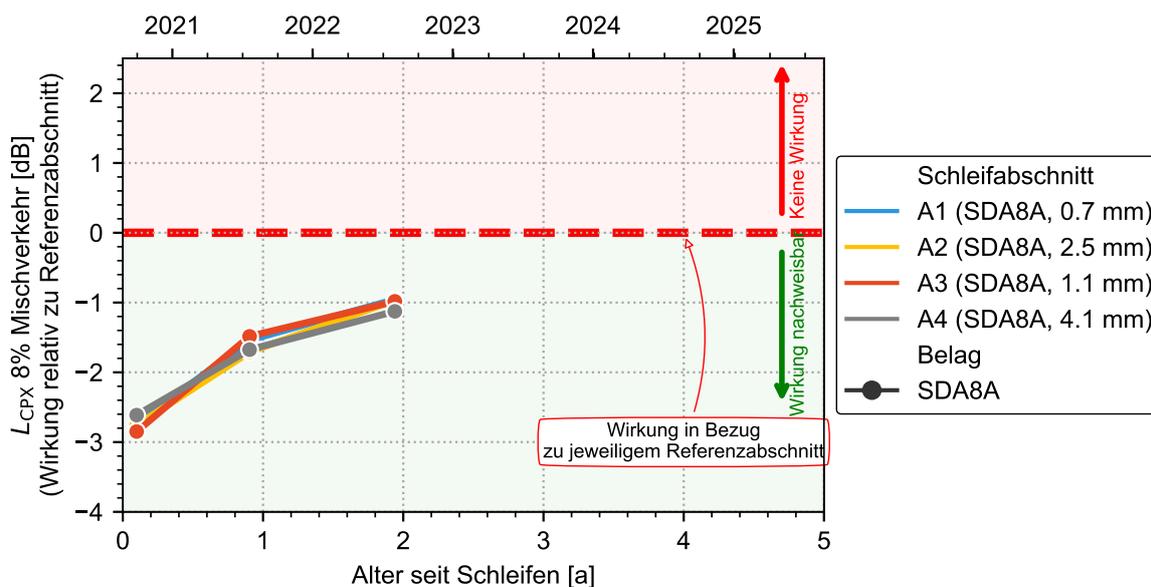


Abbildung L.4: Wirkung relativ zu Referenzabschnitt

### L.2.4 Spektralanalyse

Bei den Spektralanalysen wird jeweils die spektrale Veränderung der gemessenen CPX-Pegel im Zeitraum von der letzten Messung vor der Schleifmassnahme gezeigt. In den Abbildungen wird unterschieden zwischen den PKW und LKW Messreifen. Ebenfalls werden die Gesamtpegel im rechten Teil ebenfalls für PKW, LKW und den Mischverkehr (N2-Anteil von 8%) gezeigt.

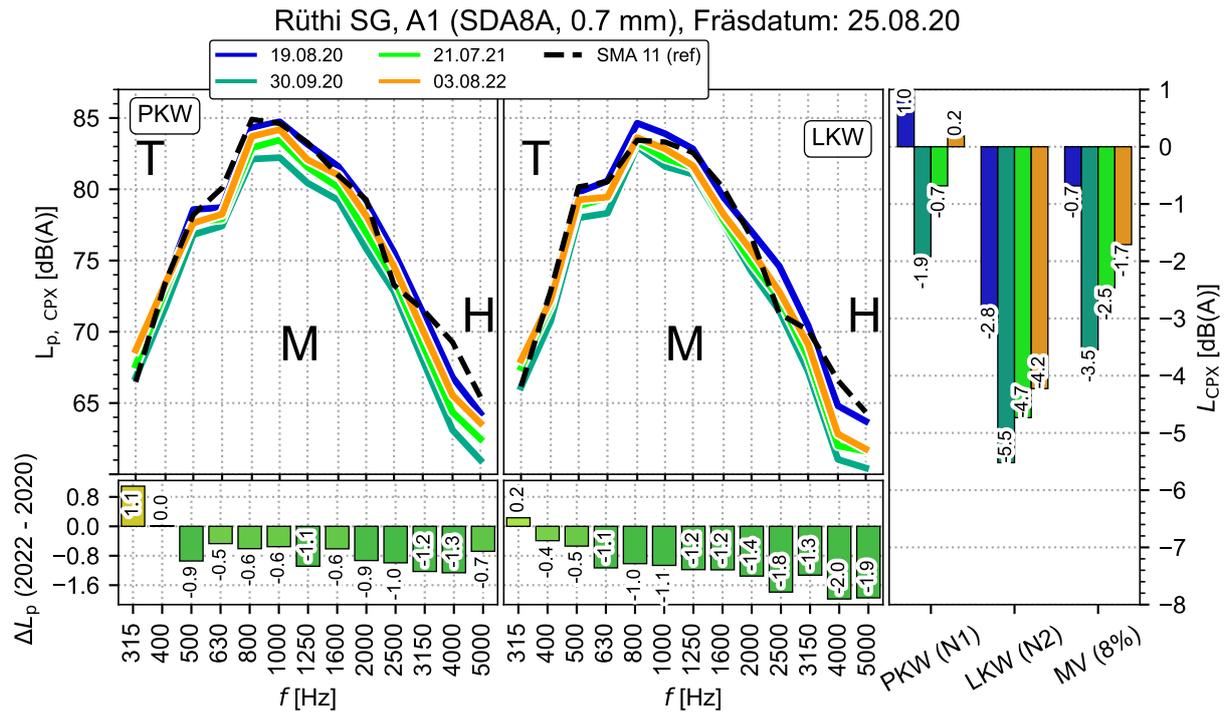


Abbildung L.5: Spektralanalyse in Rüthi, A1

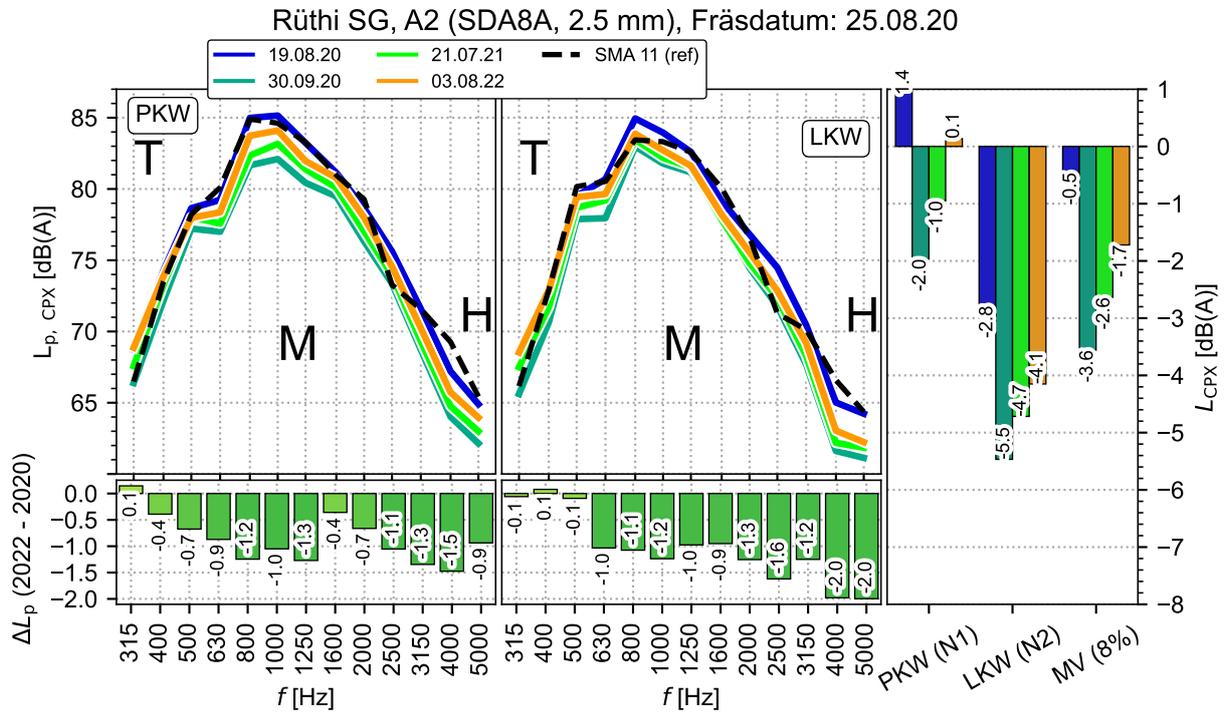


Abbildung L.6: Spektralanalyse in Rüthi, A2

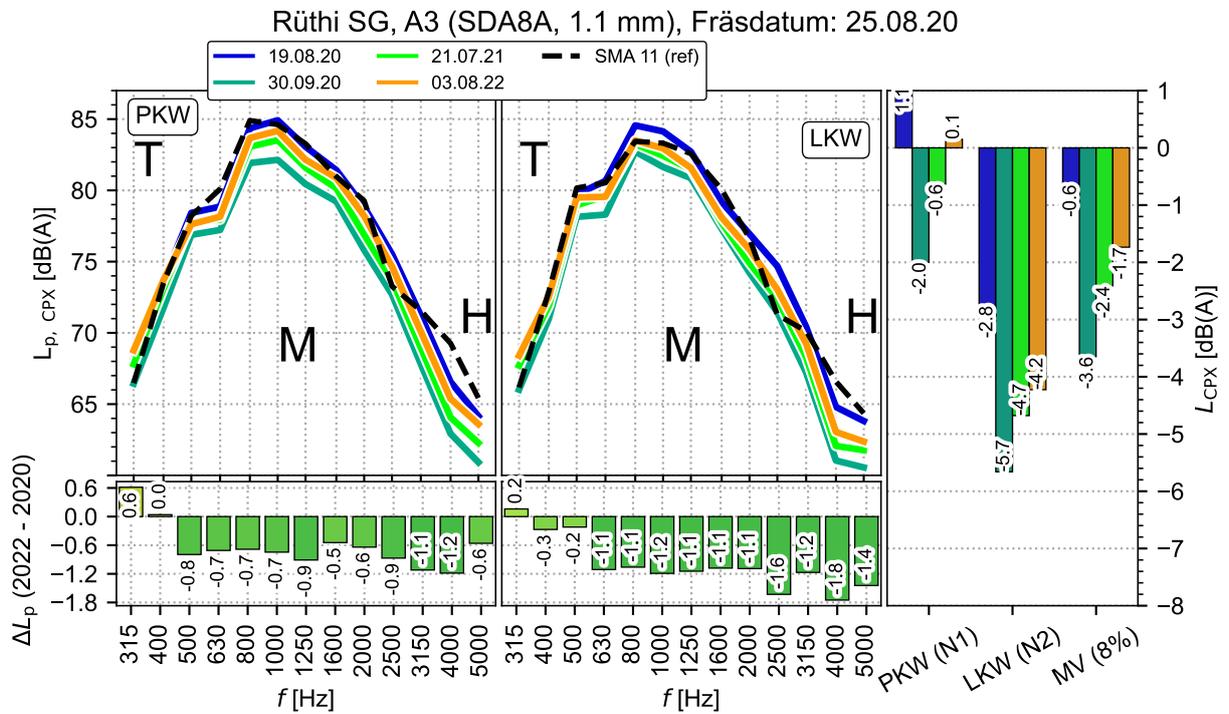


Abbildung L.7: Spektralanalyse in Rüthi, A3

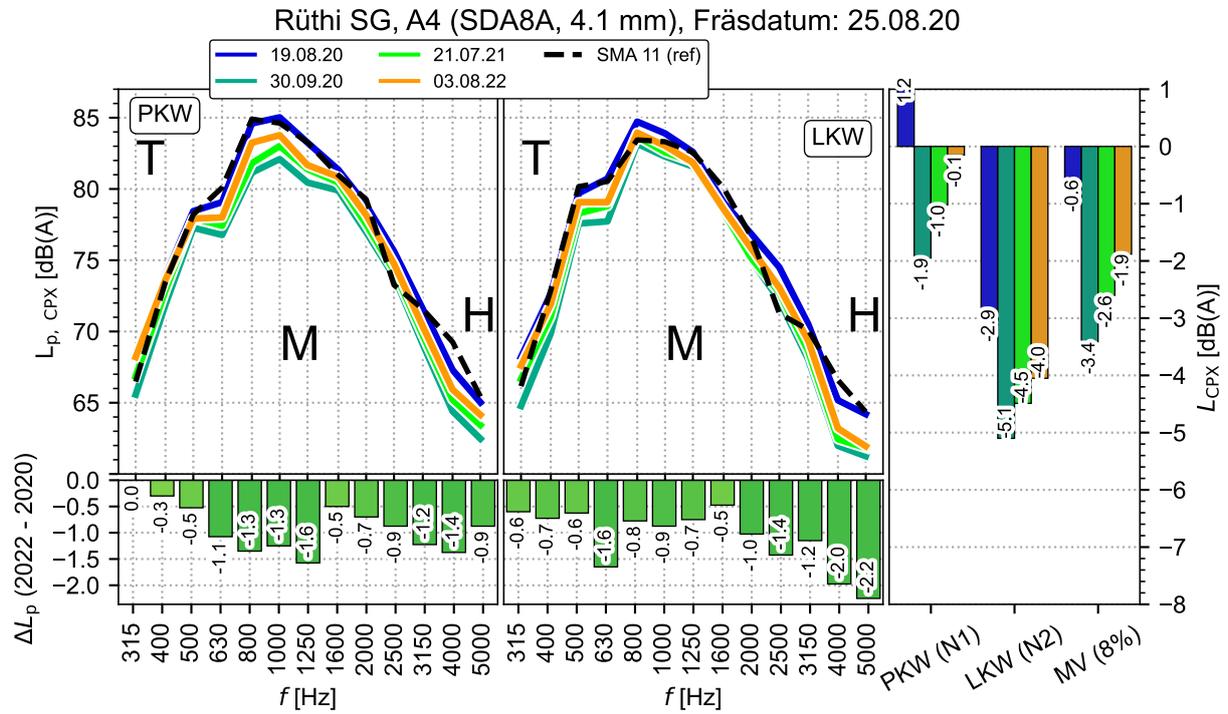


Abbildung L.8: Spektralanalyse in Rüthi, A4

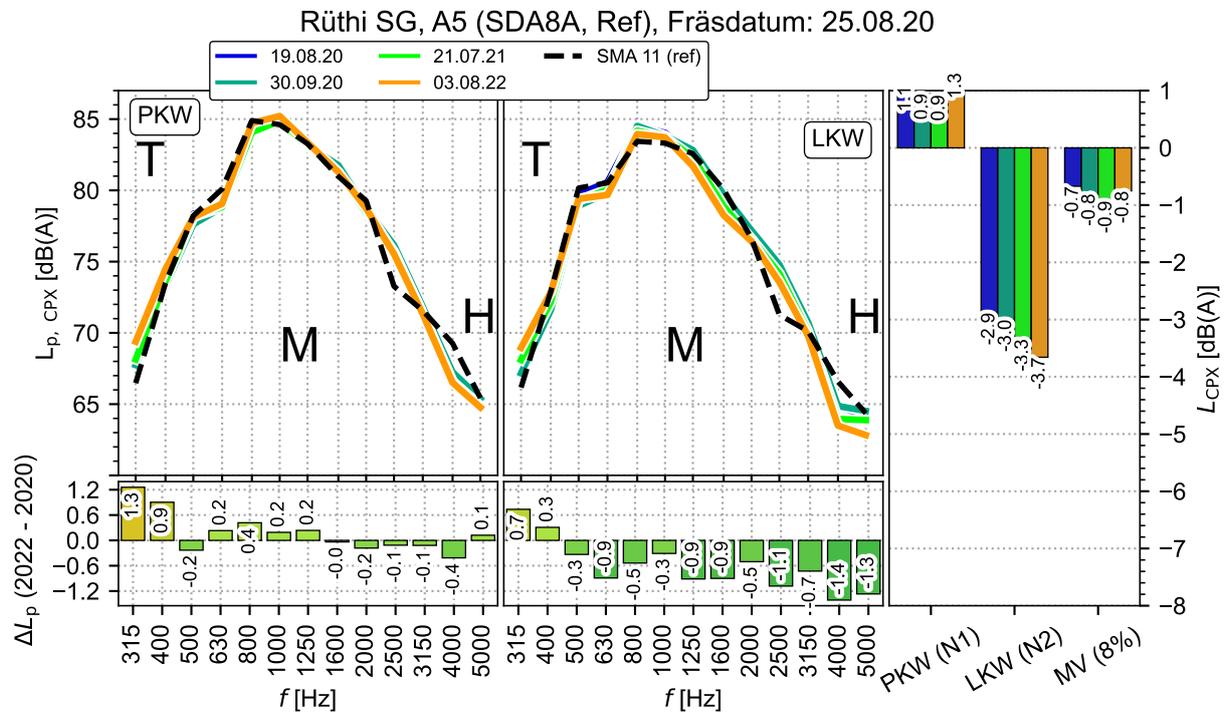


Abbildung L.9: Spektralanalyse in Rüthi, A5

### L.3. Texturanalysen

Für Rüthi, SG zeigt sich in Bezug auf die MPD-Werte L.10 unmittelbar nach der Schleifmassnahme eine deutliche Reduktion in den MPD -Werte. Die Entwicklung der Abschnitte hinsichtlich ihrer mittleren Profiltiefe ist allerdings sehr unterschiedlich. So ist beim Abschnitt auf MP2 (0.7 mm Abtrag) im Jahr 2022 eine sehr starke Zunahme der Profiltiefe zu verzeichnen. Hingegen weisen die Abschnitte MP3 & MP4 noch deutlich tiefere MPD-Werte aus im Vergleich zum Ausgangszustand vor der Schleifmassnahme. Allgemein scheint sich zu zeigen, dass an diesem Standort eine erhöhte Schleiftiefe die Texturparameter nachhaltiger zu prägen scheint. Denn auch Messpunkt 1 (Abtragen 1.1 mm) befindet sich gemäss L.10 bereits wieder sehr nahe am Ausgangszustand.

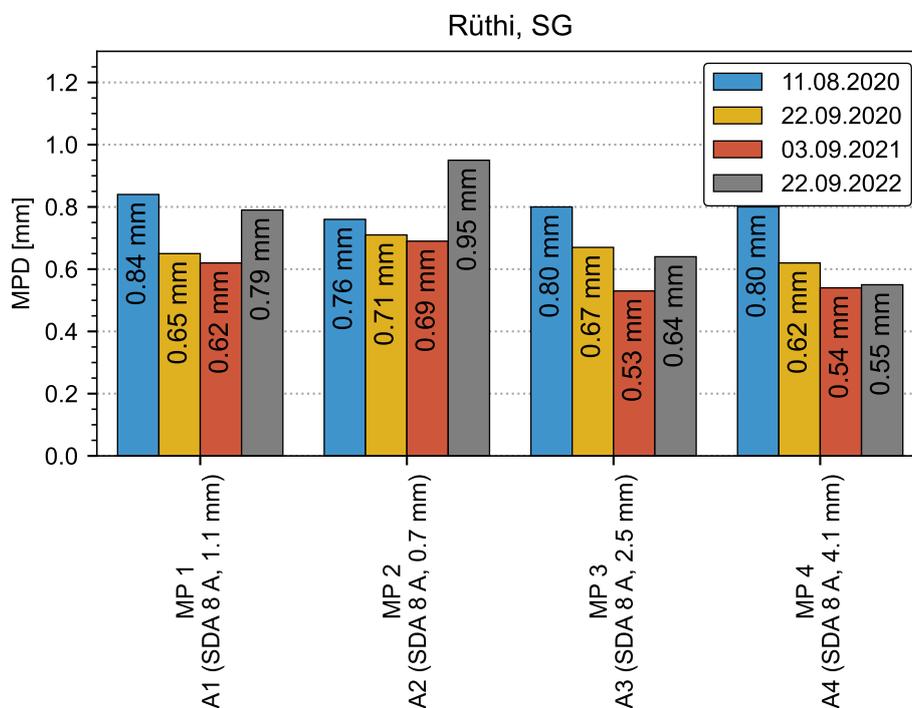


Abbildung L.10: Mittlere Profiltiefen

#### L.3.1 Spektralanalysen

Die Beobachtungen aus dem vorhergehenden Kapitel lassen sich auch übertragen auf die spektrale Rauigkeitstiefe. So weisen die Messpunkte MP3 & MP4 nach den 2 Jahren noch die besseren Texturparametergrößen auf.

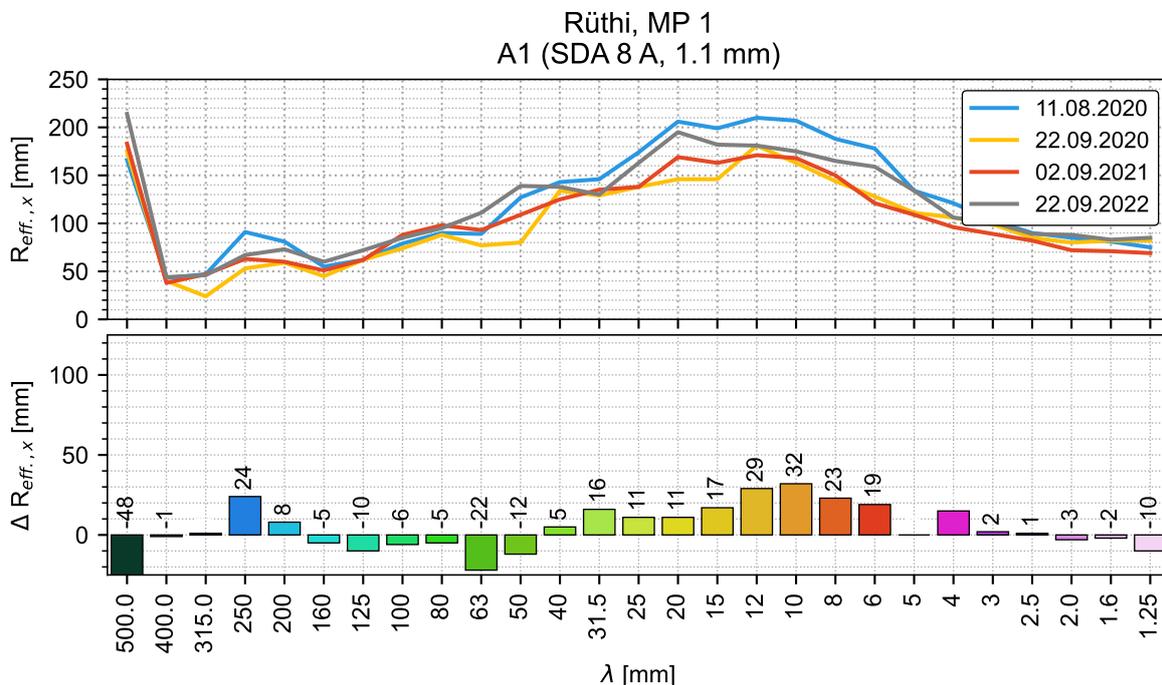


Abbildung L.11: Spektralanalysen Texturwellenlänge MP1.

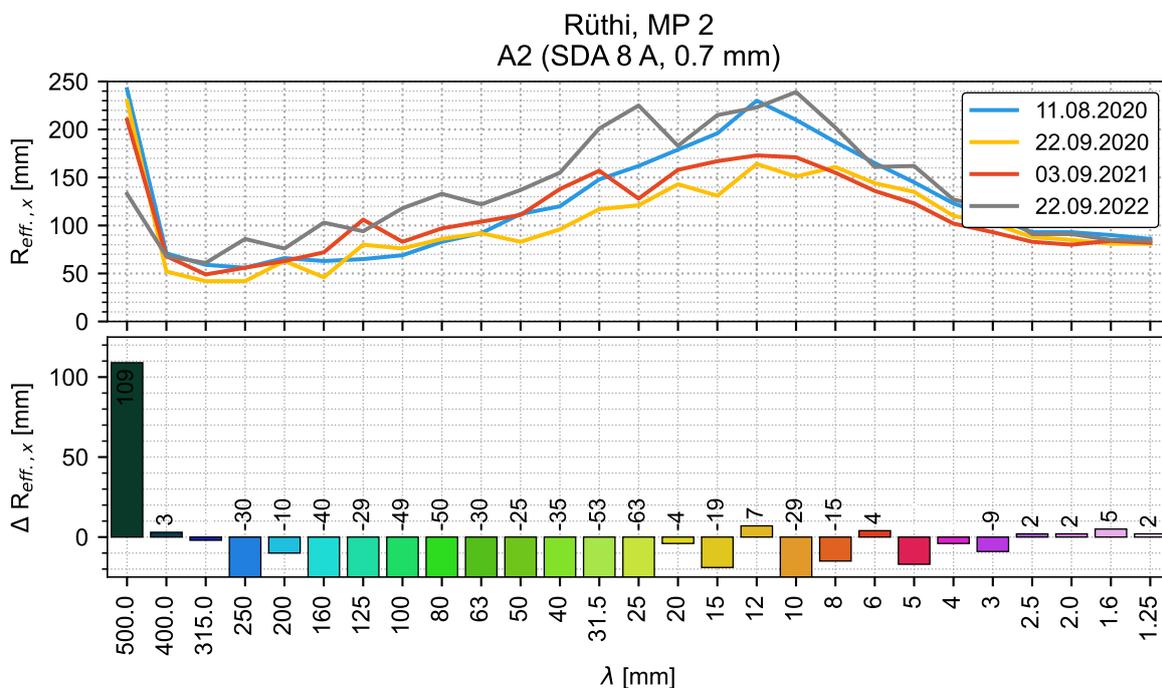


Abbildung L.12: Spektralanalysen Texturwellenlänge MP2.

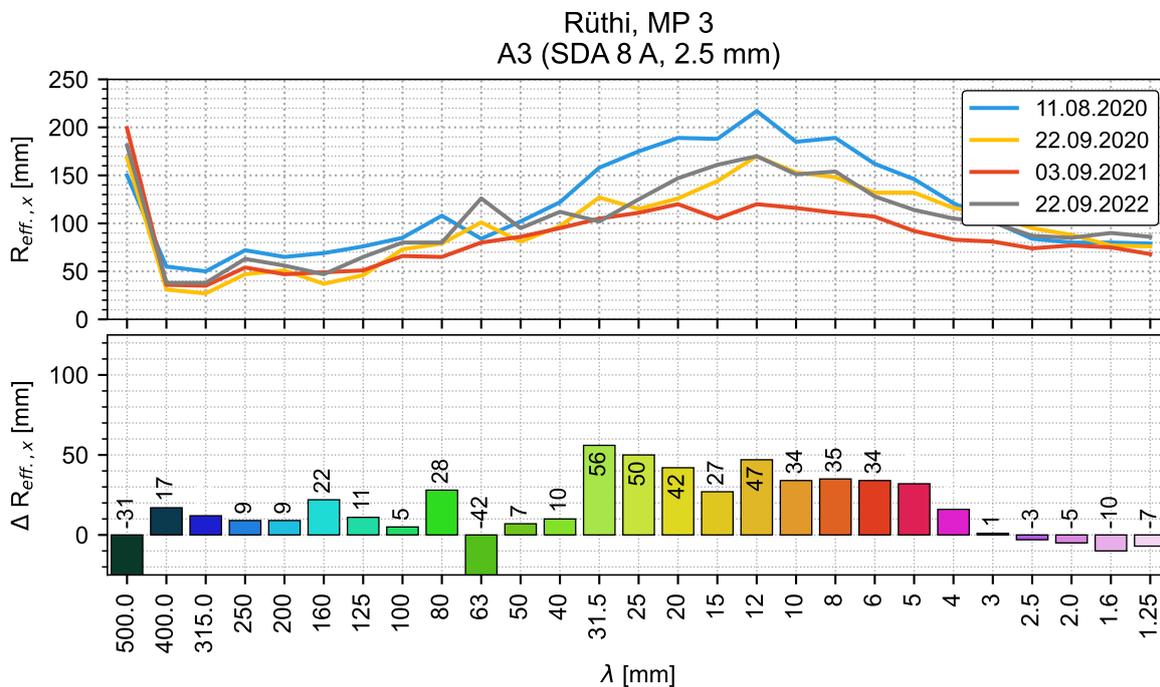


Abbildung L.13: Spektralanalysen Texturwellenlänge MP3.

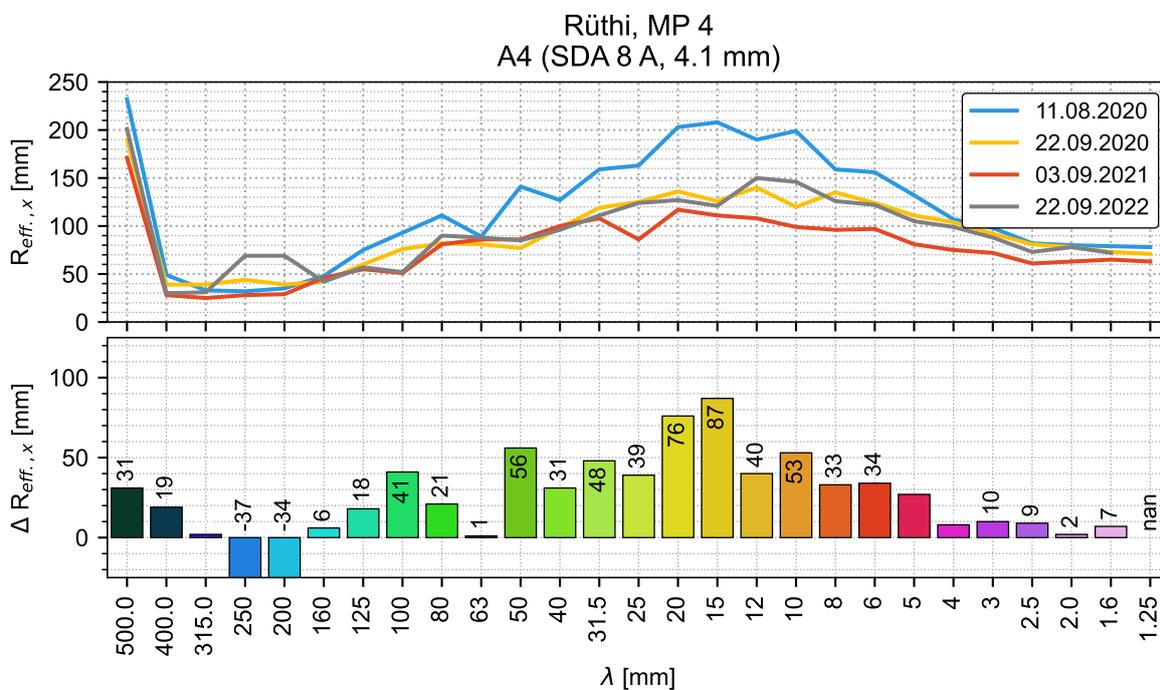


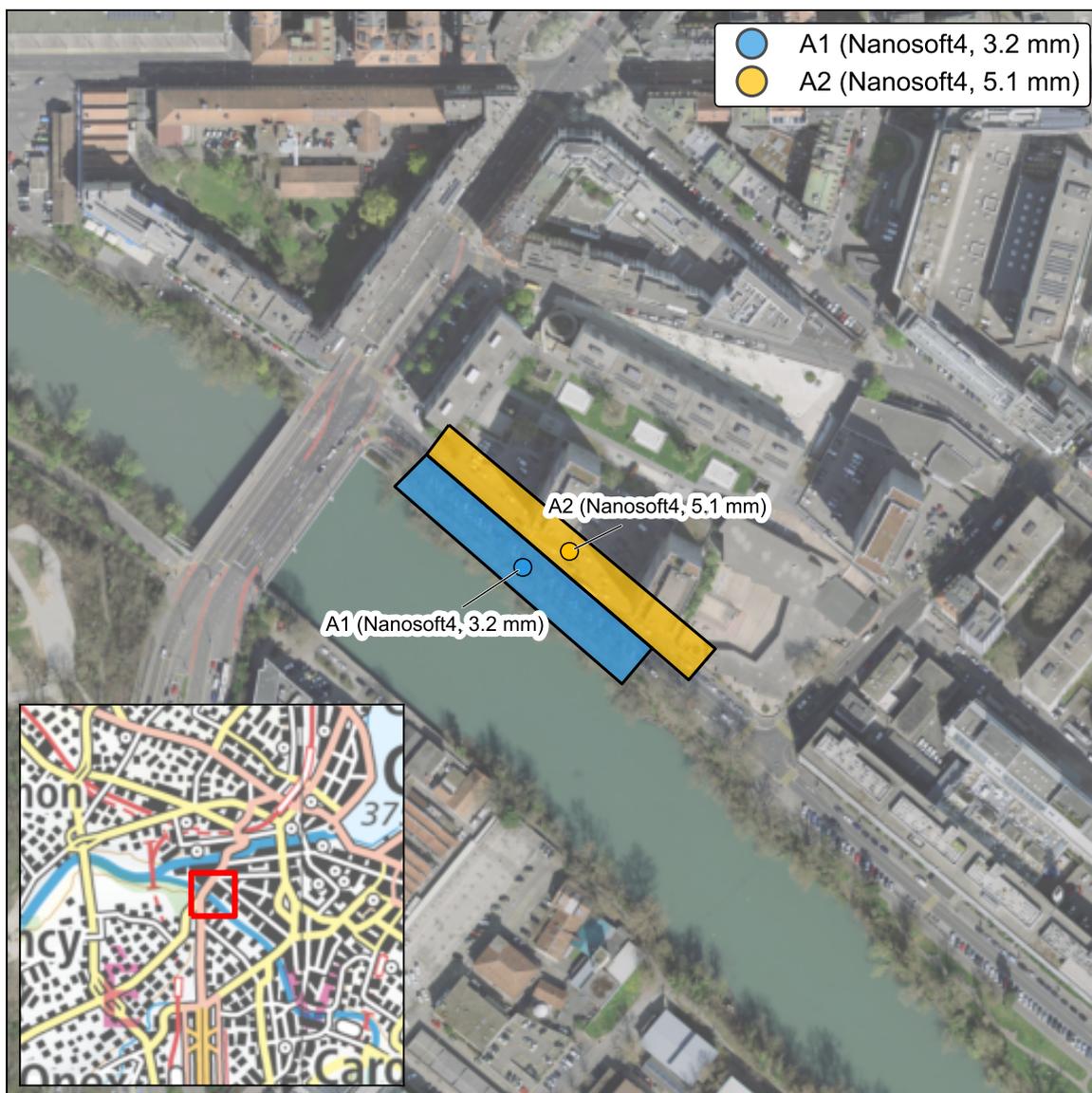
Abbildung L.14: Spektralanalysen Texturwellenlänge MP4.

## M. Stadt Genf, Quai Ansermet

**Tabelle M.1:** Abschnitte in Stadt Genf, Quai Ansermet.

Belag	Abschnitt	Fräsdatum	Fahrbahn	Länge	Abtrag	Bezeichnung in Plots
Nanosoft 4 (2011)	A1	04.08.2021	Rg SO	150 m	3.2 mm (1x WZb)	A1 (Nanosoft 4, 3.2 mm)
	A2	04.08.2021	Rg NW	150 m	5.1 mm (2x WZb)	A2 (Nanosoft 4, 5.1 mm)
	Referenz		Rg NW+SO	2 x 40 m	ungeschliffen	Ref (Nanosoft 4)

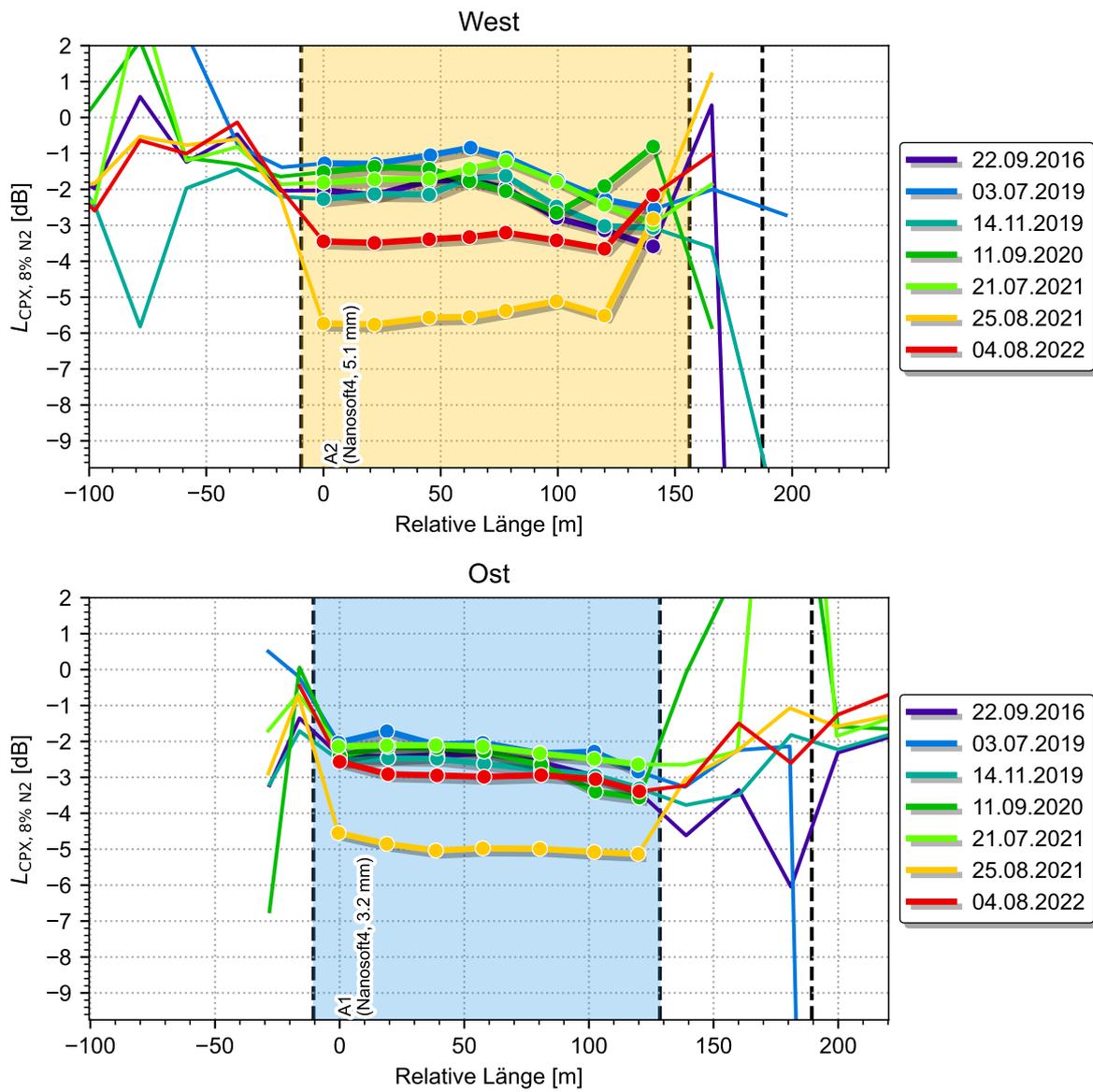
## M.1. Übersichtskarte



**Abbildung M.1:** Übersichtskarte Stadt Genéva, Quai Ansermet mit Lage der Abschnitte

## M.2. Akustische Resultate

### M.2.1 CPX-Streckenverlauf



**Abbildung M.2:** Verlauf der akustischen Belagsgüte (Mischverkehr mit 8% N<sub>2</sub>-Anteil) in beiden Fahrrichtungen auf dem Quai Ansermet, Stadt Genf. Das Schleifdatum war an dieser Strecke der 04.08.2011.

### M.2.2 CPX- Zeitverlauf

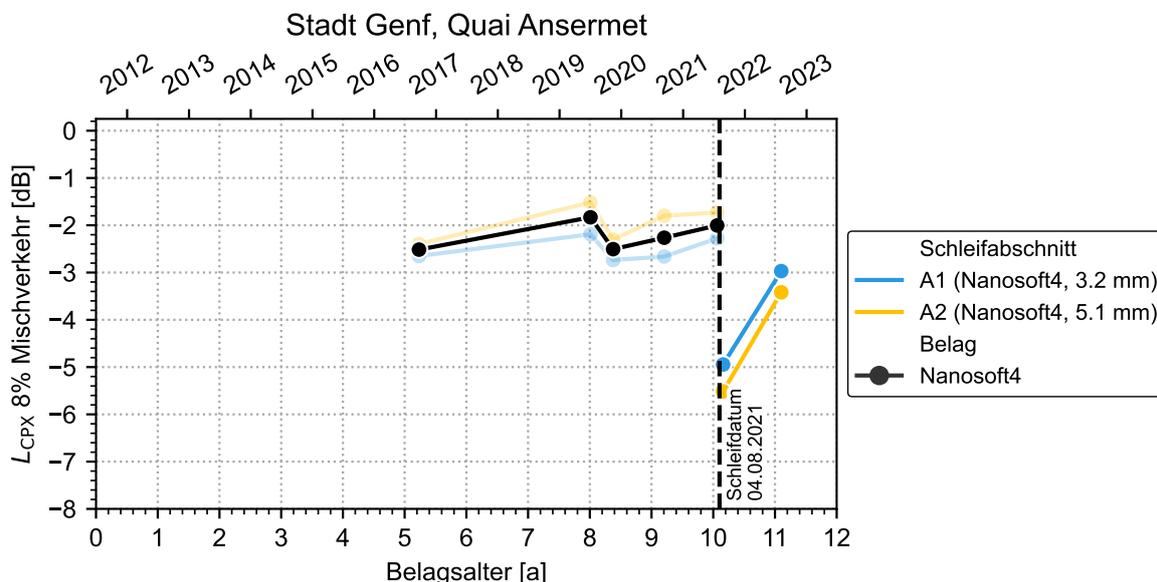


Abbildung M.3: Wirkung der Schleifmassnahmen Stadt Genf, Quai Ansermet

### M.2.3 Akustische Regeneration

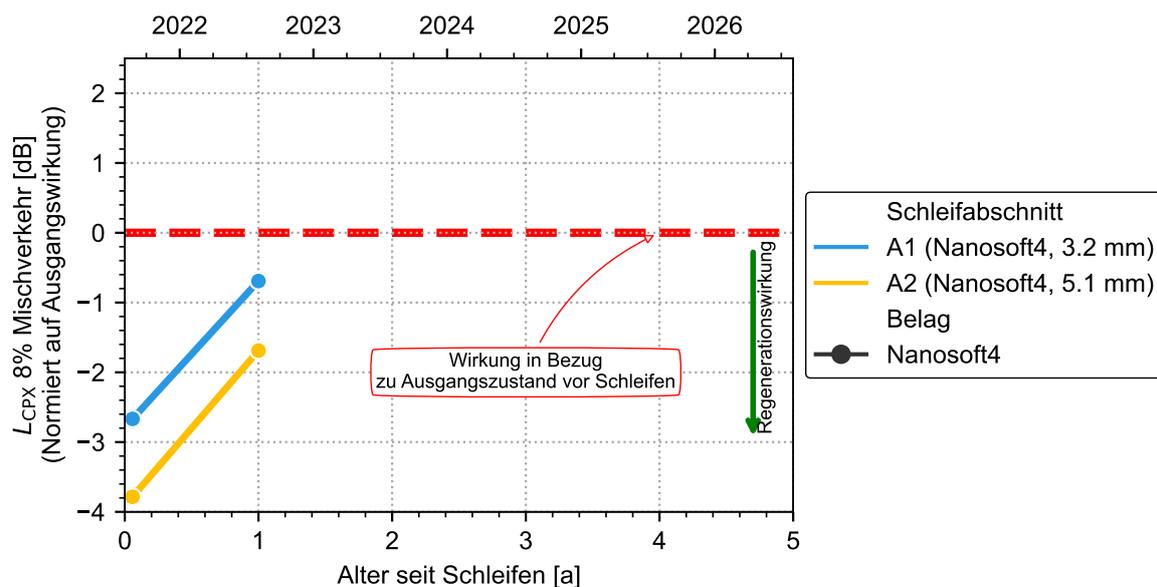


Abbildung M.4: Streckenverlauf Stadt Genf, Quai Ansermet

## M.2.4 Akustische Wirkung

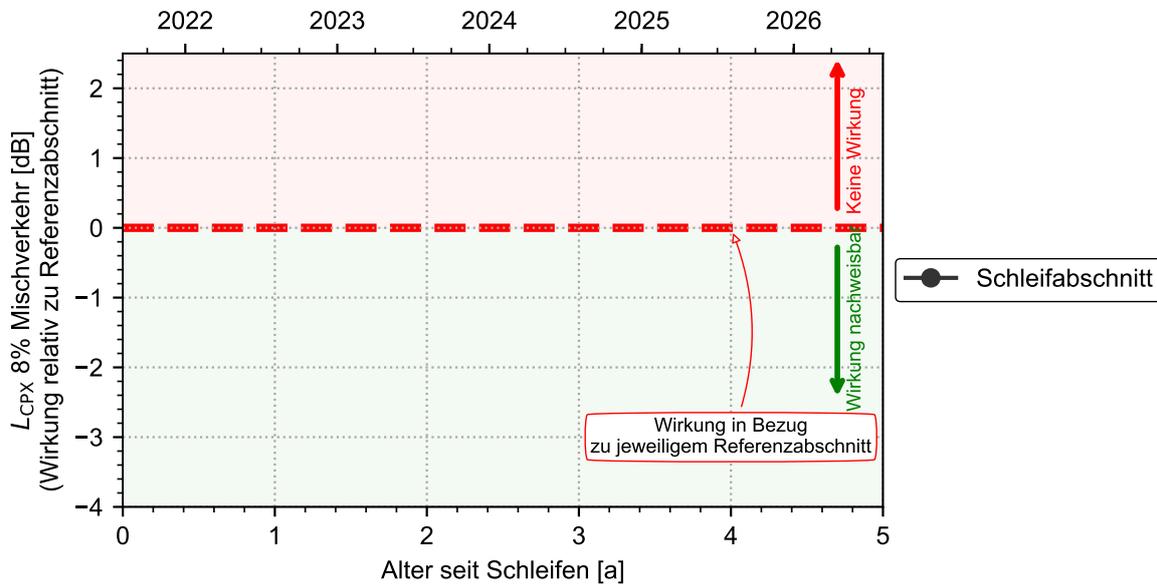


Abbildung M.5: Wirkung relativ zu Referenzabschnitt

## M.2.5 Spektralanalyse

Bei den Spektralanalysen wird jeweils die spektrale Veränderung der gemessenen CPX-Pegel im Zeitraum von der letzten Messung vor der Schleifmassnahme gezeigt. In den Abbildungen wird unterschieden zwischen den PKW und LKW Messreifen. Ebenfalls werden die Gesamtpegel im rechten Teil ebenfalls für PKW, LKW und den Mischverkehr (N2-Anteil von 8%) gezeigt.

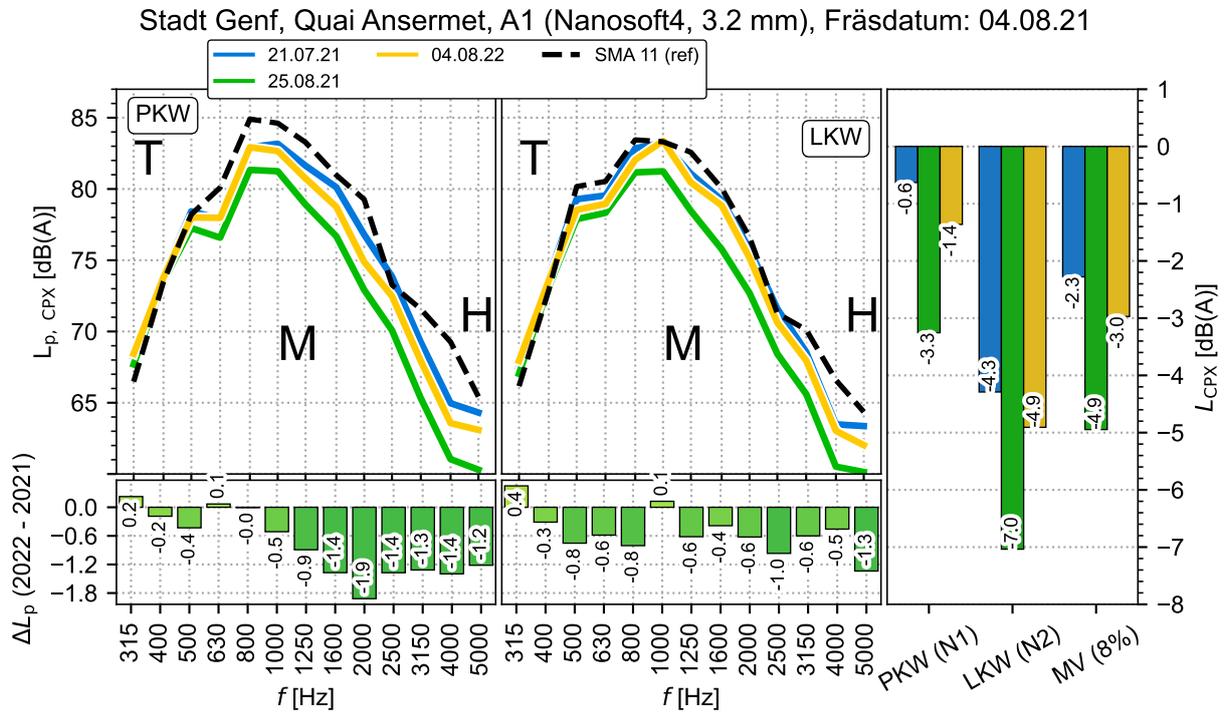


Abbildung M.6: Spektralanalyse in Stadt Genf, Quai-Ansermet, A1

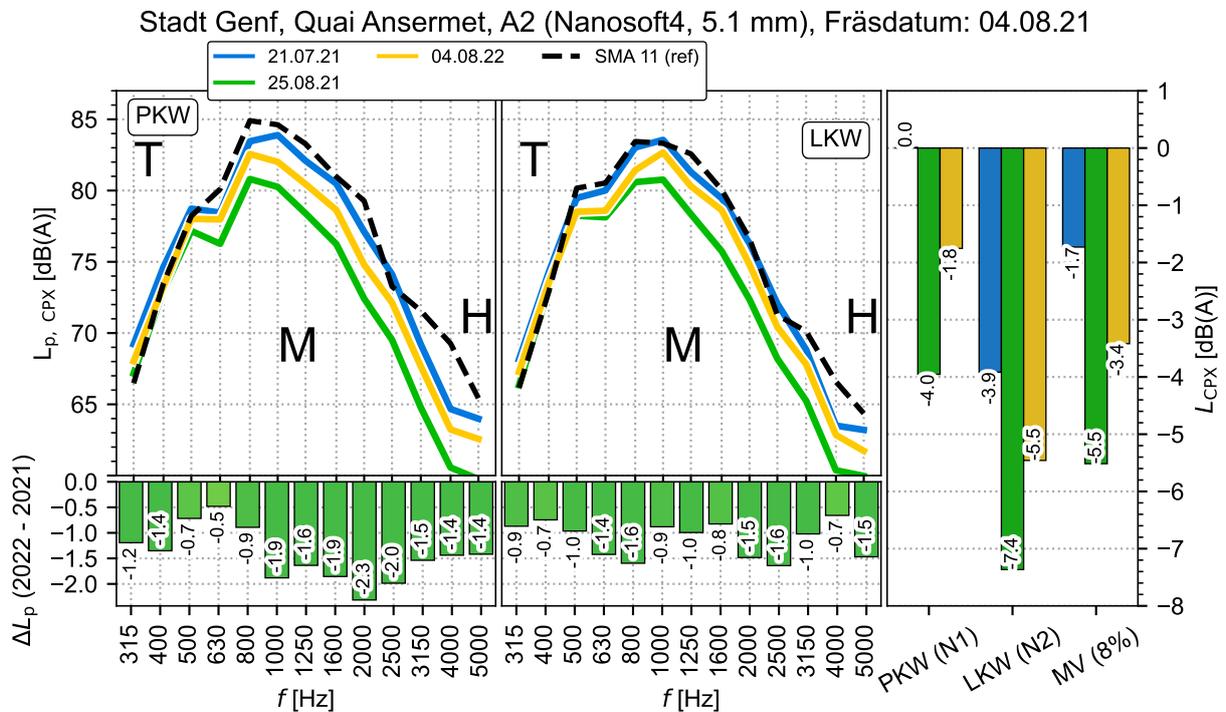


Abbildung M.7: Spektralanalyse in Stadt Genf, Quai-Ansermet, A2

## N. Sugiez

In Sugiez, FR wurde im Jahr 2019 der 2013 eingebaute Famsi 4 Belag abgeschliffen. Dabei wurde jeweils die nördliche Richtung mit zwei verschiedenen Schleiftiefen bearbeitet und die südliche Richtung als Referenz so belassen, wie sie war. (Vgl. N.1).

**Tabelle N.1:** Abschnitte in Sugiez.

Belag	Abschnitt	Fräsdatum	Fahrbahn	Länge	Abtrag	Bezeichnung in Plots
Famsi 4 (2013)	A1	20.05.2019	Rg Nord	220 m	3.5 mm (2x WZvG)	A1 (Famsi 4, 3.5 mm)
	A2	20.05.2019	Rg Nord	230 m	3.1 mm (2x WZb)	A2 (Famsi 4, 3.1 mm)
	Ref (A3)		Rg Süd	450 m	ungeschliffen	Ref (Famsi 4)

## N.1. Übersichtskarte

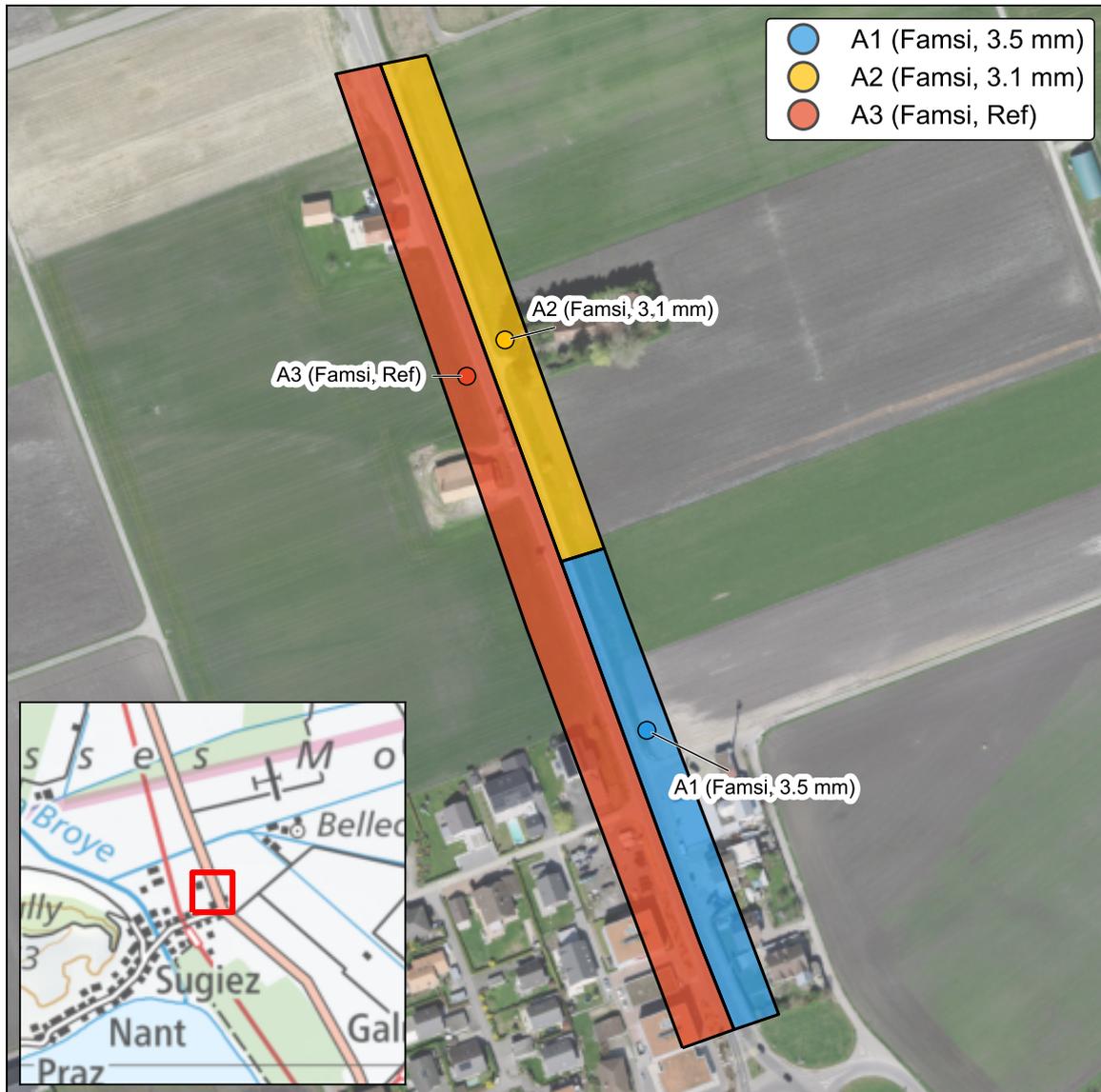
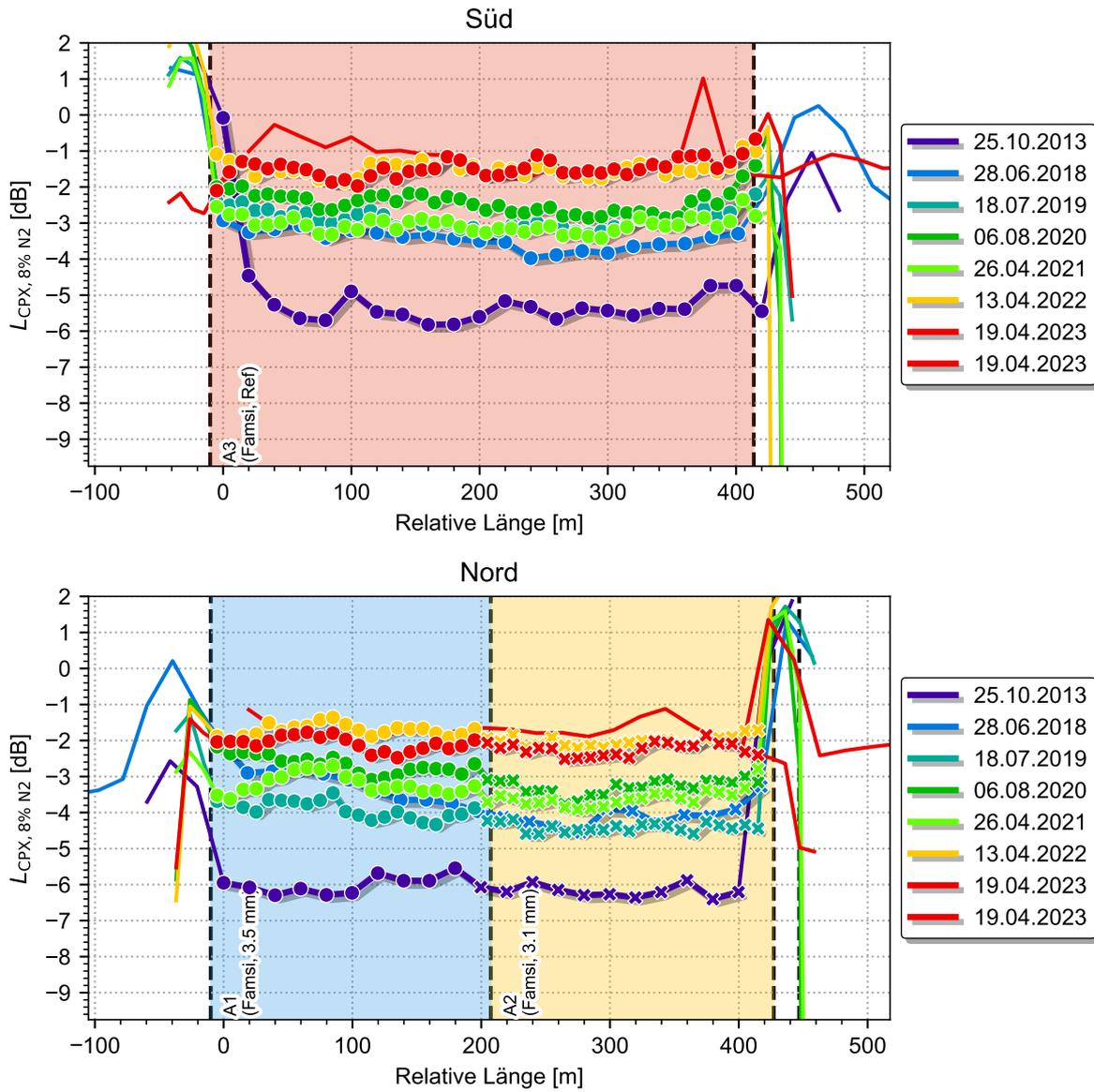


Abbildung N.1: Übersichtskarte Sugiez, FR mit Lage der Abschnitte

## N.2. Akustische Resultate

Wie sich in diesem Kapitel zeigt wies Sugiez verhältnismässig schlechte Wirkungen hinsichtlich des Schleifens auf.

**N.2.1 CPX-Streckenverlauf**



**Abbildung N.2:** CPX-Streckenverlauf Sugiez, FR (Mischverkehr mit 8% N2-Anteil). Das Schleifdatum war an diesem Standort der 20.05.2019.

## N.2.2 CPX- Zeitverlauf

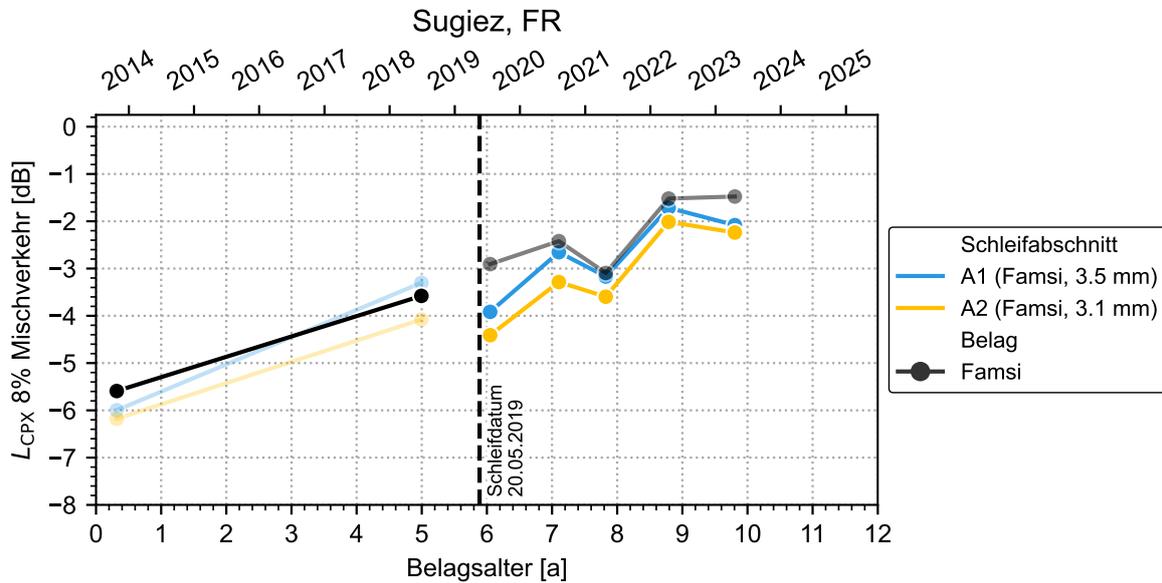


Abbildung N.3: Wirkung der Schleifmassnahmen Sugiez, FR

## N.2.3 Akustische Regeneration

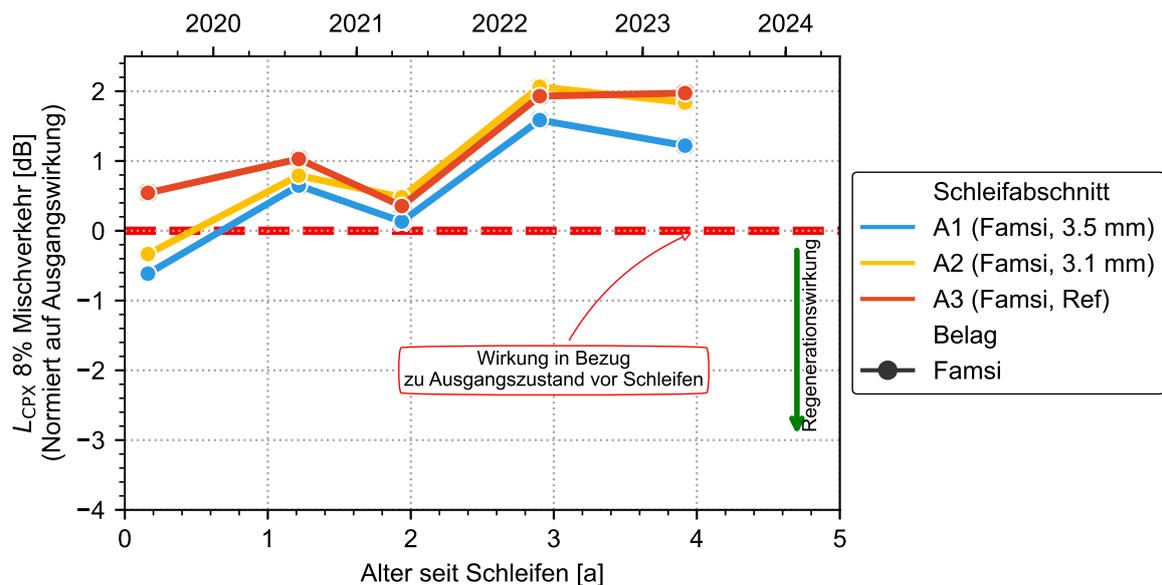


Abbildung N.4: Streckenverlauf Sugiez, FR

## N.2.4 Akustische Wirkung

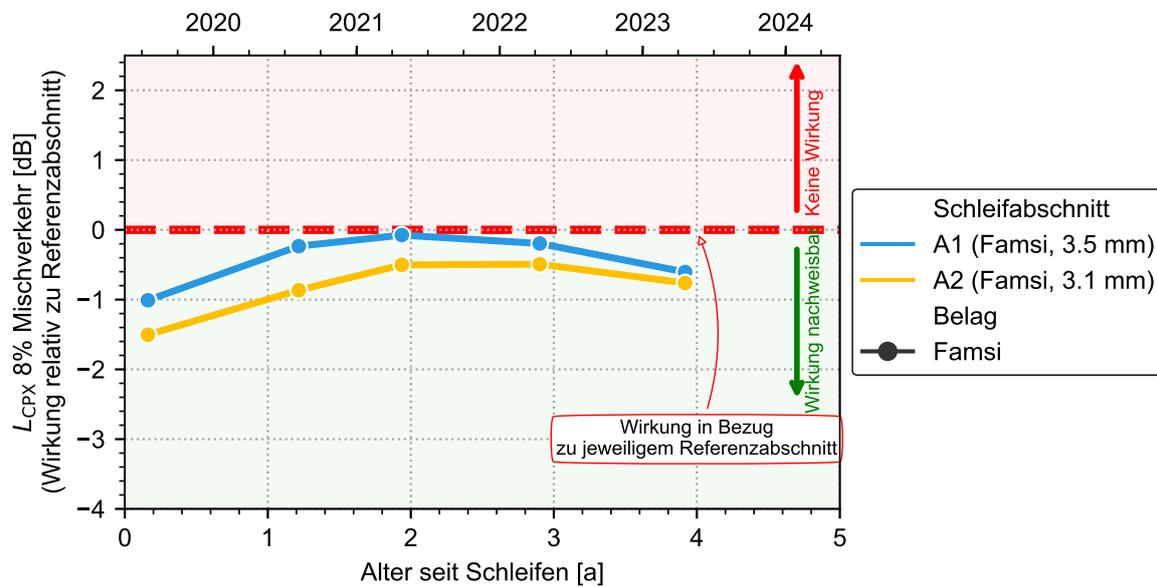


Abbildung N.5: Wirkung relativ zu Referenzabschnitt

## N.2.5 Spektralanalyse

Bei den Spektralanalysen wird jeweils die spektrale Veränderung der gemessenen CPX-Pegel im Zeitraum von der letzten Messung vor der Schleifmassnahme gezeigt. In den Abbildungen wird unterschieden zwischen den PKW und LKW Messreifen. Ebenfalls werden die Gesamtpegel im rechten Teil ebenfalls für PKW, LKW und den Mischverkehr (N2-Anteil von 8%) gezeigt.

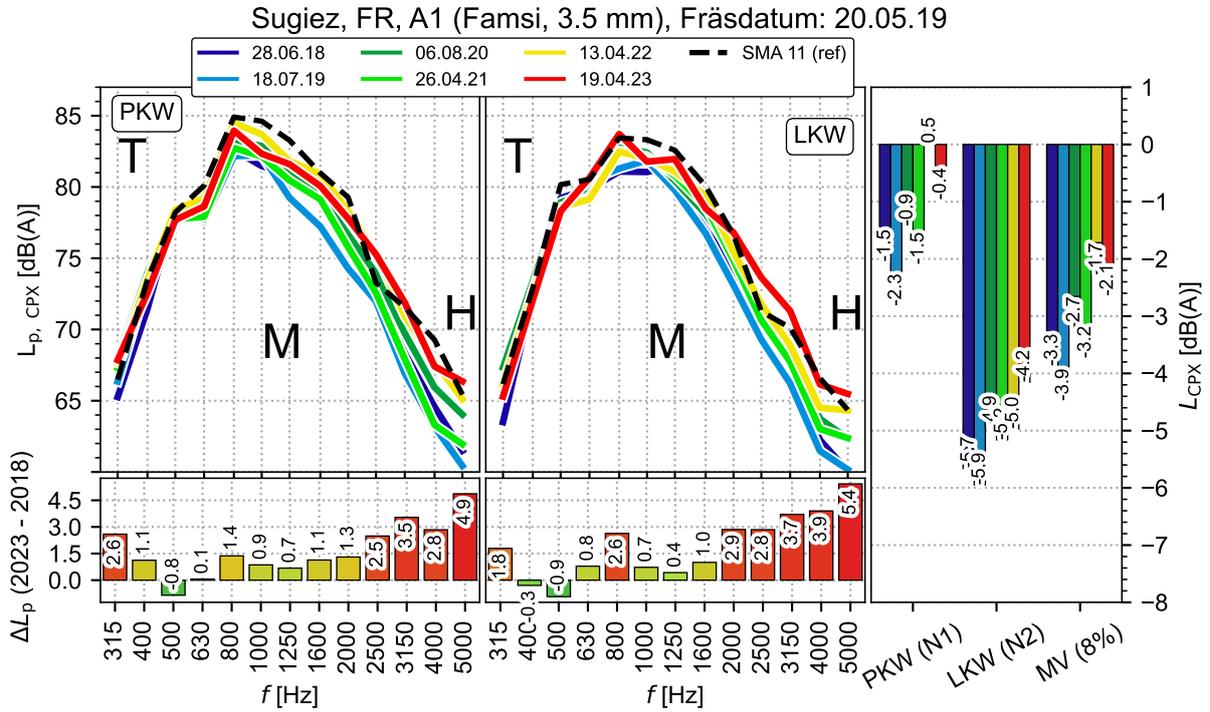


Abbildung N.6: Spektralanalyse in Sugiez, A1

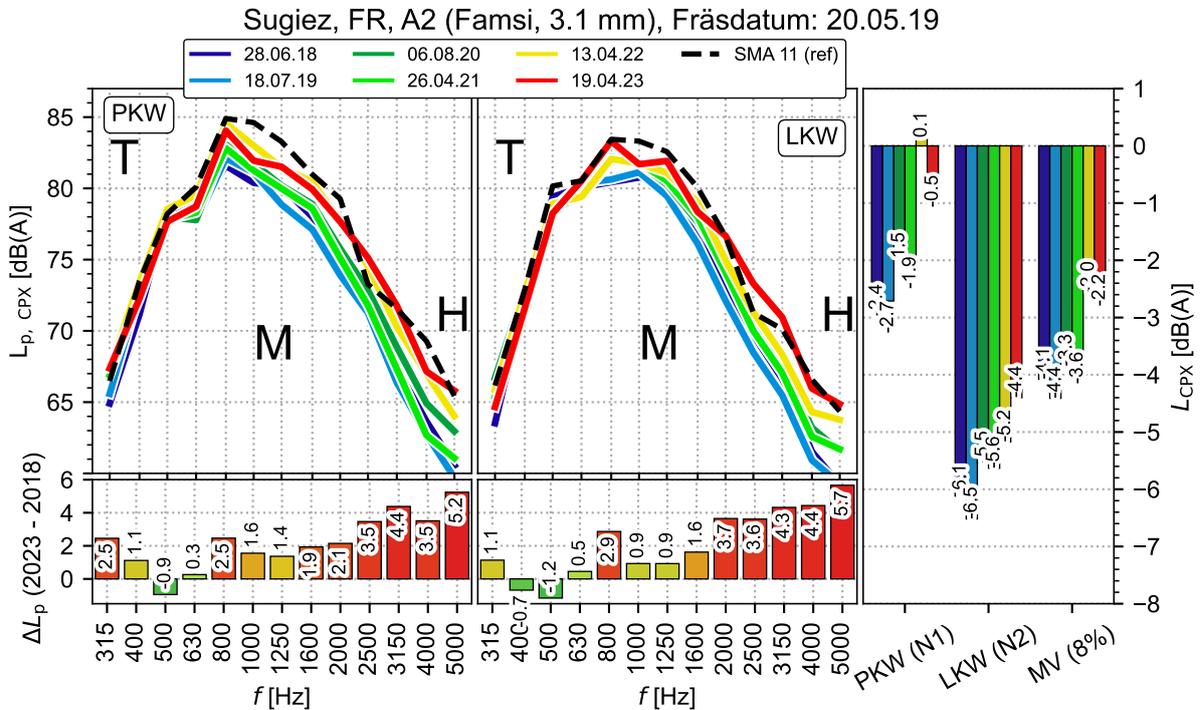


Abbildung N.7: Spektralanalyse in Sugiez, A2

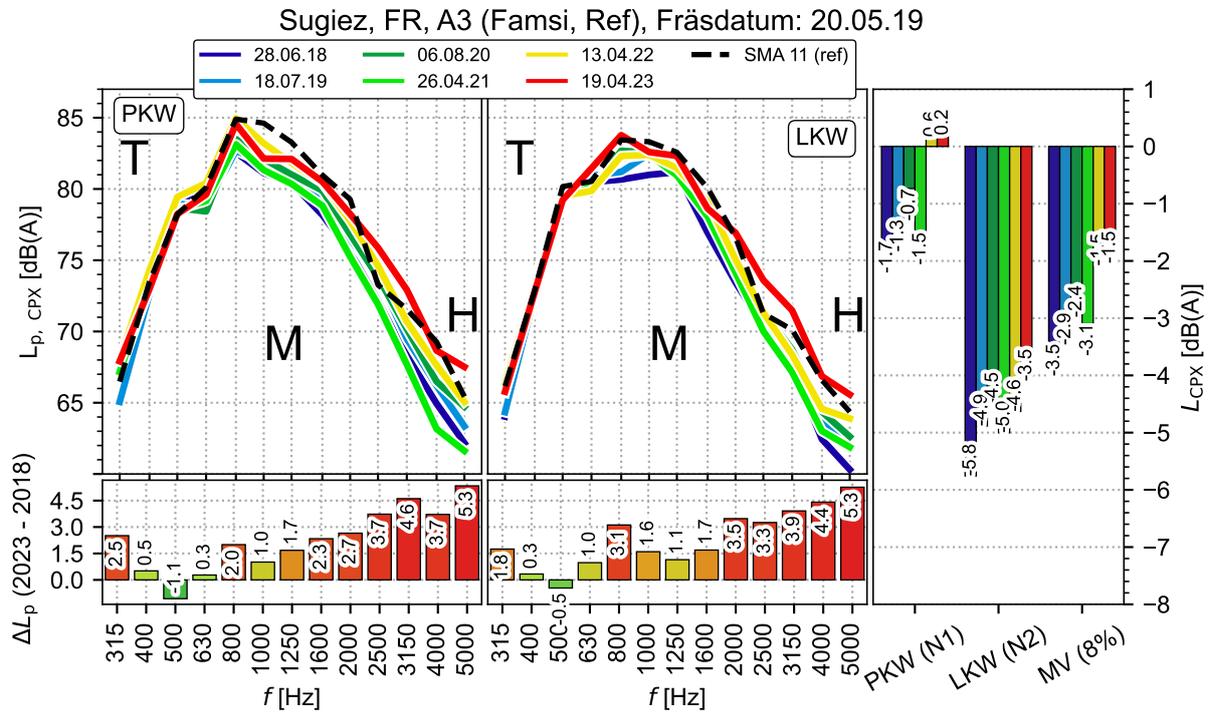


Abbildung N.8: Spektralanalyse in Sugiez, A3

## O. Tafers

**Tabelle O.1:** Abschnitte in Tafers, FR.

Belag	Abschnitt	Fräsdatum	Fahrbahn	Länge	Abtrag	Bezeichnung in Plots
Famsi 4 (2013)	A1	21.05.2019	Rg Süd	100 m	1.8 mm (1x WZb)	A1 (Famsi 4, 1.8 mm)
	Ref (A2)		Rg Süd	50 m	ungeschliffen	Ref (Famsi 4)
	A3	23.05.2019	Rg Süd	100 m	1.1 mm (1x WZg)	A3 (Famsi 4, 1.1 mm)
	A5-7	24.05.2019	Rg Nord	250 m	3 mm (2x WZg+b)	A5-7 (Famsi4, 3 mm)
MA 11 (1998)	A4.1	25.05.2019	Rg Süd	75 m	0.5 mm (1x WZg)	A4.1 (MA 11, 0.5 mm)
	A4.2	26.05.2019	Rg Süd	75 m	0.8 mm (1x WZb)	A4.2 (MA 11, 0.8 mm)
	Referenz		Rg Nord	150 m	ungeschliffen	Ref (MA11)
ACMR 11 (2013)	A8	28.05.2019	Rg Süd	100 m	1.7 mm (1x WZg)	A8 (ACMR 11, 1.7 mm)
	Referenz		Rg Nord	100 m	ungeschliffen	Ref (ACMR 11)

### O.1. Übersichtskarte

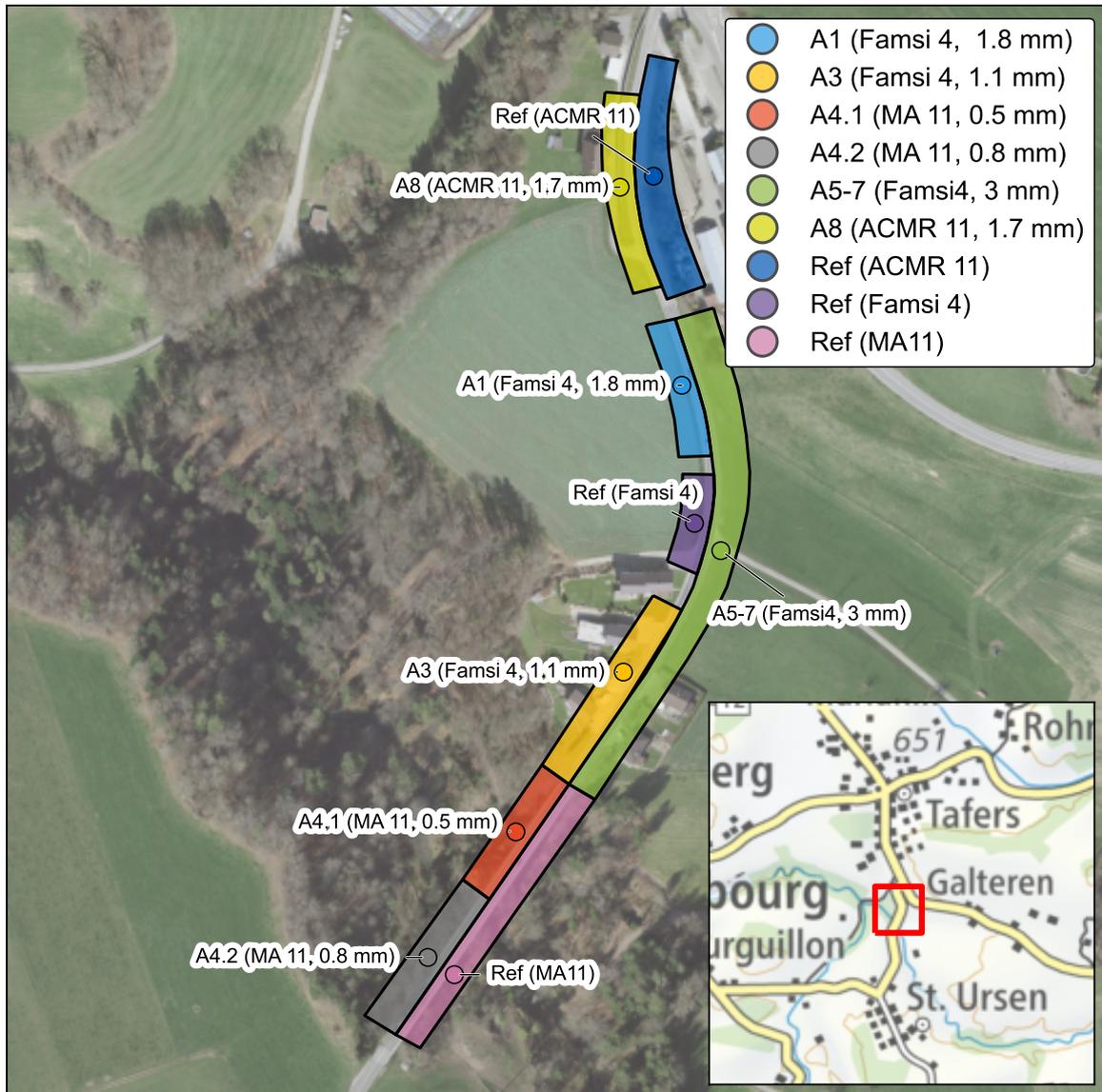
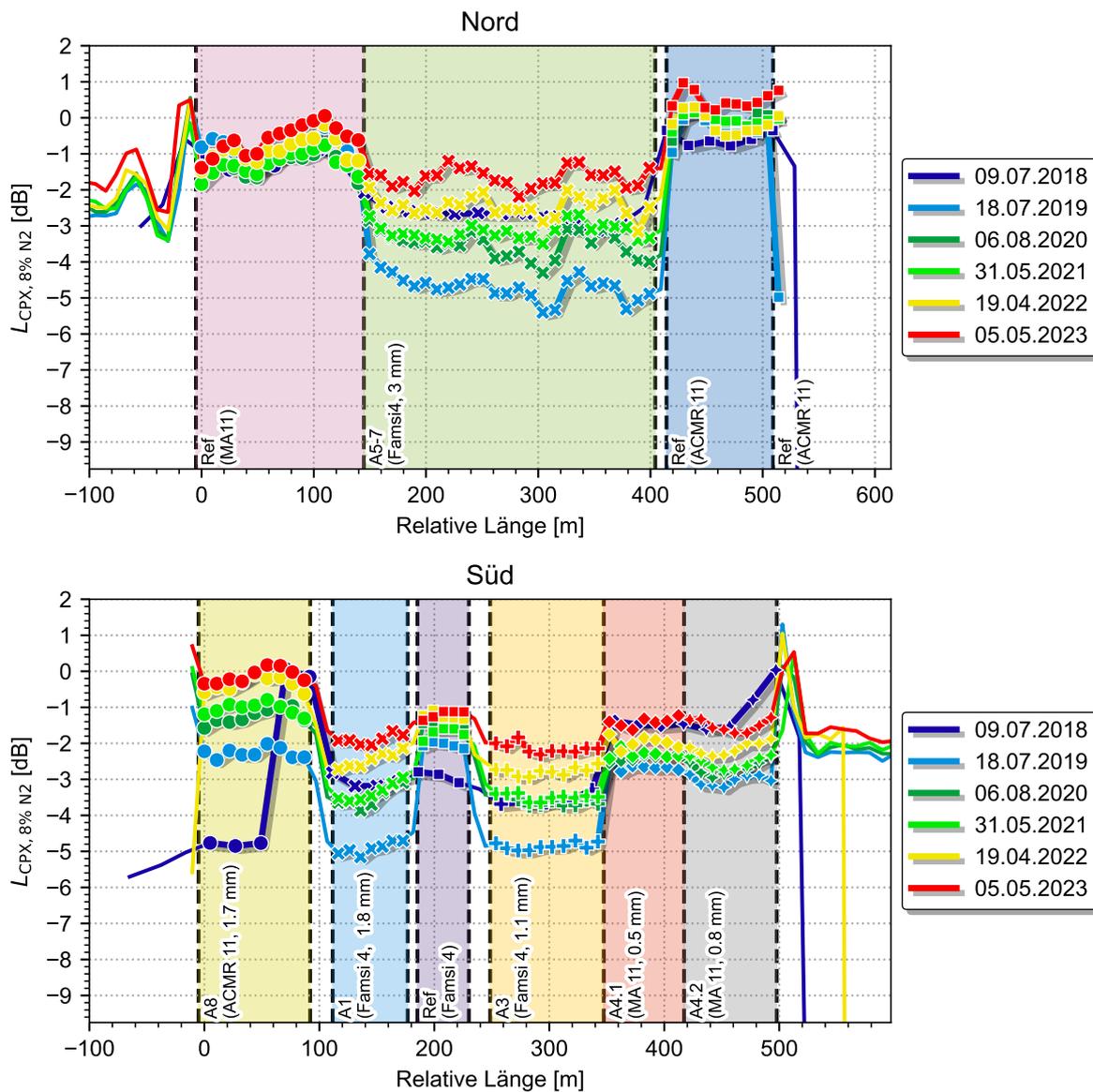


Abbildung O.1: Übersichtskarte Tafers, FR mit Lage der Abschnitte

## O.2. Akustische Resultate

### O.2.1 CPX-Streckenverlauf



**Abbildung O.2:** CPX-Streckenverlauf Tafers, FR in beiden Fahrrichtungen (Mischverkehr mit 8% N2-Anteil). Das Schleifdatum war in Tafers der 28.05.2019.

### O.2.2 CPX- Zeitverlauf

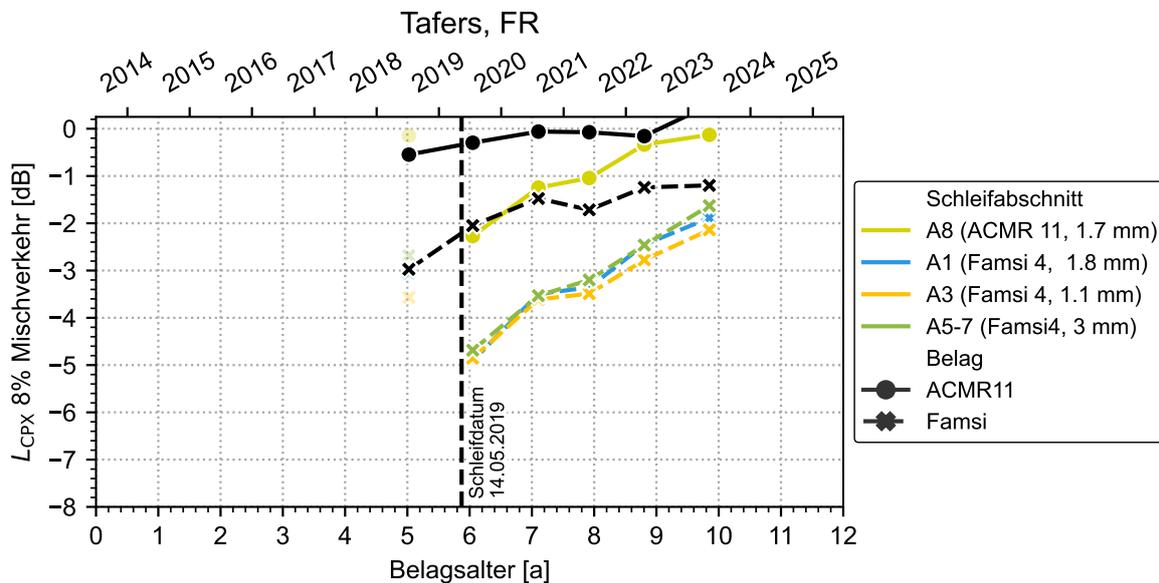


Abbildung O.3: Wirkung der Schleifmassnahmen Tafers, FR

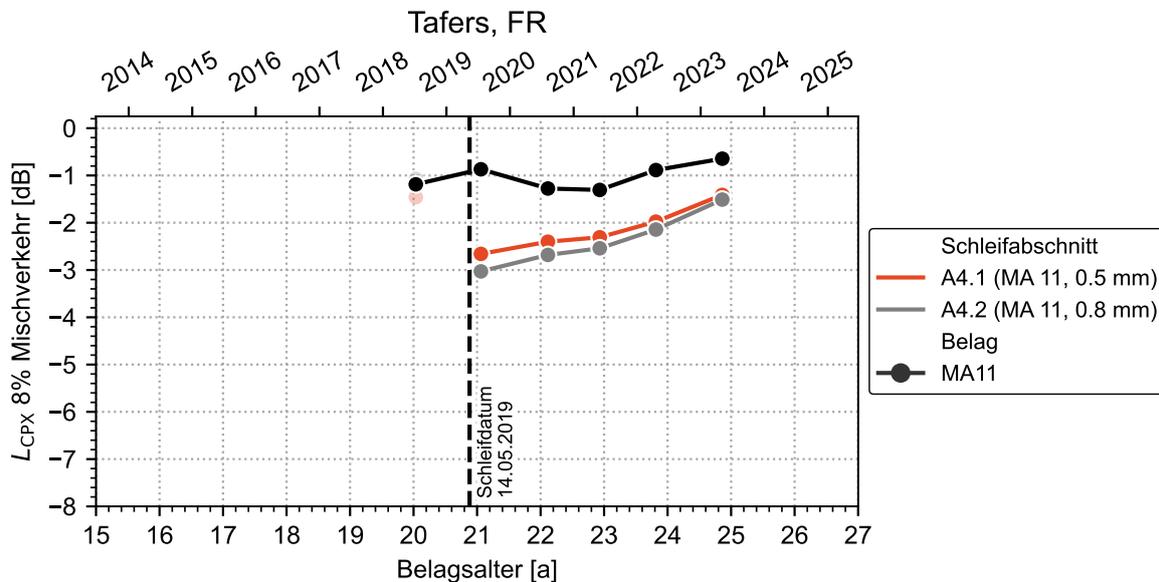


Abbildung O.4: Wirkung der Schleifmassnahmen Tafers, FR

### O.2.3 Akustische Regeneration

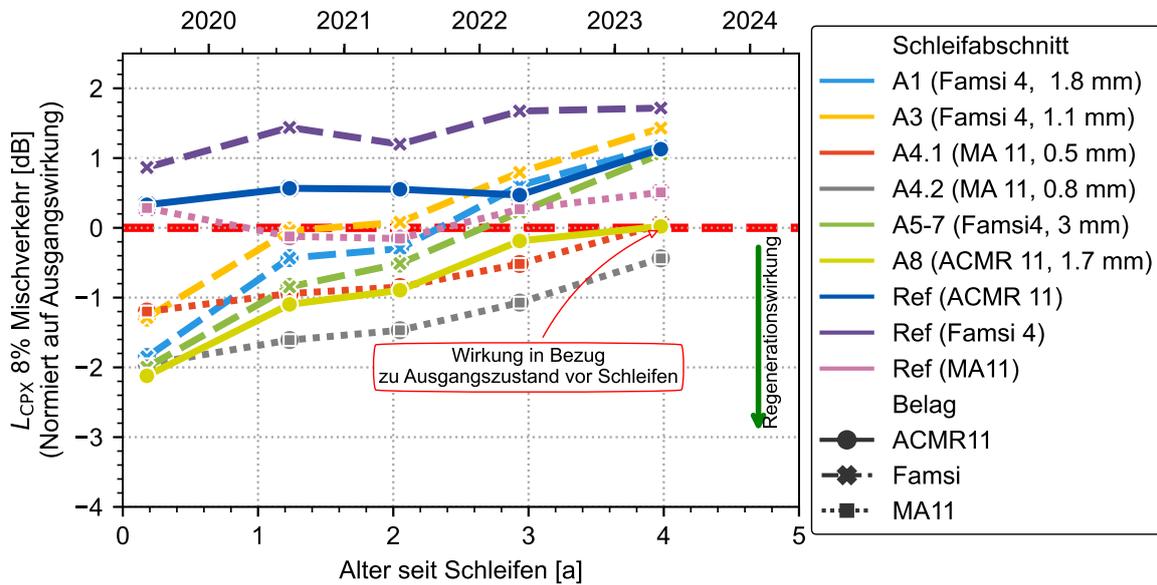


Abbildung O.5: Streckenverlauf Tifers, FR

### O.2.4 Akustische Wirkung

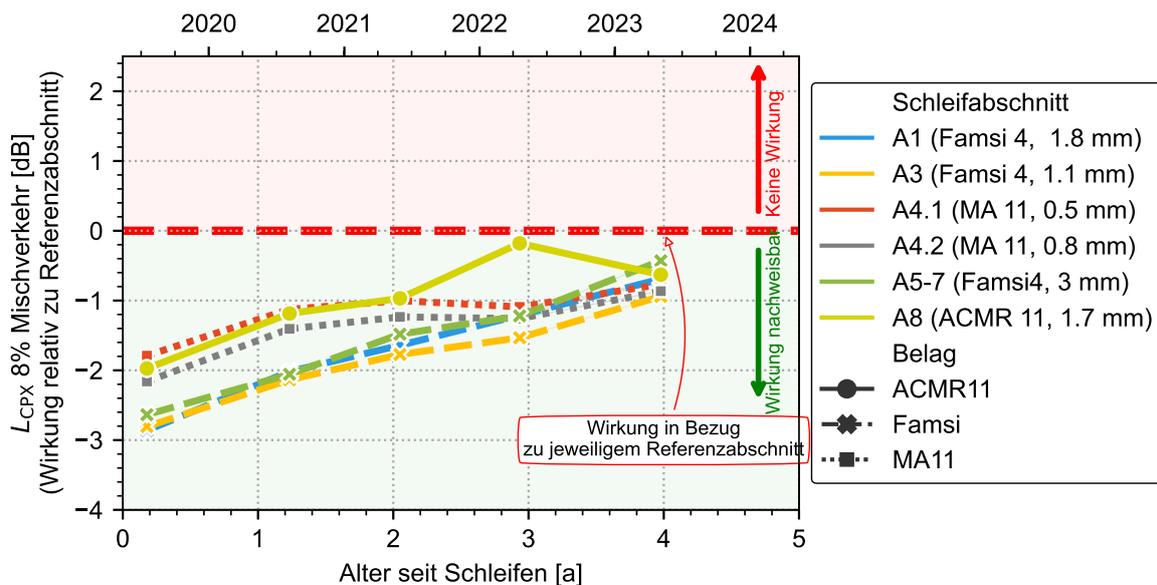
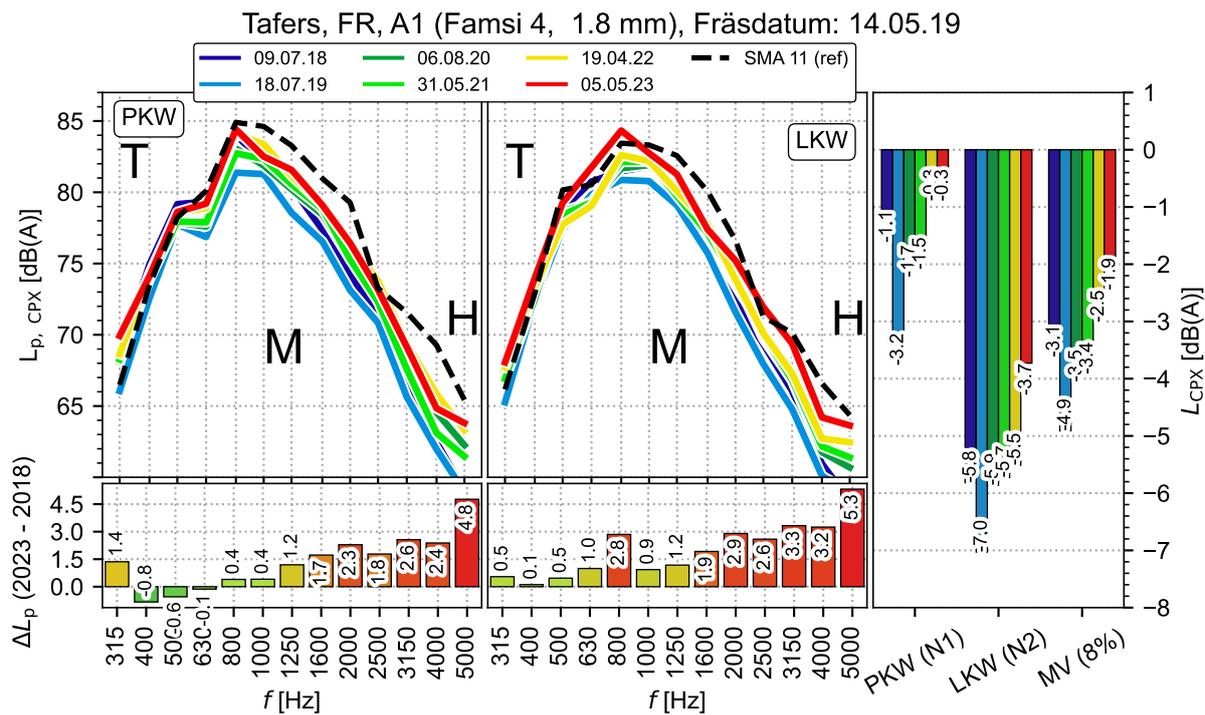


Abbildung O.6: Wirkung relativ zu Referenzabschnitt

### O.2.5 Spektralanalyse

Bei den Spektralanalysen wird jeweils die spektrale Veränderung der gemessenen CPX-Pegel im Zeitraum von der letzten Messung vor der Schleifmassnahme gezeigt. In den Abbildungen wird unterschieden zwischen den PKW und LKW Messreifen. Ebenfalls werden die Gesamtpegel im rechten Teil ebenfalls für PKW, LKW und den Mischverkehr (N2-Anteil von 8%) gezeigt.



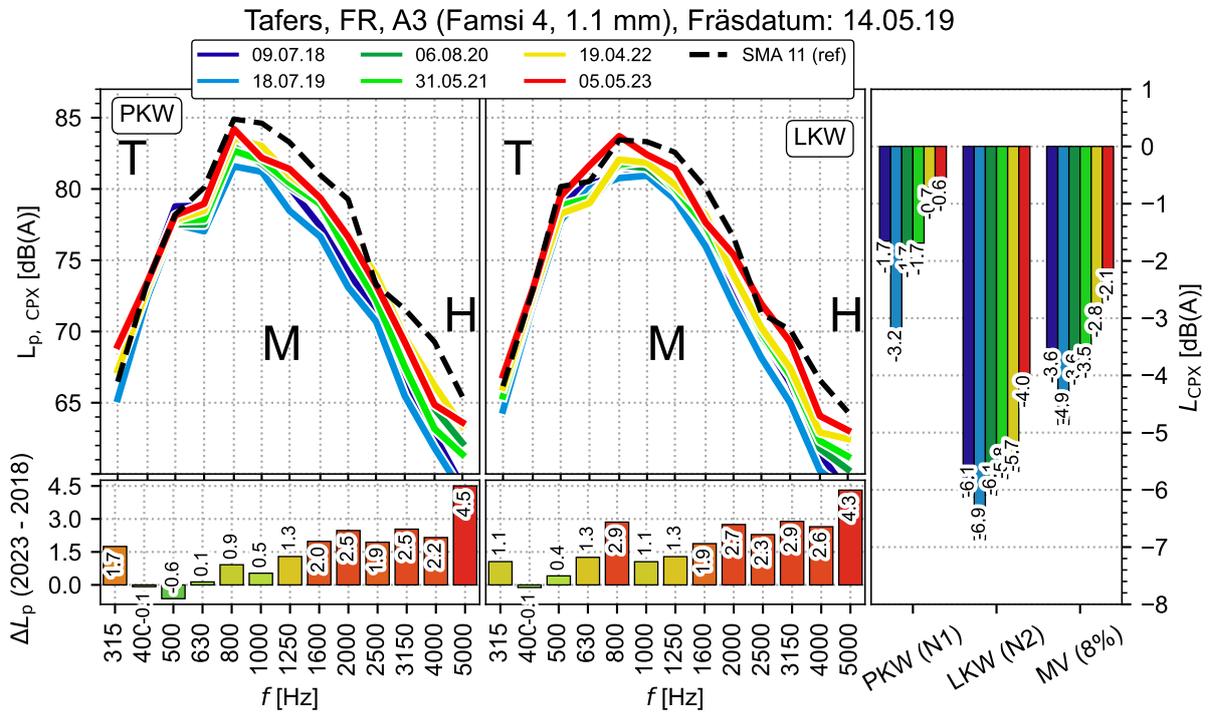


Abbildung O.8: Spektralanalyse in Tafers, A3

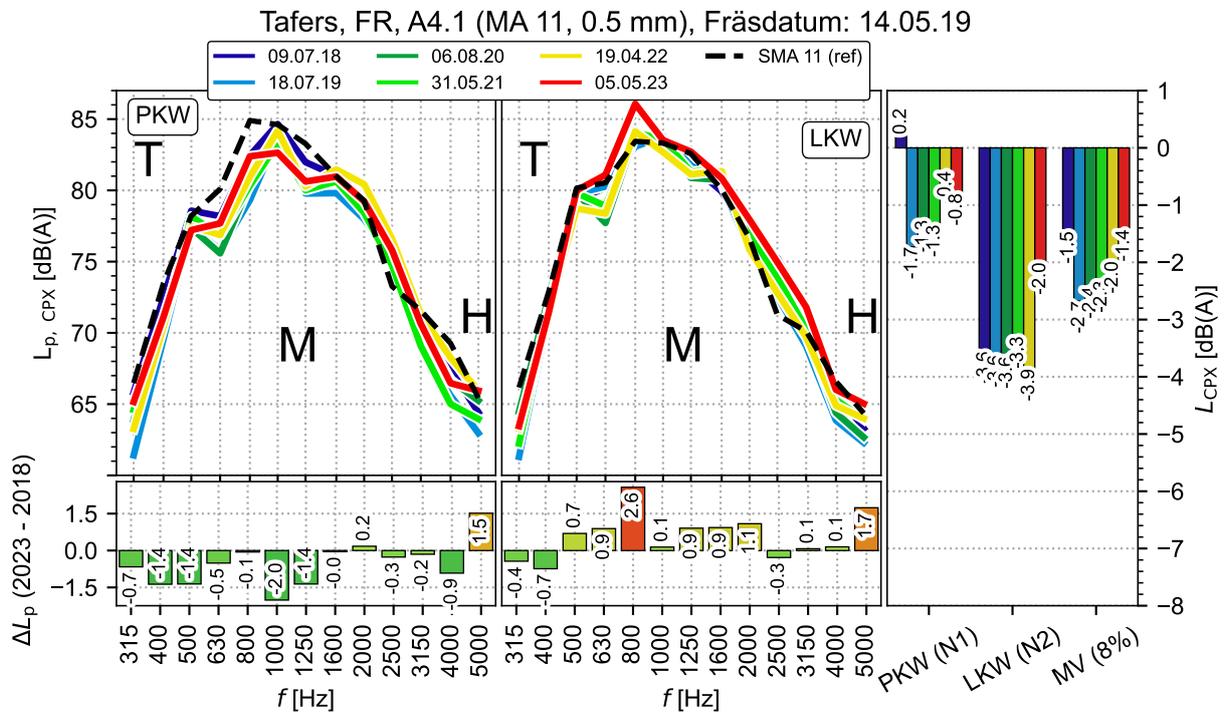
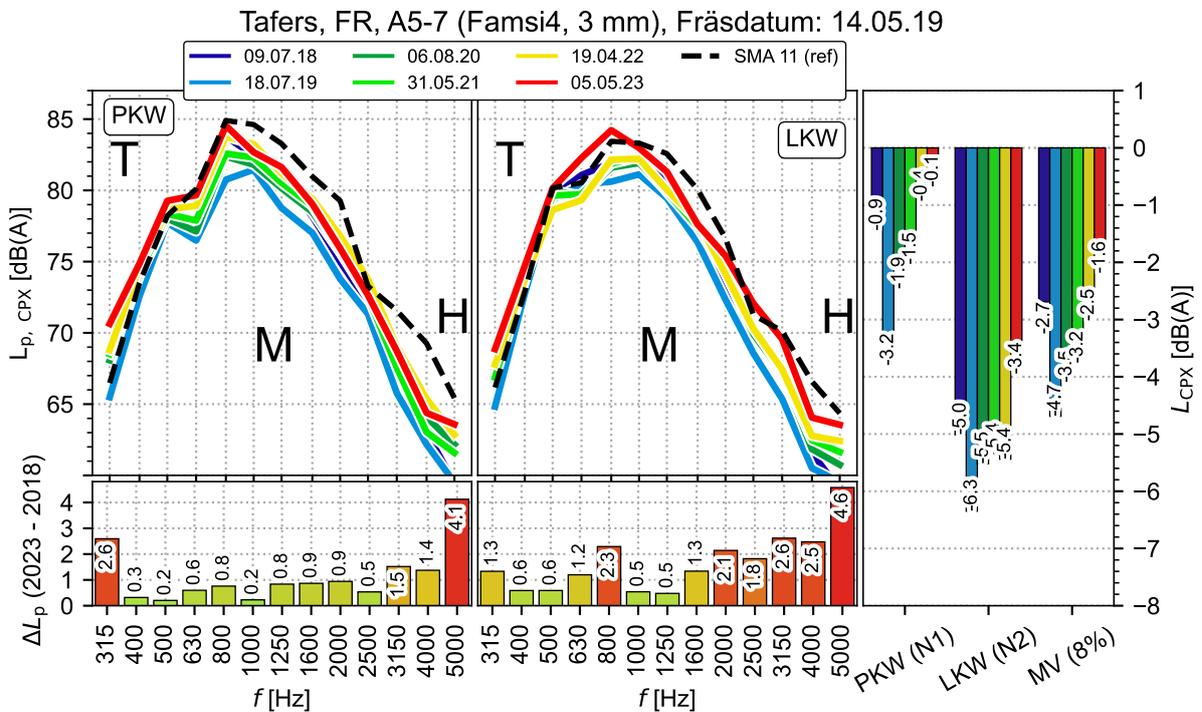
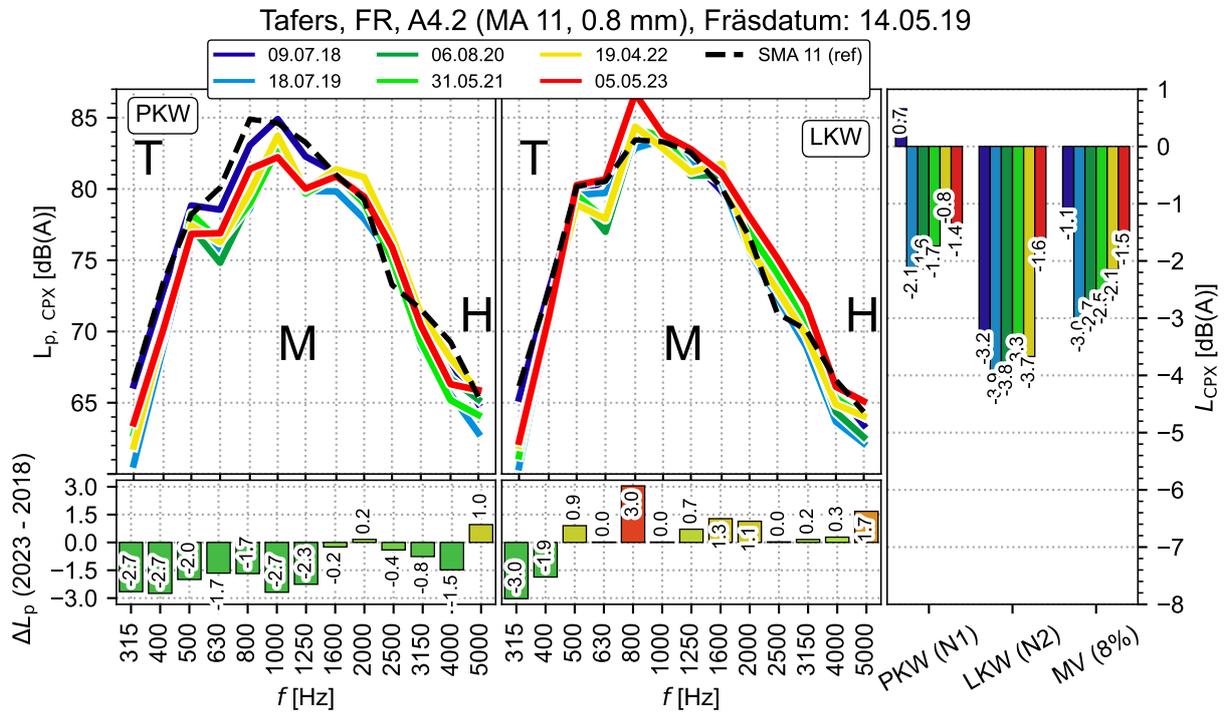


Abbildung O.9: Spektralanalyse in Tafers, A4.1



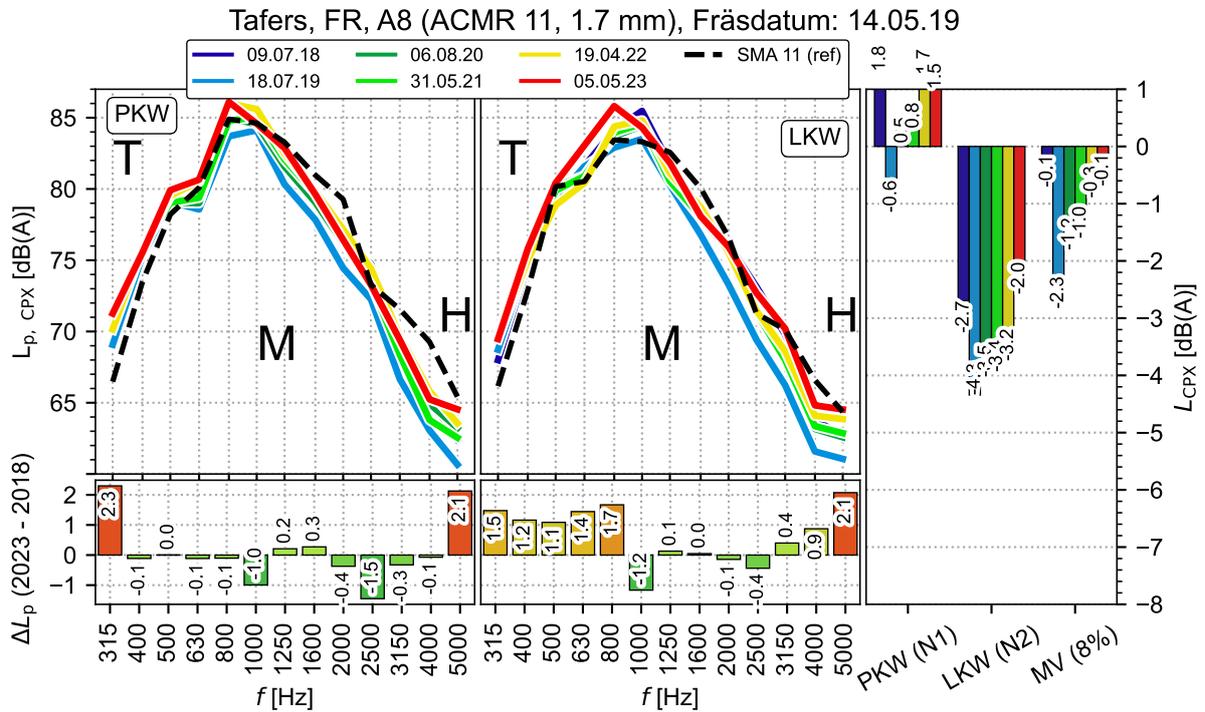


Abbildung O.12: Spektralanalyse in Tafers, A8

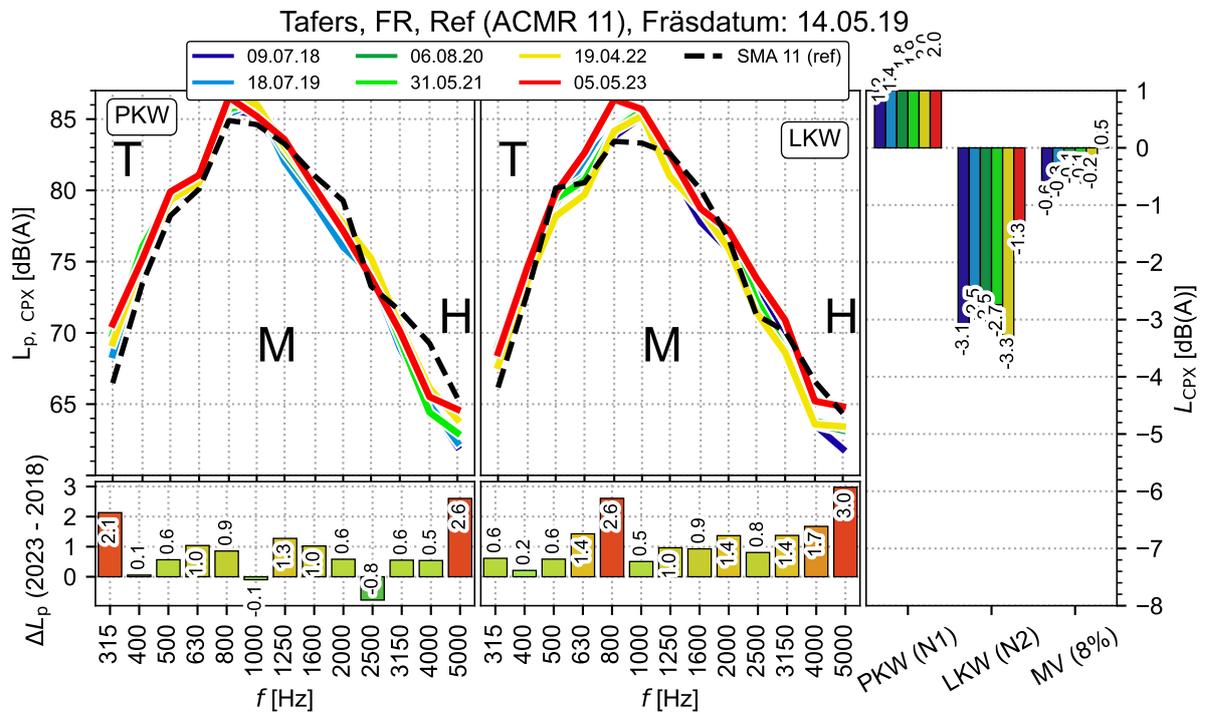
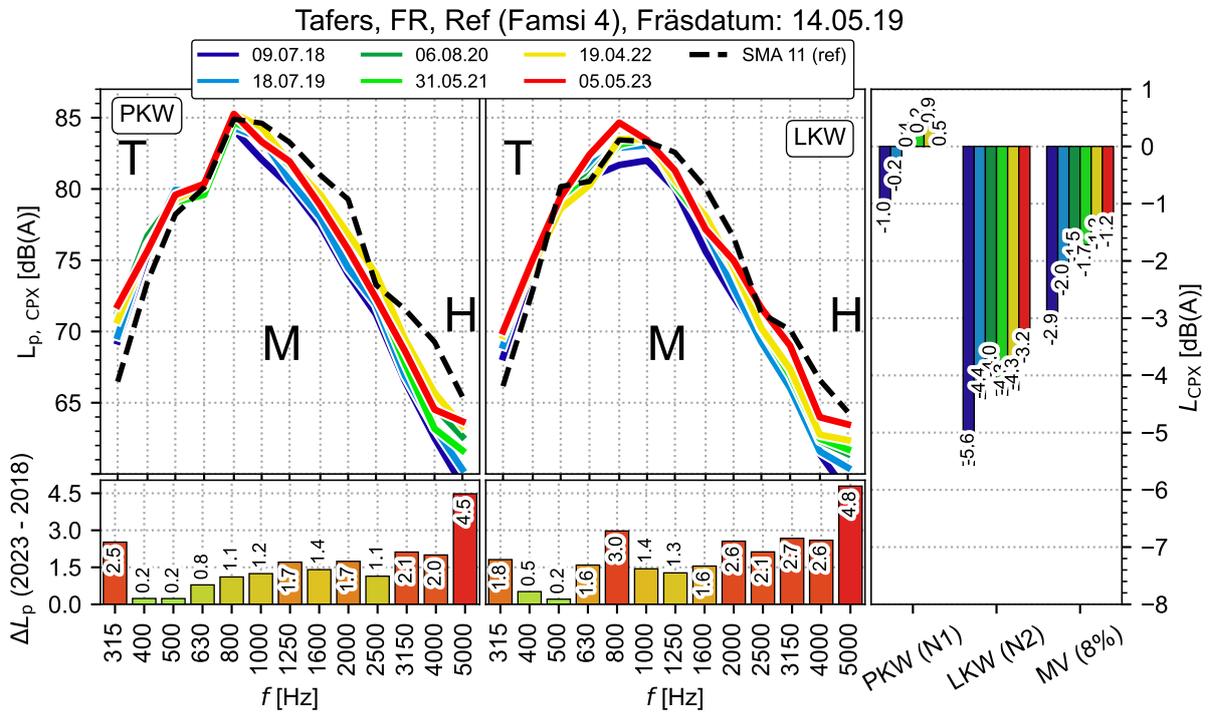
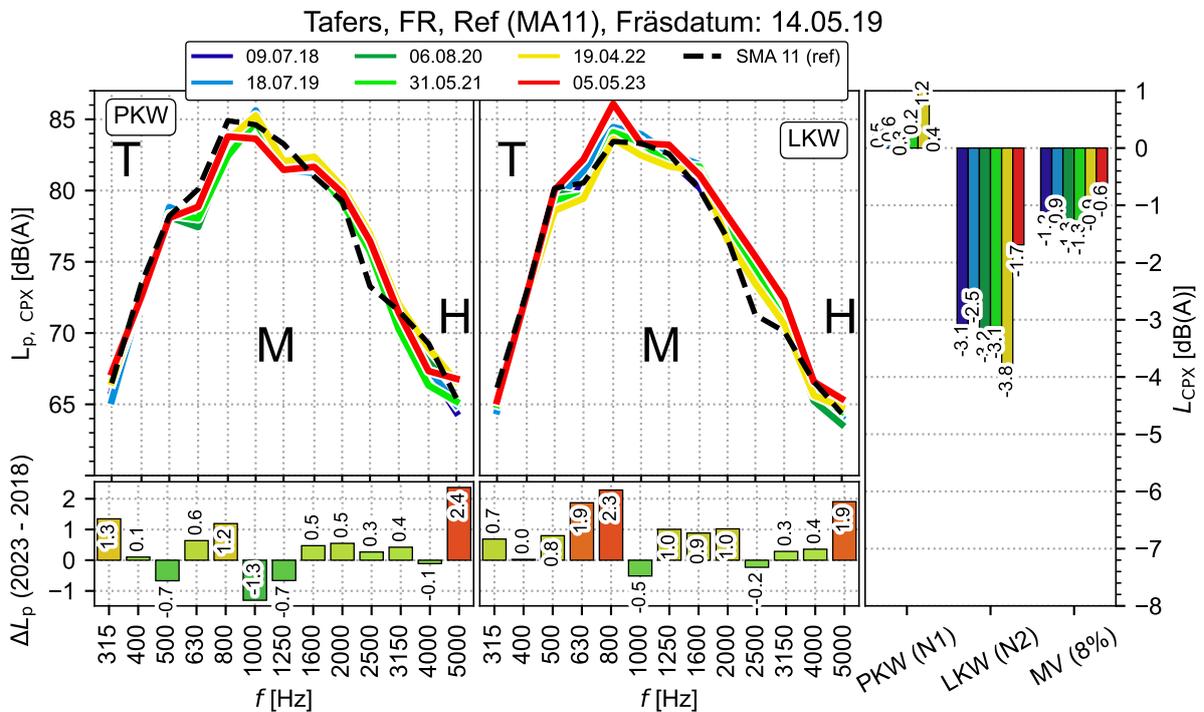


Abbildung O.13: Spektralanalyse in Tafers, Ref, ACMR11



**Abbildung O.14:** Spektralanalyse in Tafers, Ref, Famsi4



**Abbildung O.15:** Spektralanalyse in Tafers, Ref, MA11



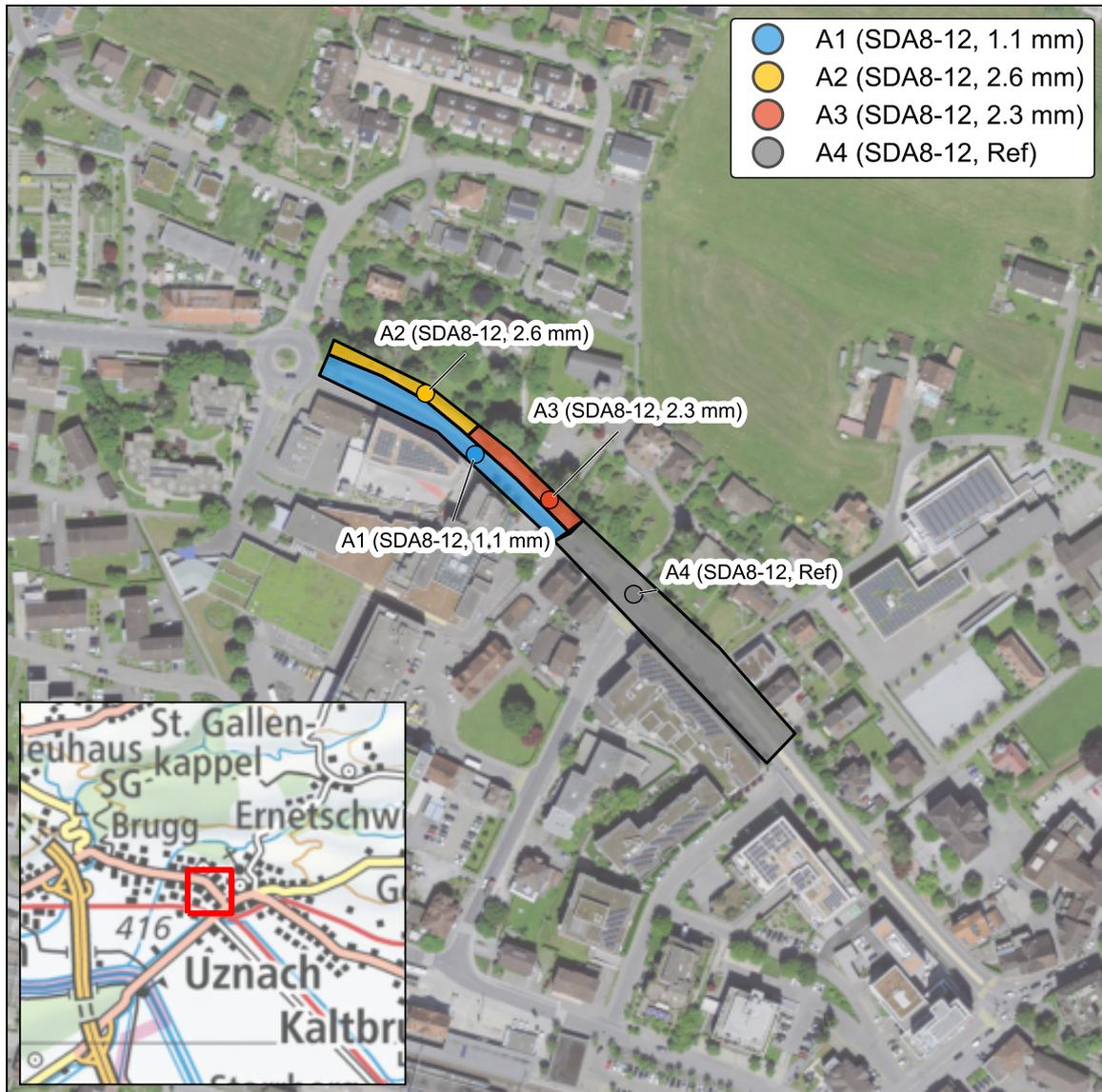
15.04.2024

## P. Uznach, SG

**Tabelle P.1:** Abschnitte in Uznach.

Belag	Abschnitt	Fräsdatum	Fahrbahn	Länge	Abtrag	Bezeichnung in Plots
SDA 8-12 (2017)	A1	26.08.2020	Rg Südost	130 m	1.1 mm (1x WZb)	A1 (SDA 8-12, 1.1 mm)
	A2	26.08.2020	Rg Nordwest	65 m	2.3 mm (2x WZb)	A2 (SDA 8-12, 2.3 mm)
	A3	26.08.2020	Rg Nordwest	65 m	2.6 mm (2x WZb/slow)	A3 (SDA 8-12, 2.6 mm)
	Referenz		Rg NW+SO	150 m	ungeschliffen	Ref (SDA 8-12)

**P.1. Übersichtskarte**

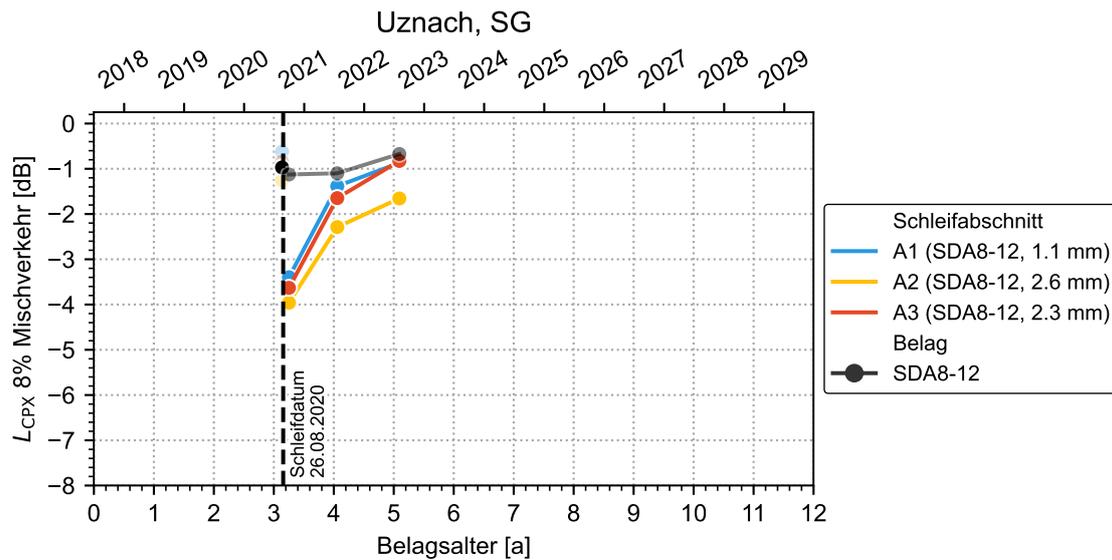


**Abbildung P.1:** Übersichtskarte Uznach, SG mit Lage der Abschnitte

## P.2. Akustische Resultate

### P.2.1 CPX-Streckenverlauf

### P.2.2 CPX- Zeitverlauf



**Abbildung P.2:** Verlauf der akustischen Belagsgüte (Mischverkehr mit 8% N2-Anteil) in beiden Fahrrichtungen in Uznach. Das Schleifdatum war auf dieser Strecke der 26.08.2020.

### P.2.3 Akustische Regeneration

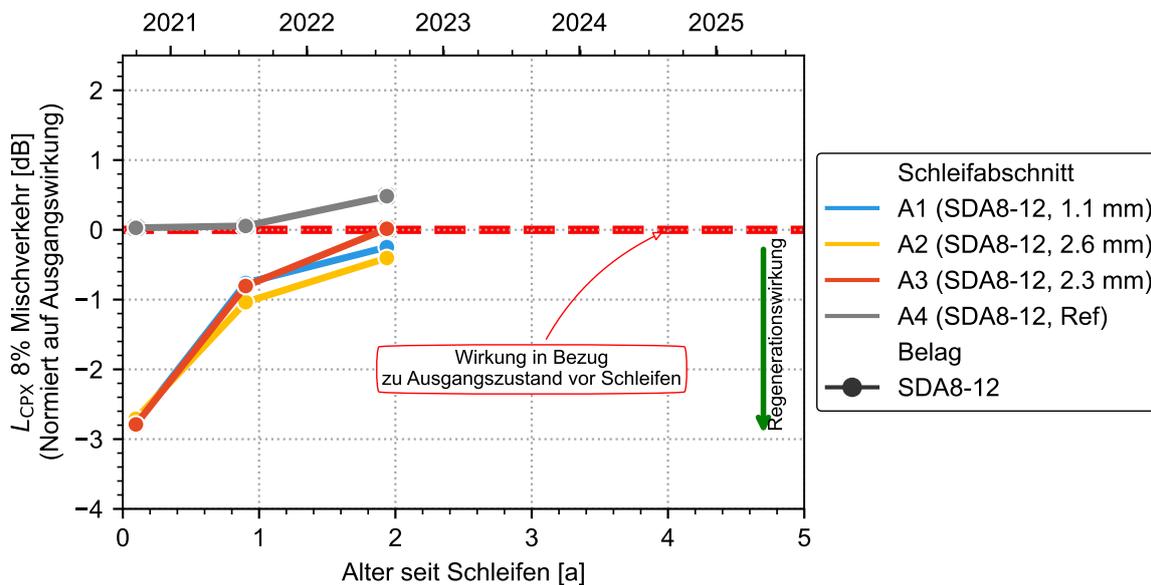


Abbildung P.3: Streckenverlauf Uznach

### P.2.4 Akustische Wirkung

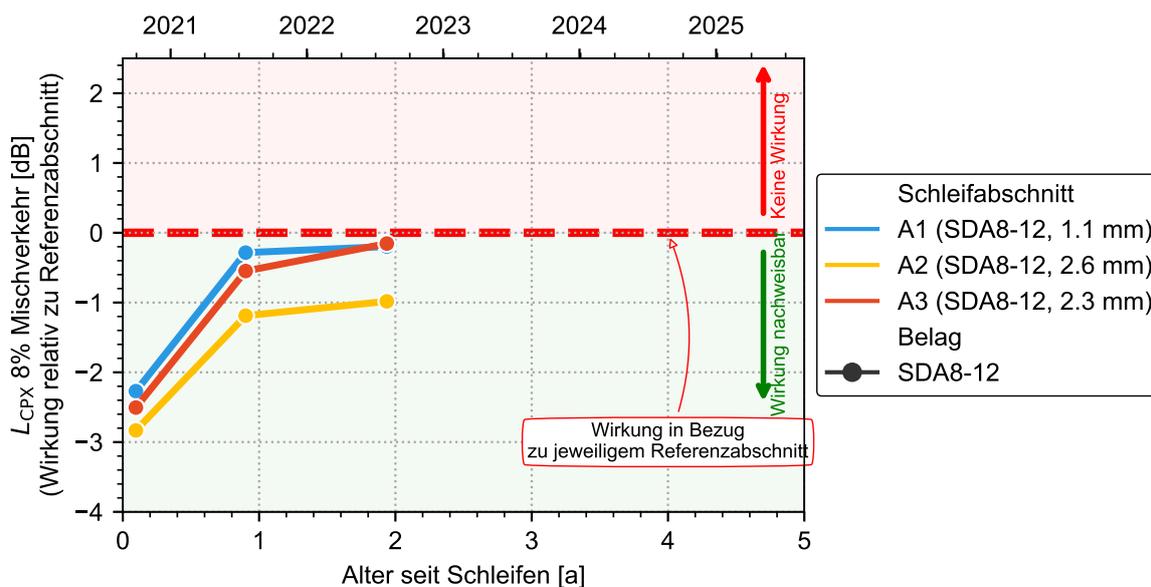


Abbildung P.4: Wirkung relativ zu Referenzabschnitt

### P.2.5 Spektralanalyse

Bei den Spektralanalysen wird jeweils die spektrale Veränderung der gemessenen CPX-Pegel im Zeitraum von der letzten Messung vor der Schleifmassnahme gezeigt. In den Abbildungen wird unterschieden zwischen den PKW und LKW Messreifen. Ebenfalls werden die Gesamtpegel im rechten Teil ebenfalls für PKW, LKW und den Mischverkehr (N2-Anteil von 8%) gezeigt.

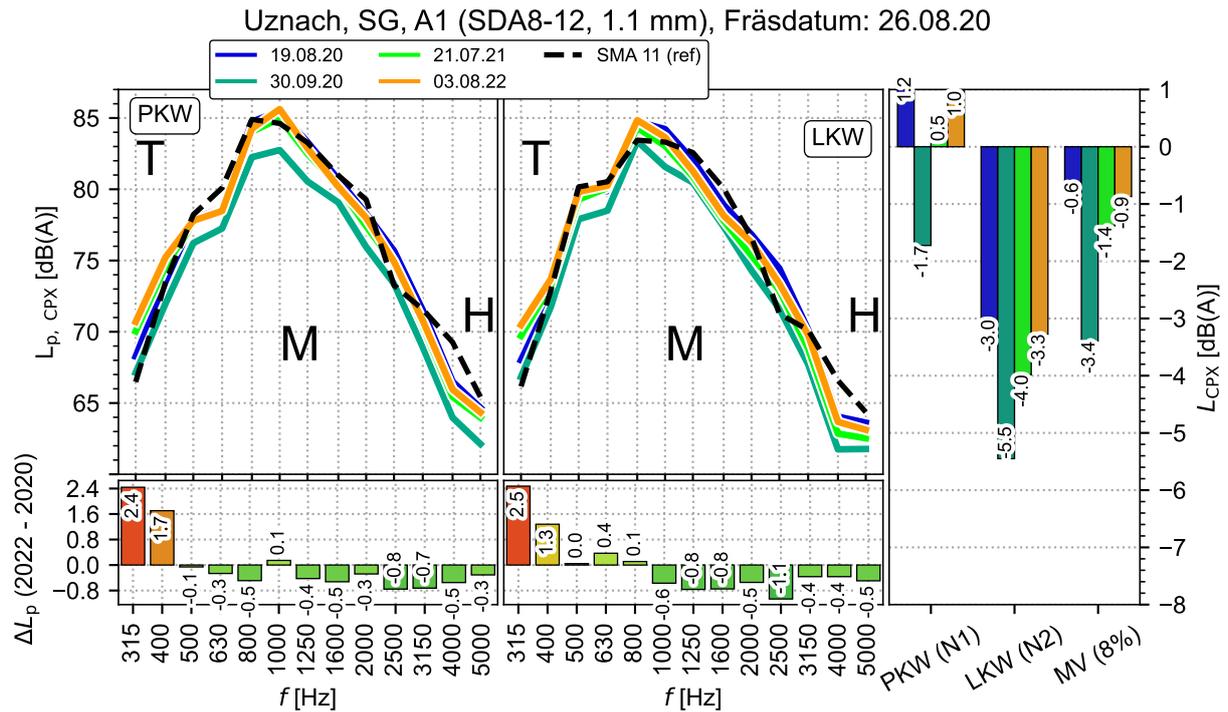
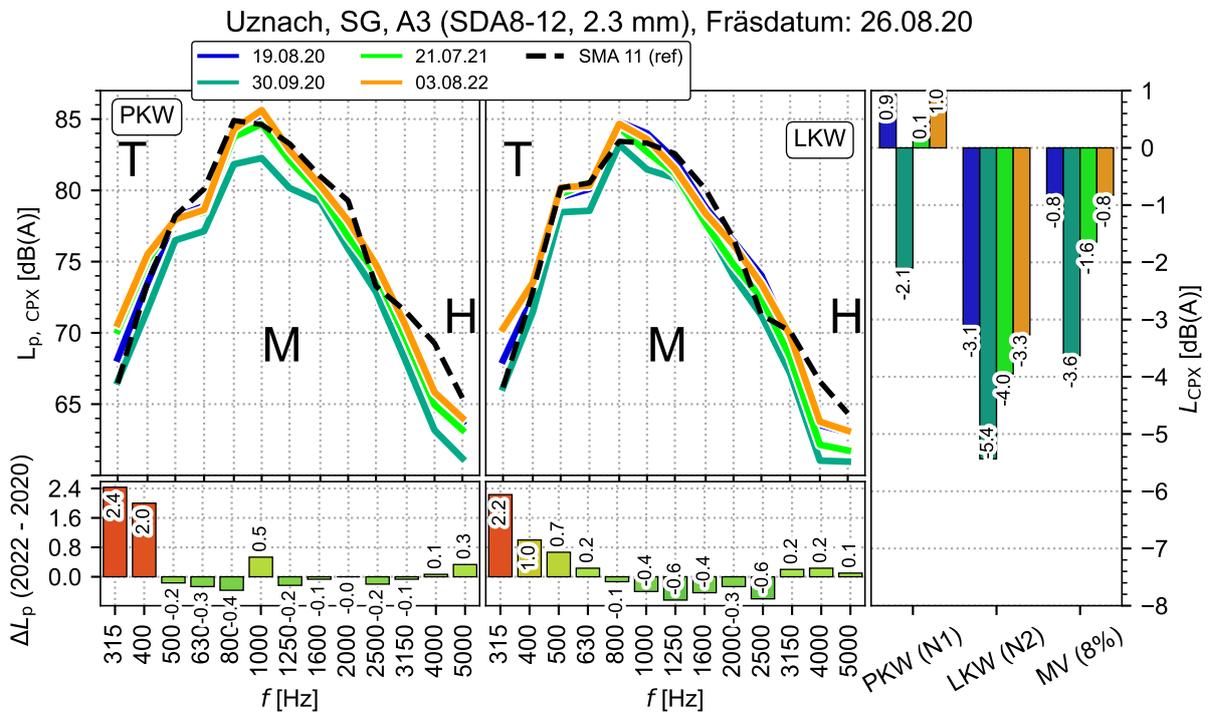
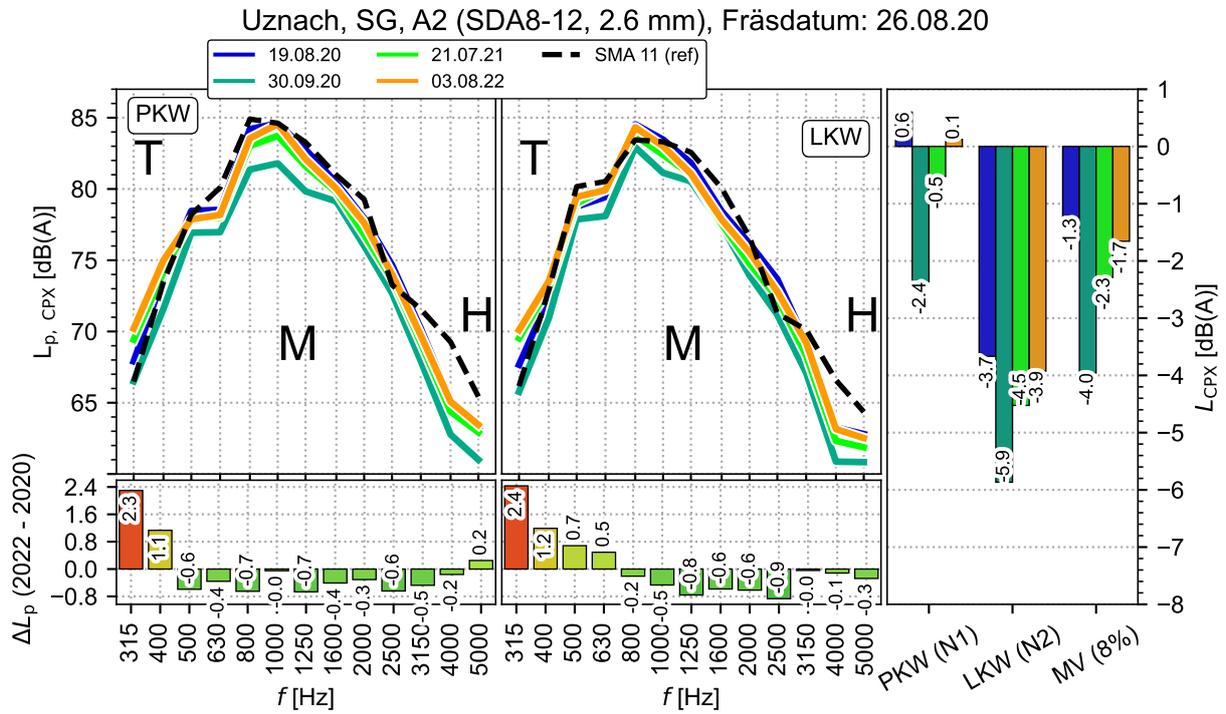


Abbildung P.5: Spektralanalyse in Uznach, A1



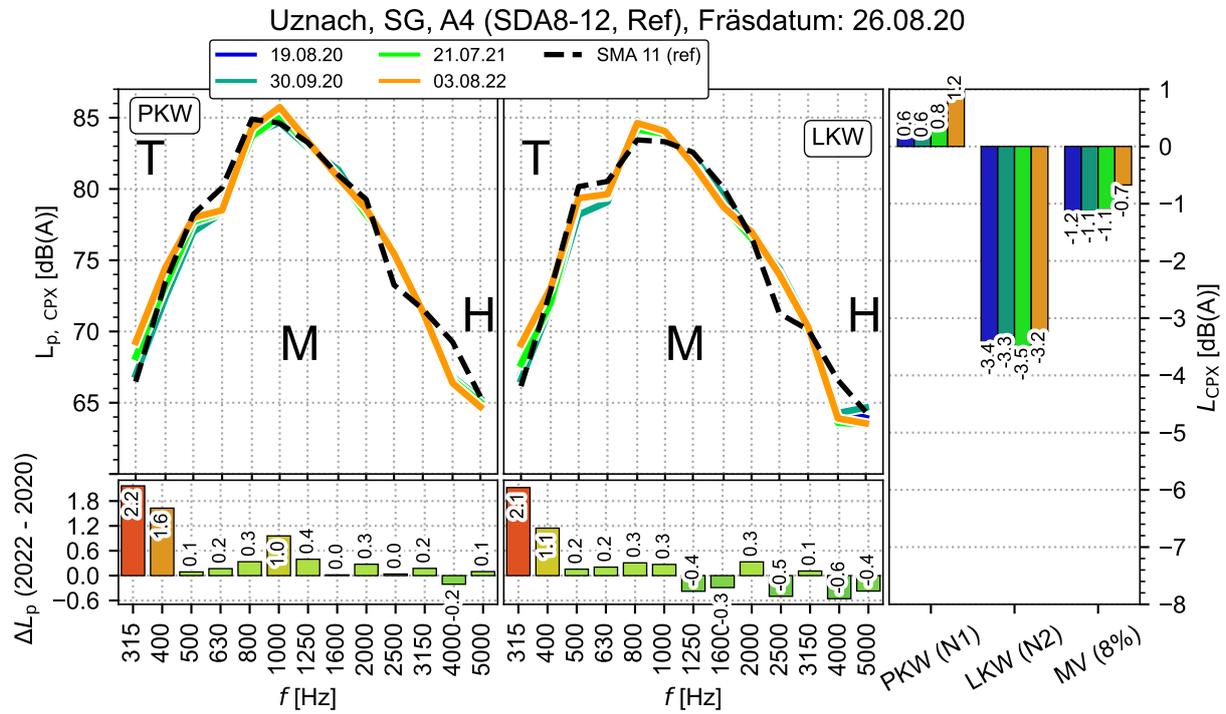


Abbildung P.8: Spektralanalyse in Uznach, A4

## P.2.6 Akustische Regeneration

## P.3. Texturanalysen

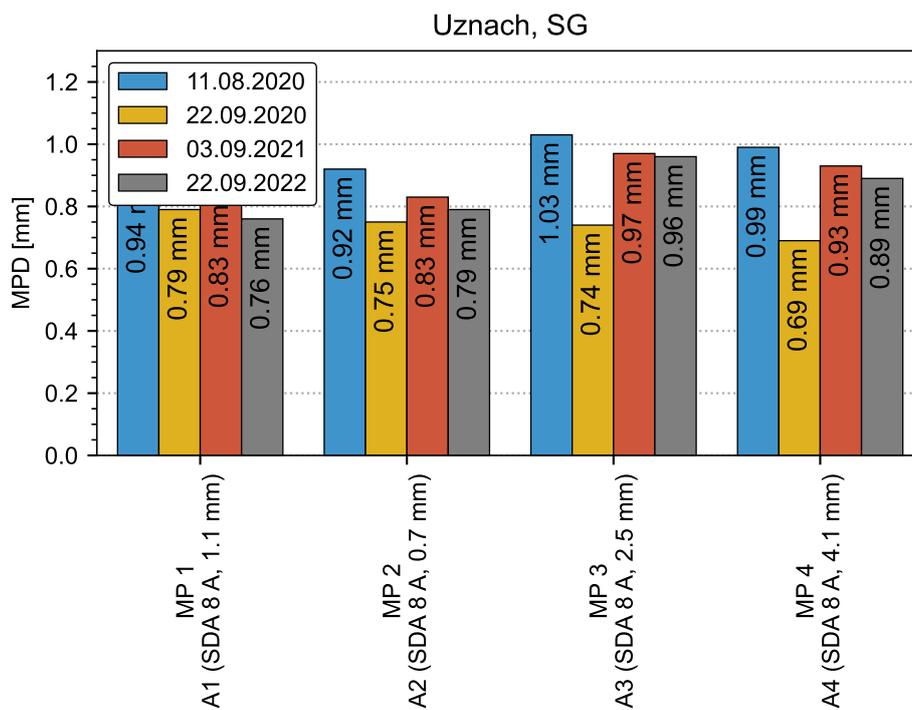


Abbildung P.9: Caption

### P.3.1 Spektralanalysen

Bei den Spektralanalysen wird jeweils die spektrale Veränderung der gemessenen CPX-Pegel im Zeitraum von der letzten Messung vor der Schleifmassnahme gezeigt. In den Abbildungen wird unterschieden zwischen den PKW und LKW Messreifen. Ebenfalls werden die Gesamtpegel im rechten Teil ebenfalls für PKW, LKW und den Mischverkehr (N2-Anteil von 8%) gezeigt.

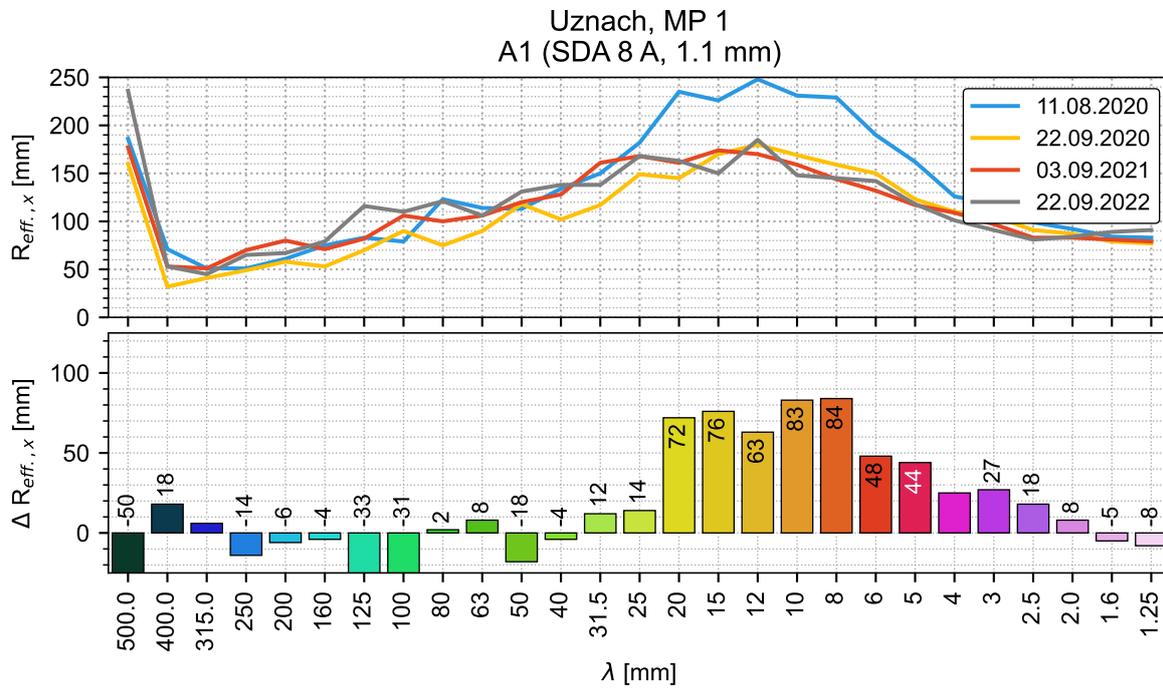


Abbildung P.10: Spektralanalysen Uznach, Messpunkt 1

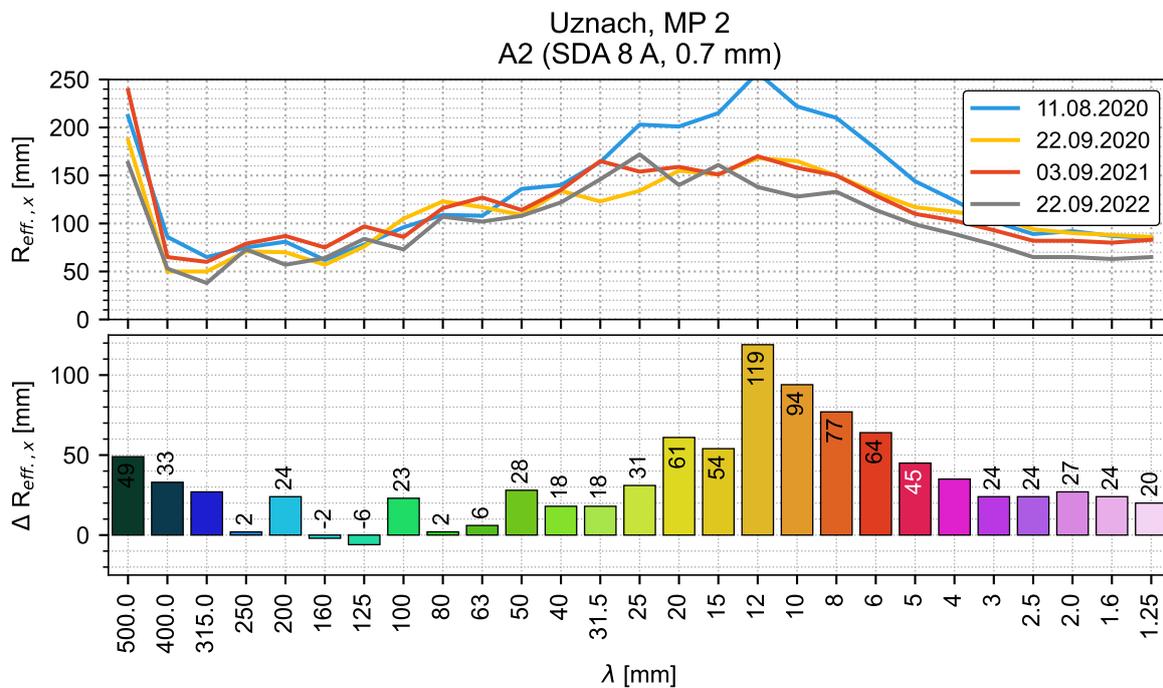


Abbildung P.11: Spektralanalysen Uznach, Messpunkt 2

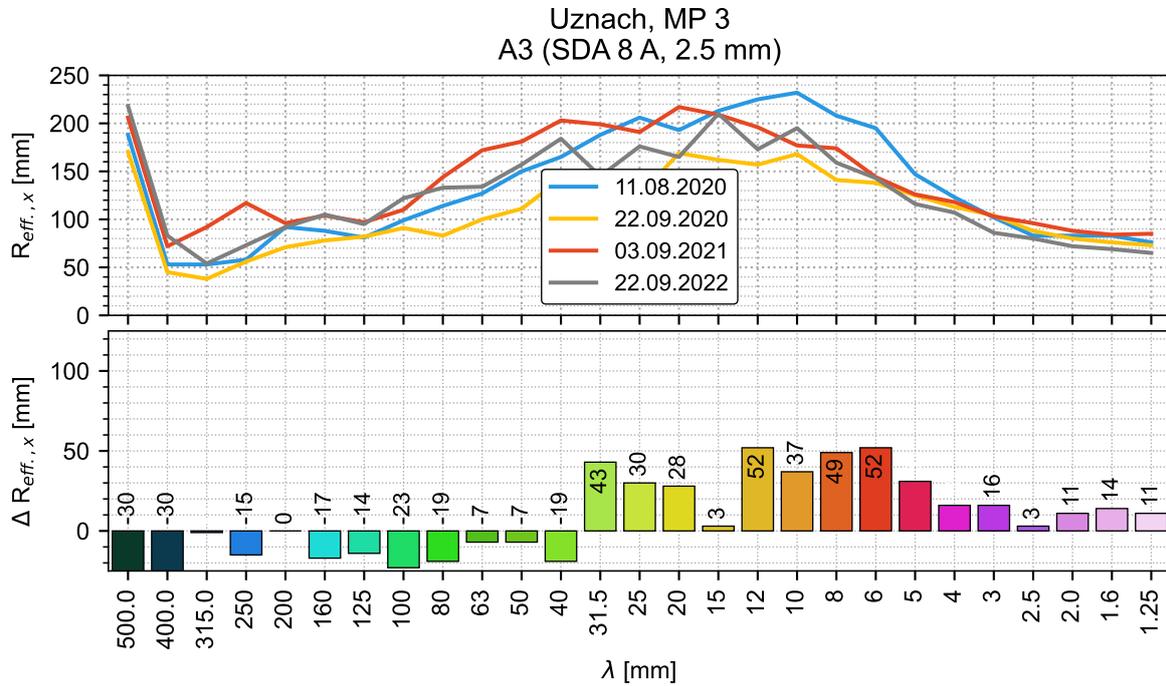


Abbildung P.12: Spektralanalysen Uznach, Messpunkt 3

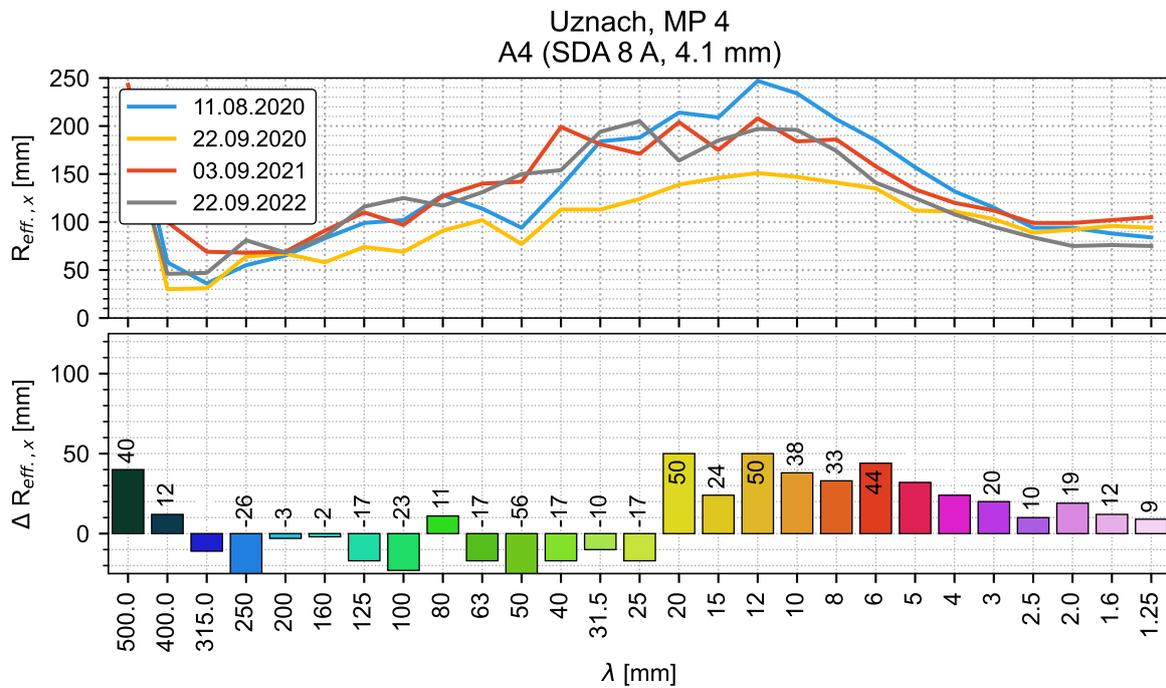


Abbildung P.13: Spektralanalysen Uznach, Messpunkt 4

## Q. Veyrier, GE

**Tabelle Q.1:** Abschnitte in Stadt Genf, Quai Ansermet.

Belag	Abschnitt	Fräsdatum	Fahrbahn	Länge	Abtrag	Bezeichnung in Plots
Sapaphone 4 (2009)	A1	05.08.2021	Rg Ost	300 m	3.3 mm (1x WZb)	A1 (Sapaphone 4, 3.2 mm)
	A2	05.08.2021	Rg Ost	300 m	3.1 mm (1x WZb)	A2 (Sapaphone 4, 3.1 mm)
	A3	05.08.2021	Rg West	300 m	2 mm (1x WZb/fast)	A3 (Sapaphone 4, 2 mm)
	A4	05.08.2021	Rg West	300 m	1.6 mm (1x WZb/fast)	A4 (Sapaphone 4, 1.6 mm)
	Referenz			Rg Ost+West	2 x 150 m	ungeschliffen

### Q.1. Übersichtskarte

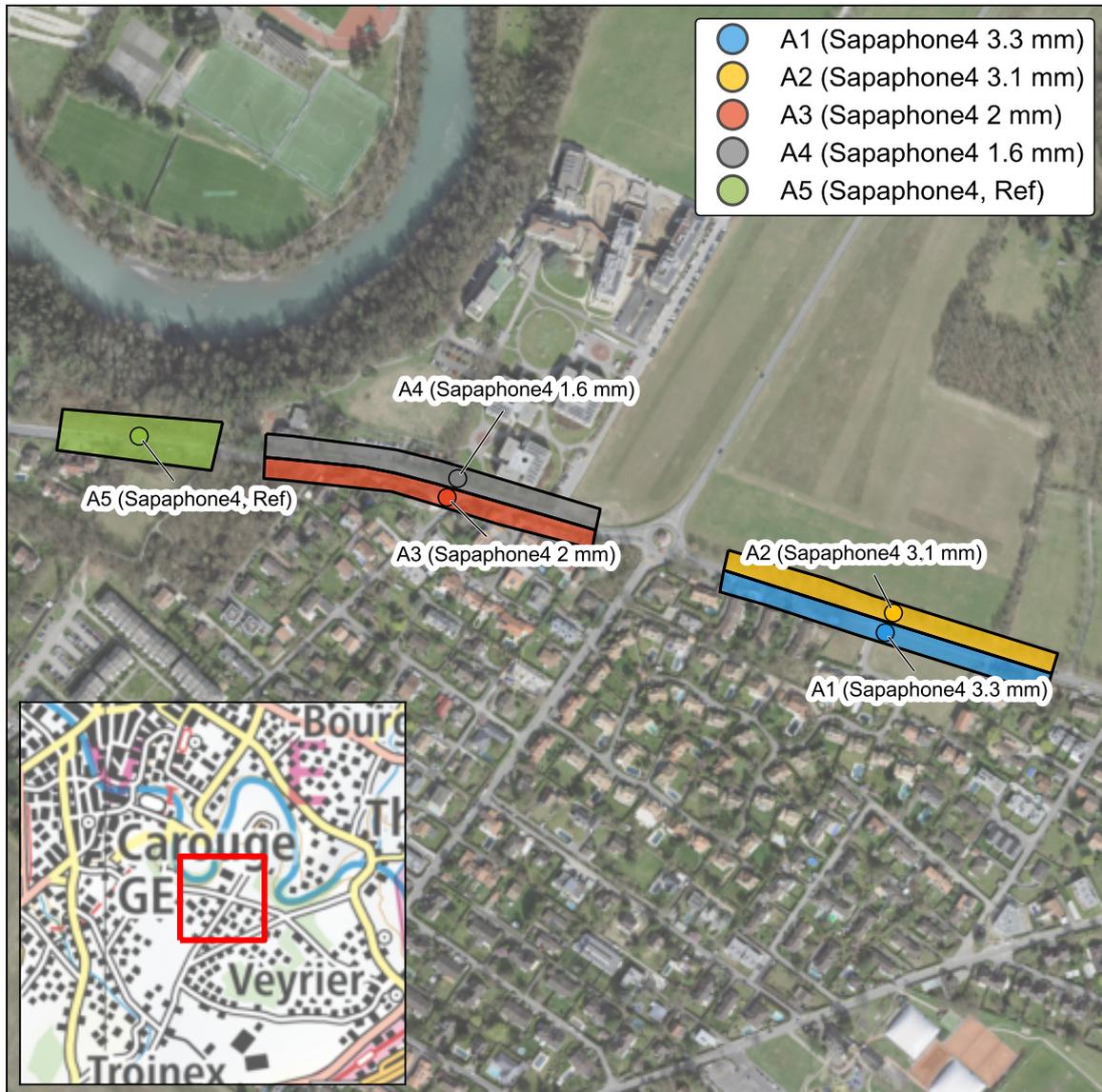
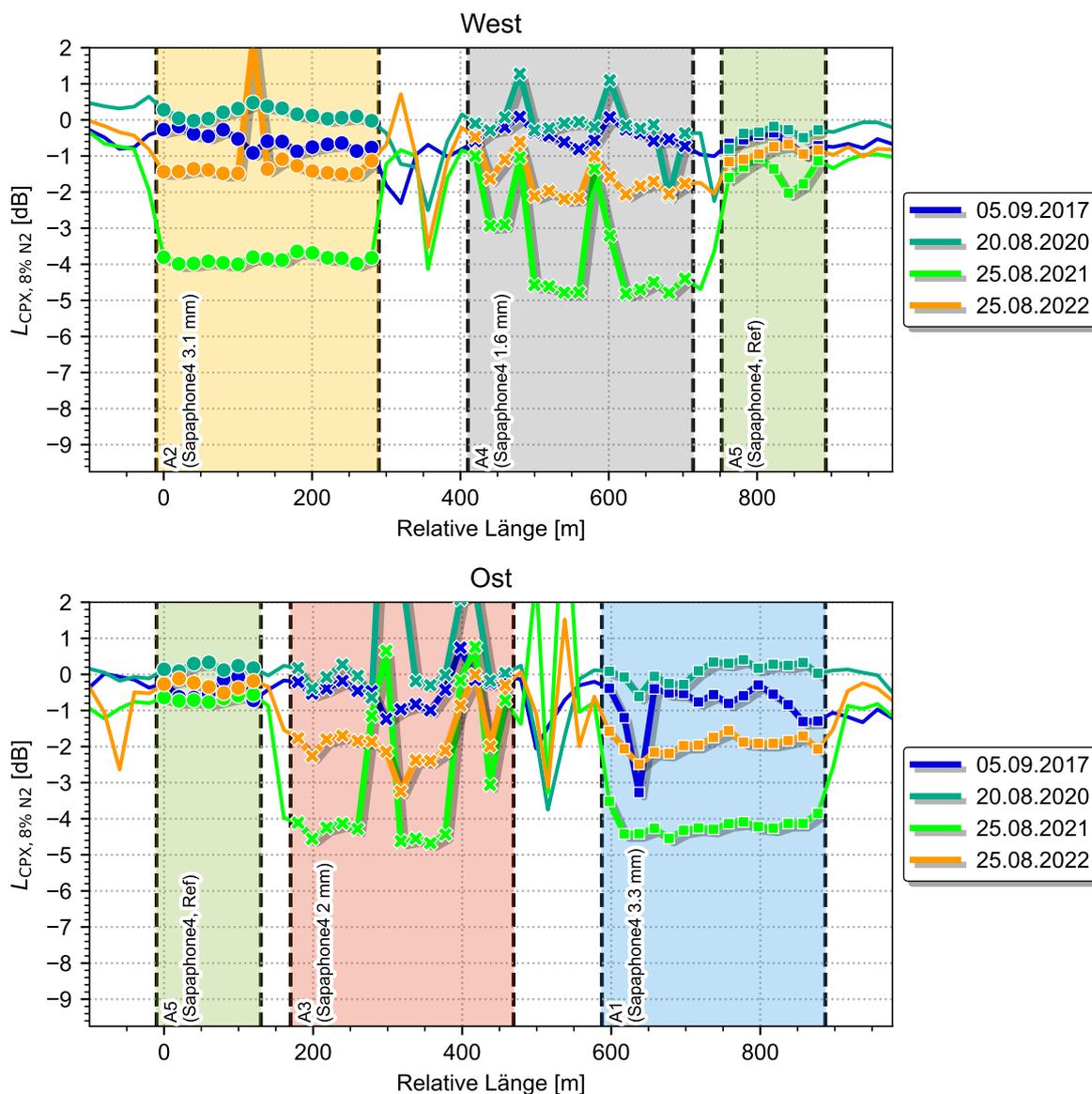


Abbildung Q.1: Übersichtskarte Veyrier, GE mit Lage der Abschnitte

## Q.2. Akustische Resultate

### Q.2.1 CPX-Streckenverlauf



**Abbildung Q.2:** Verlauf der akustischen Belagsgüte (Mischverkehr mit 8% N2-Anteil) in beiden Fahr-richtungen in Veyrier. Das Schleifdatum war auf dieser Strecke der 05.08.2021.

### Q.2.2 CPX- Zeitverlauf

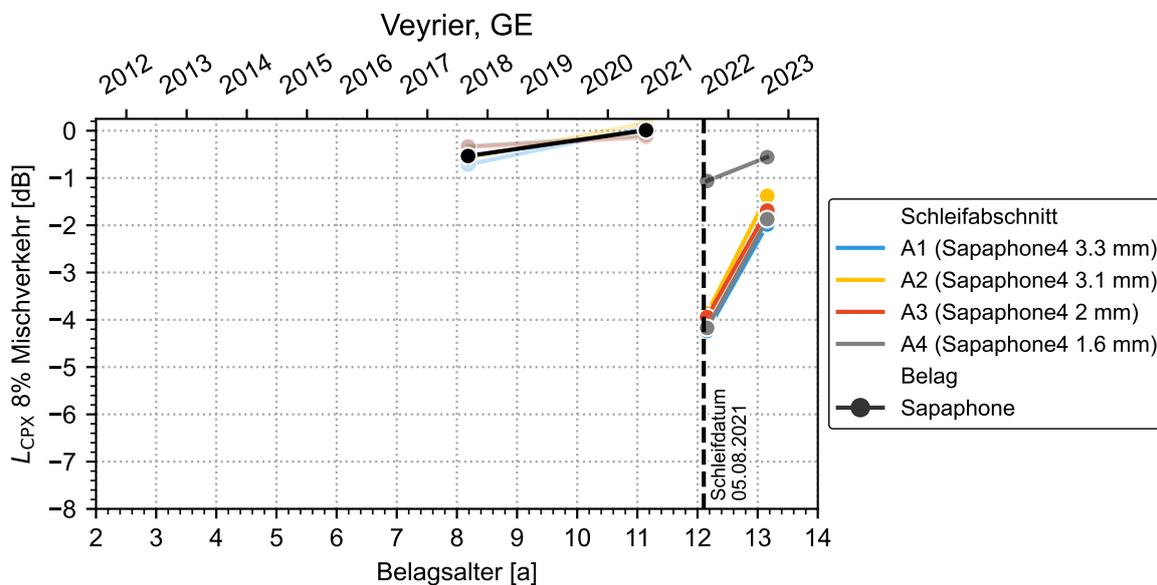


Abbildung Q.3: Wirkung der Schleifmassnahmen Veyrier, GE

### Q.2.3 Akustische Regeneration

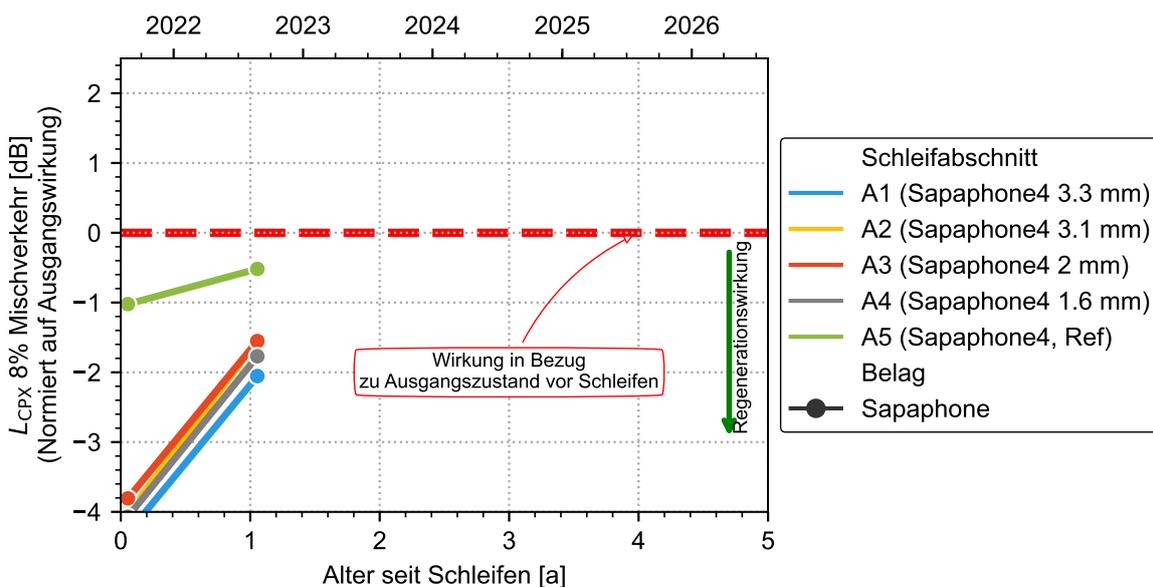


Abbildung Q.4: Streckenverlauf Veyrier

### Q.2.4 Akustische Wirkung

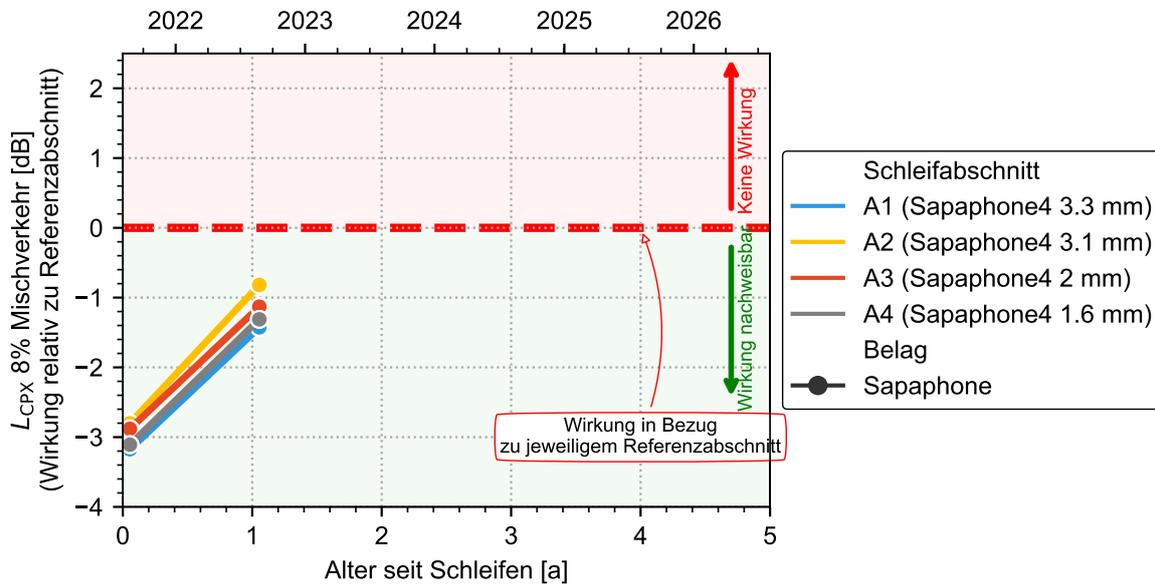


Abbildung Q.5: Wirkung relativ zu Referenzabschnitt

### Q.2.5 Spektralanalyse

Bei den Spektralanalysen wird jeweils die spektrale Veränderung der gemessenen CPX-Pegel im Zeitraum von der letzten Messung vor der Schleifmassnahme gezeigt. In den Abbildungen wird unterschieden zwischen den PKW und LKW Messreifen. Ebenfalls werden die Gesamtpegel im rechten Teil ebenfalls für PKW, LKW und den Mischverkehr (N2-Anteil von 8%) gezeigt.

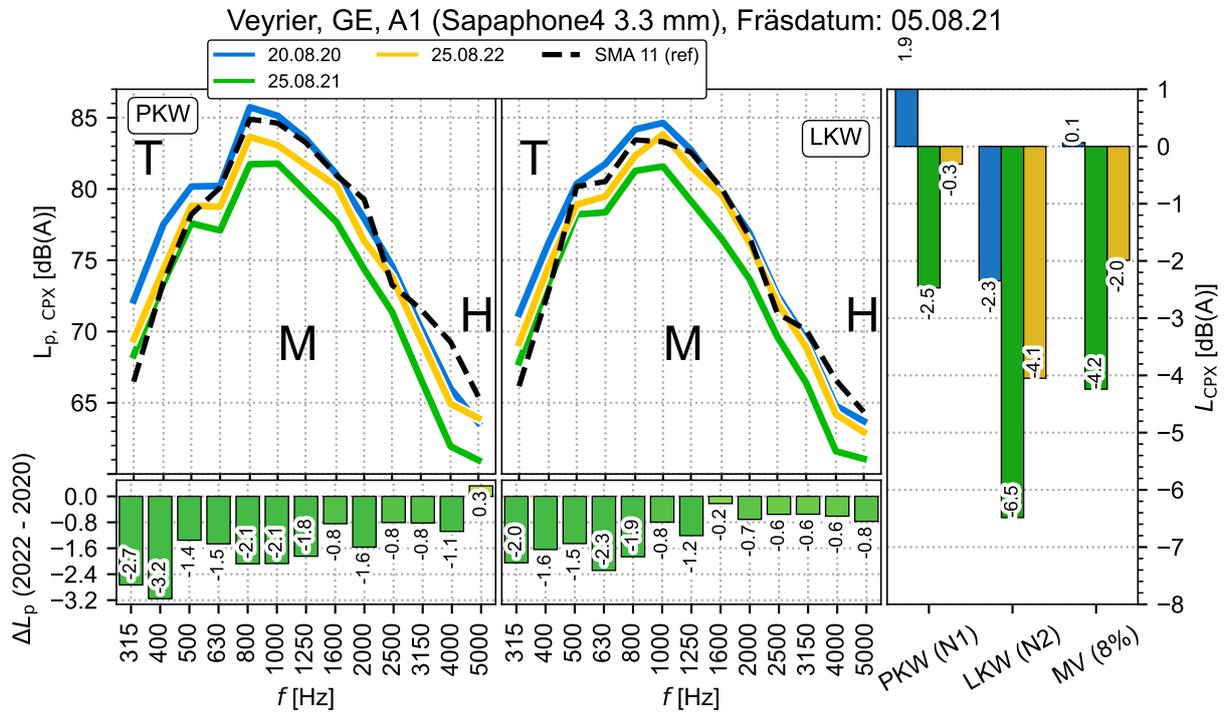


Abbildung Q.6: Spektralanalyse in Veyrier, A1, Sapaphone4

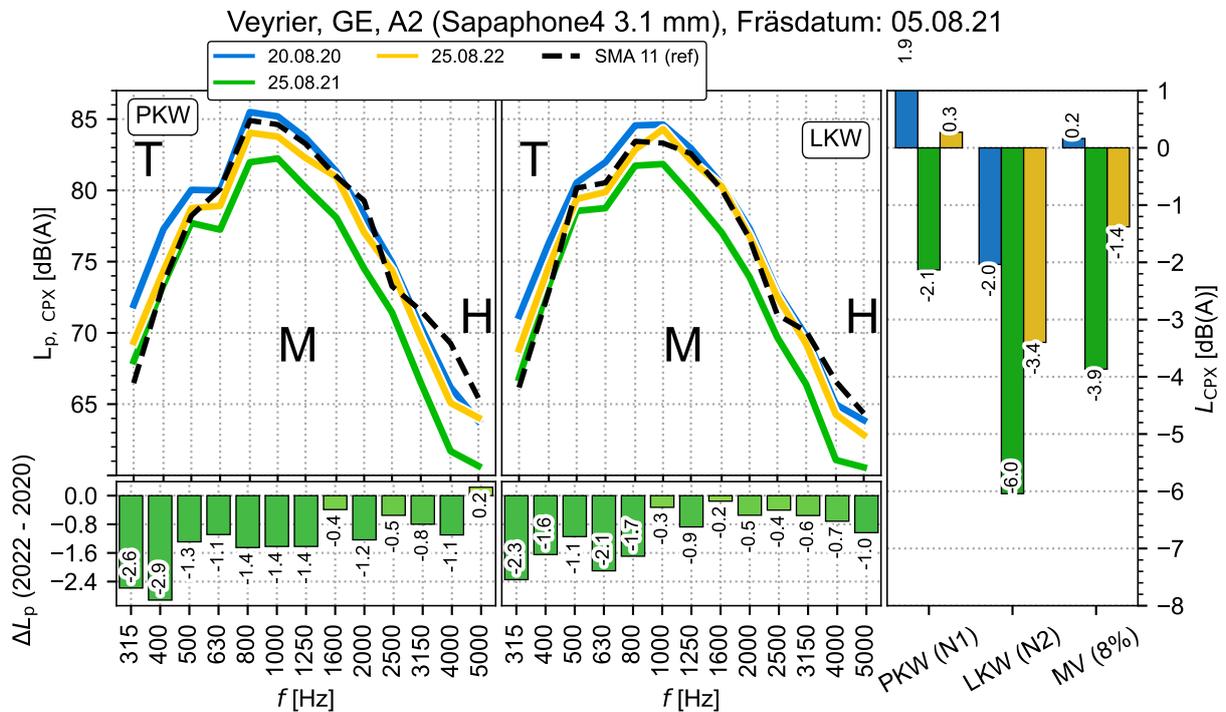


Abbildung Q.7: Spektralanalyse in Veyrier, A2, Sapaphone4

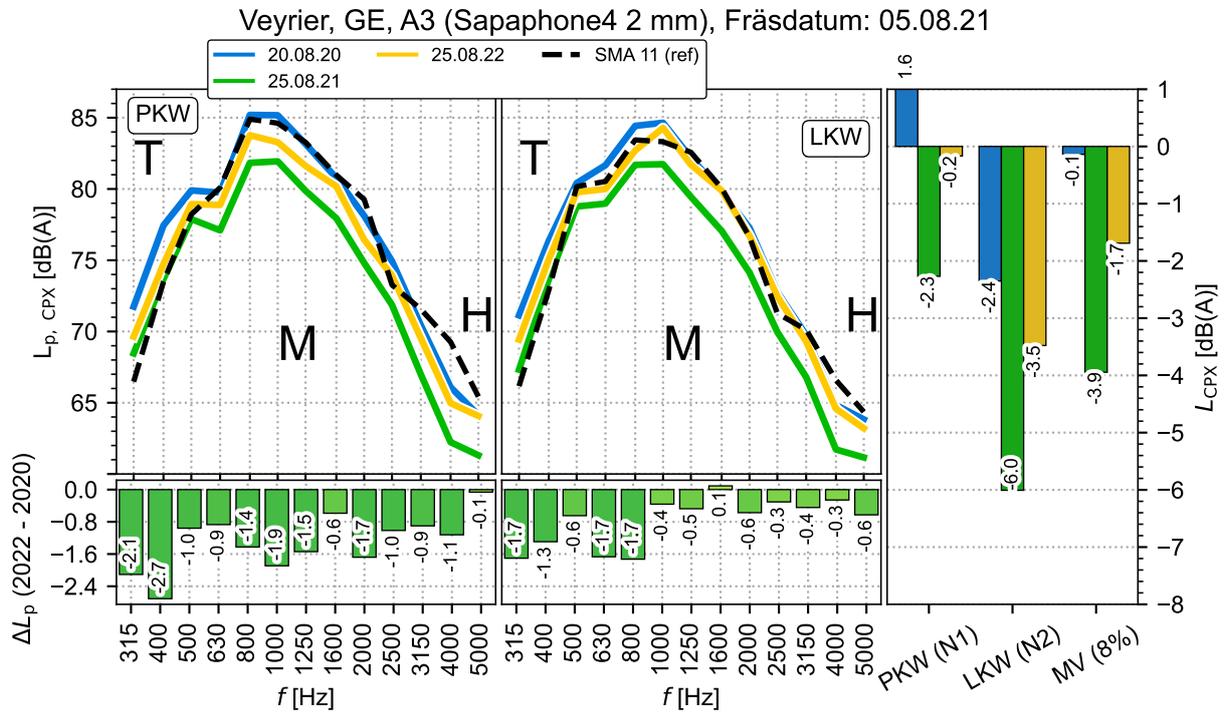


Abbildung Q.8: Spektralanalyse in Veyrier, A3, Sapaphone4

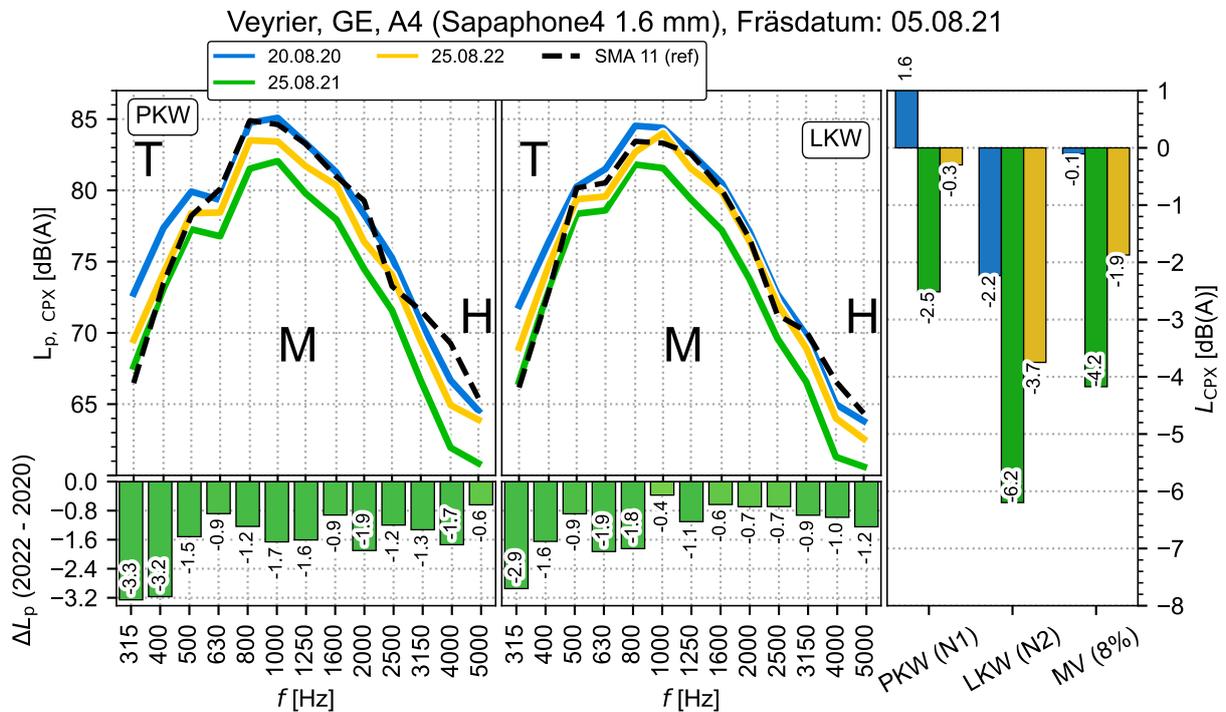


Abbildung Q.9: Spektralanalyse in Veyrier, A4, Sapaphone4

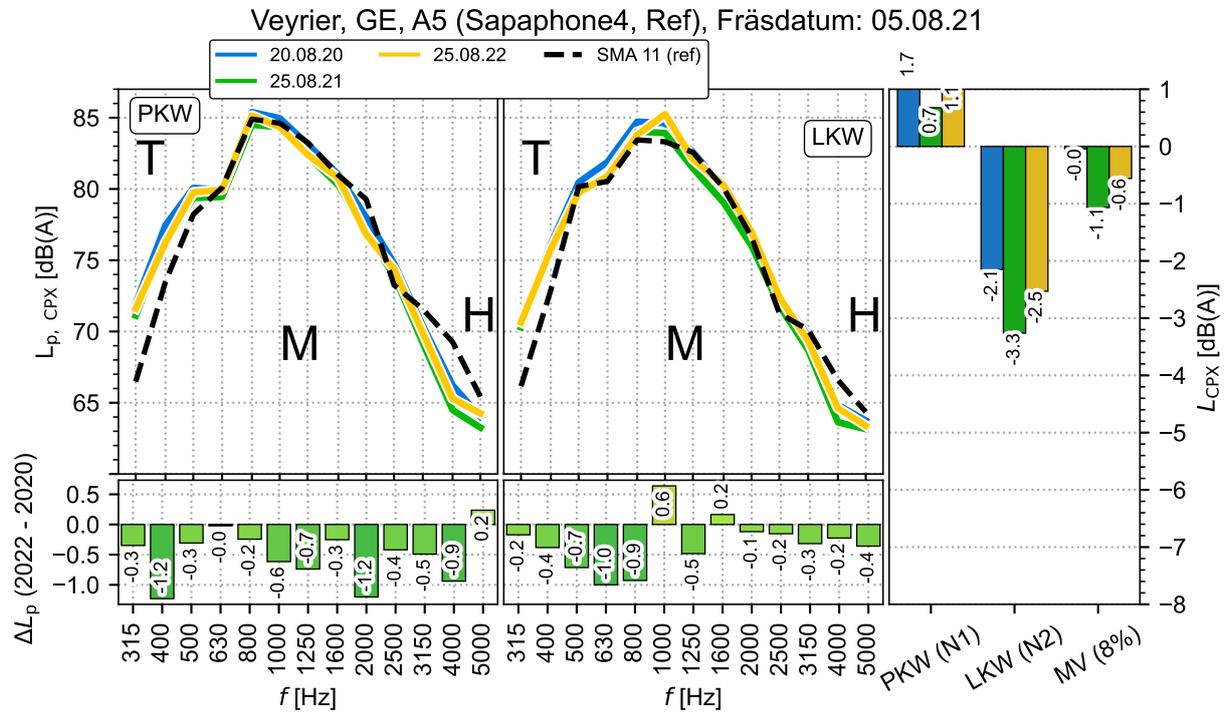


Abbildung Q.10: Spektralanalyse in Veyrier, A5, Referenz Sapaphone4

## R. Villarlod, FR

**Tabelle R.1:** Übersicht über die Fräsabschnitte in Villarlod, FR.

Belag	Abschnitt	Fräsdatum	Fahrbahn	Länge	Abtrag	Bezeichnung in Plots
ACMR 11 (2011)	A1.1	23.05.2019	Rg Ost	75 m	1.1 mm (1x WZb/slow)	A1.1 (ACMR 11, 1.1 mm)
	A1.2	23.05.2019	Rg Ost	75 m	0.5 mm (1x WZb/fast)	A1.2 (ACMR 11, 0.5 mm)
	Referenz		Rg West	150 m	ungeschliffen	Ref (ACMR 11)
ACMR 8 (2011)	A2	23.05.2019	Rg Ost	150 m	0.9 mm (1x WZb)	A2 (Famsi 4, 0.9 mm)
	Referenz		Rg West	150 m	ungeschliffen	Ref (ACMR 8)

### R.1. Übersichtskarte

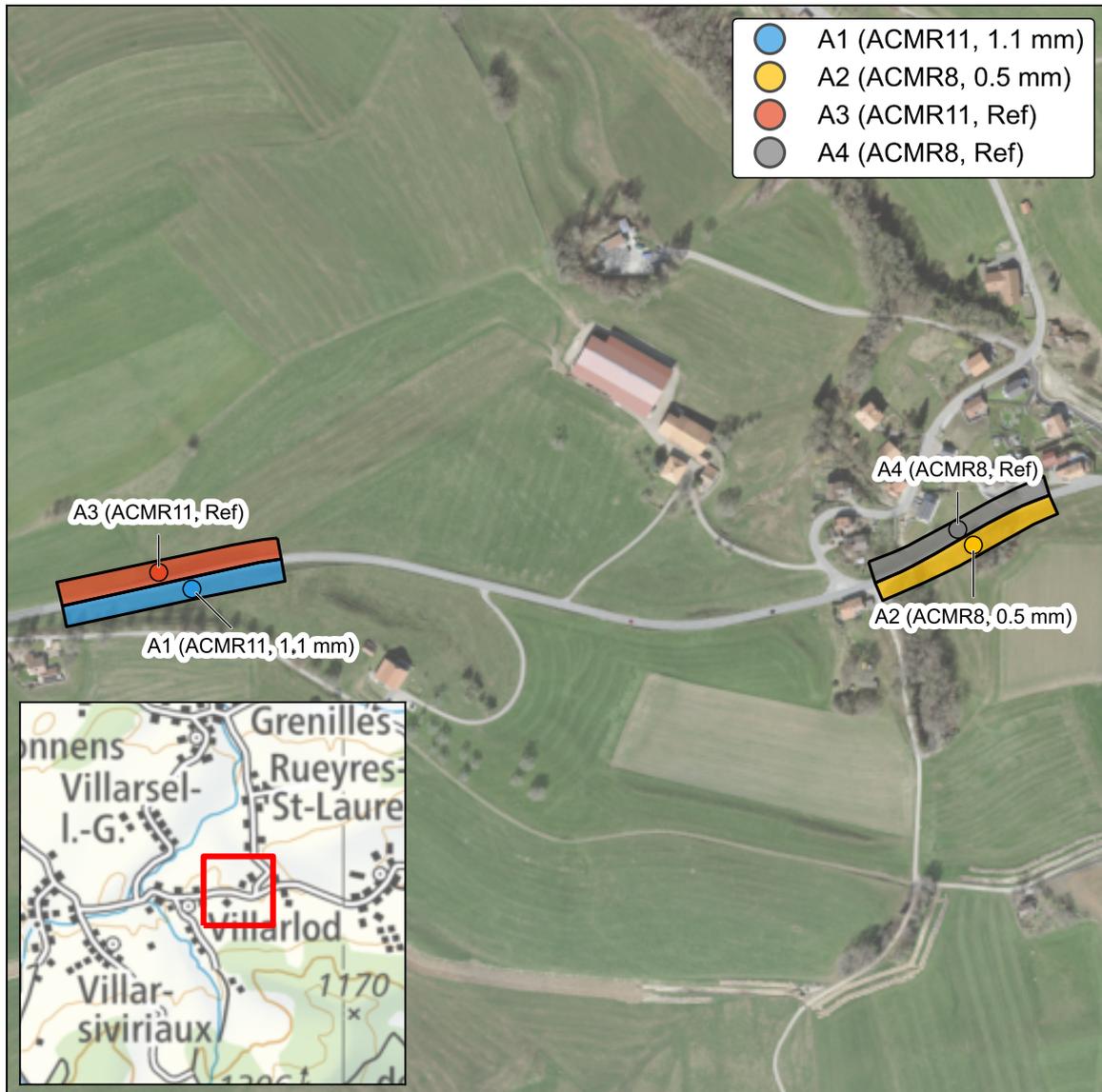
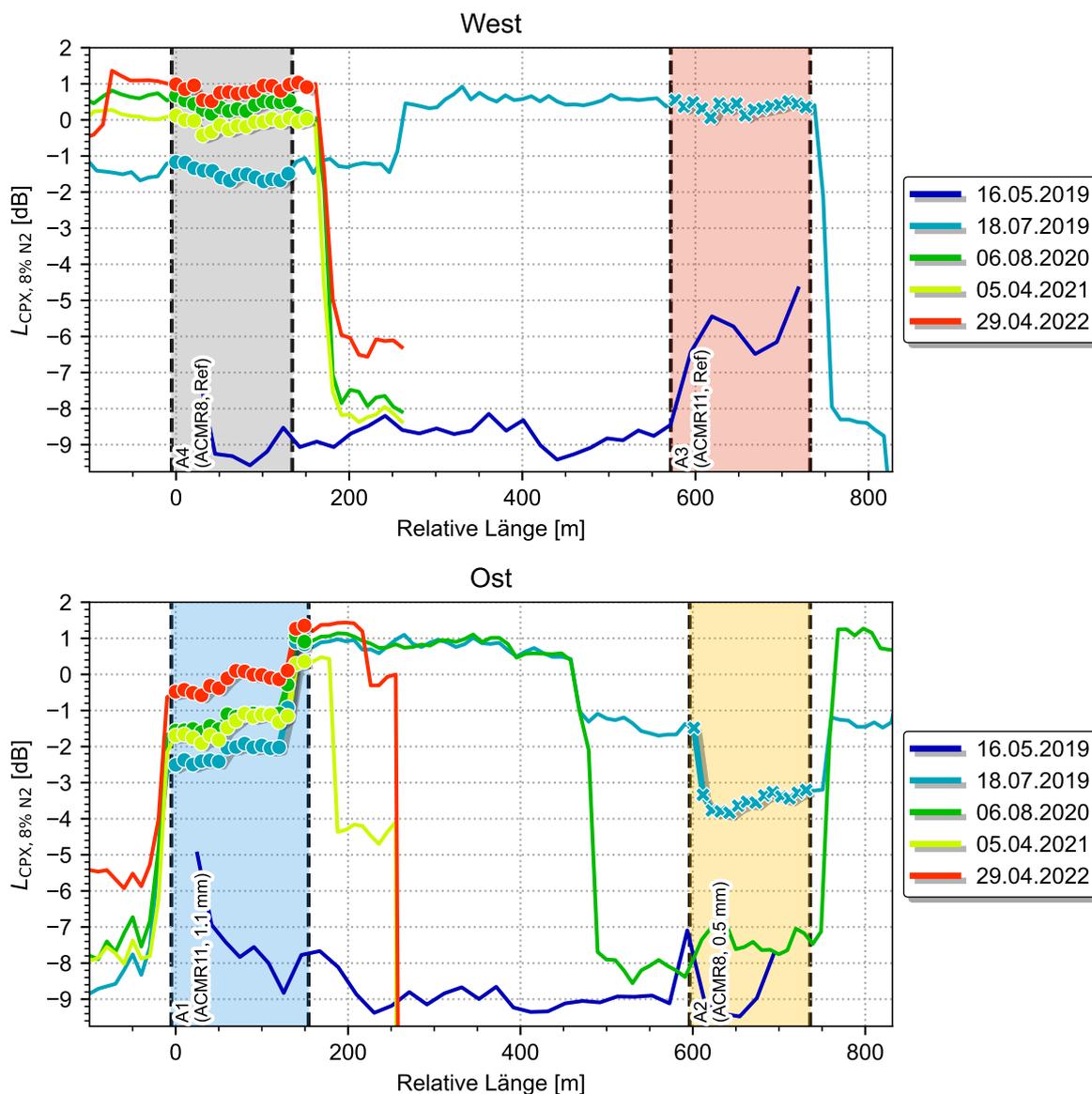


Abbildung R.1: Übersichtskarte Villarlod, FR mit Lage der Abschnitte

## R.2. Akustische Resultate

### R.2.1 CPX-Streckenverlauf



**Abbildung R.2:** Verlauf der akustischen Belagsgüte (Mischverkehr mit 8% N2-Anteil) in beiden Fahr-richtungen in Villarlod. Das Schleifdatum war auf dieser Strecke der 23.05.2019

### R.2.2 CPX- Zeitverlauf

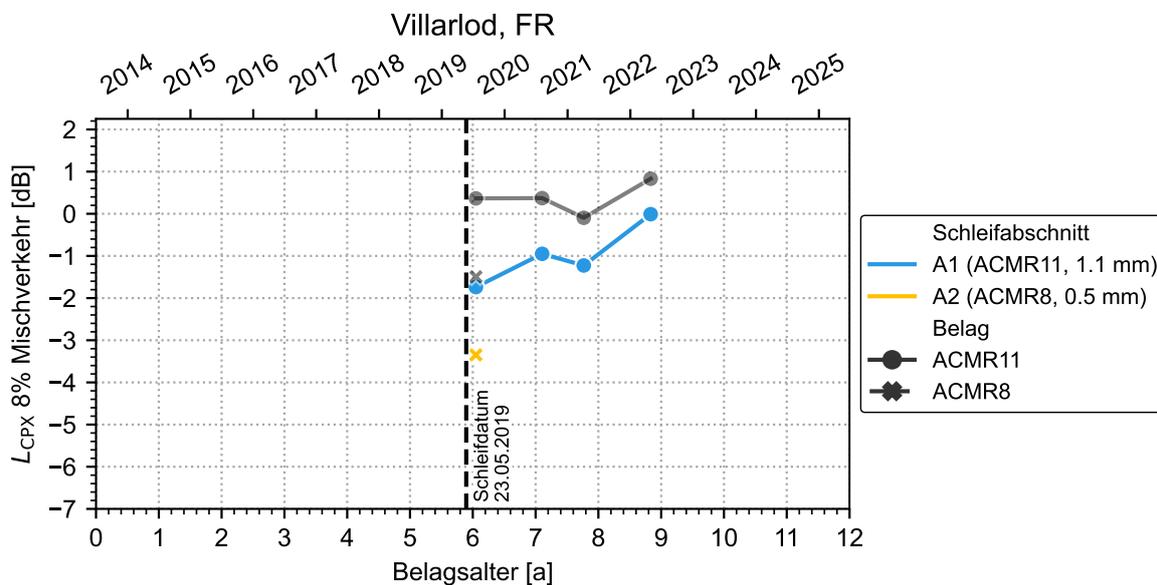


Abbildung R.3: Wirkung der Schleifmassnahmen Villarlod, FR

### R.2.3 Akustische Regeneration

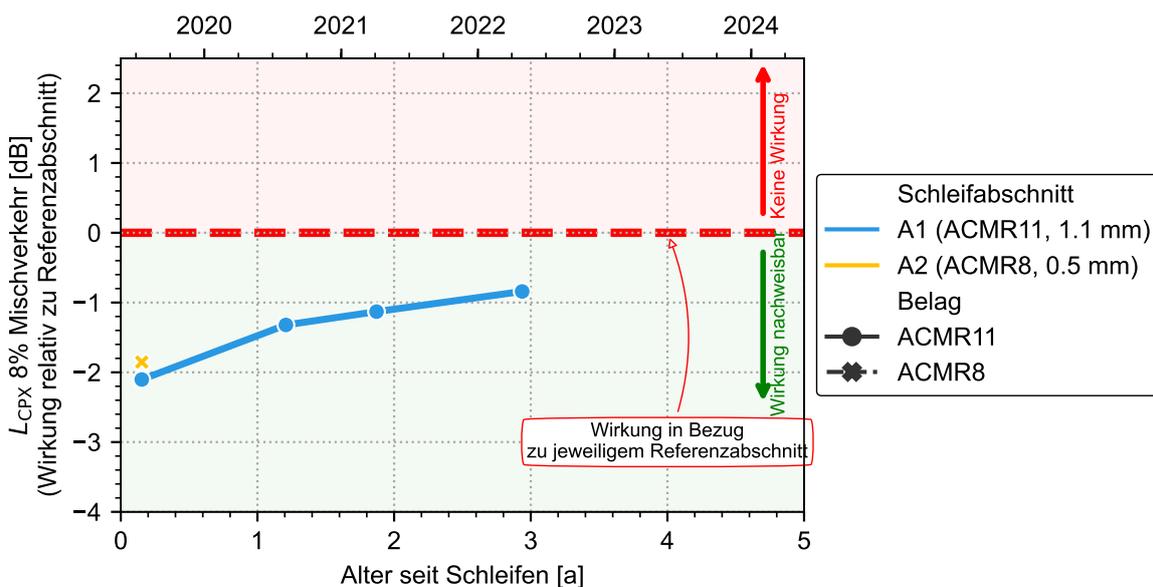


Abbildung R.4: Wirkung relativ zu Referenzabschnitt

### R.2.4 Spektralanalyse

Bei den Spektralanalysen wird jeweils die spektrale Veränderung der gemessenen CPX-Pegel im Zeitraum von der letzten Messung vor der Schleifmassnahme gezeigt. In den Abbildungen wird unterschieden zwischen den PKW und LKW Messreifen. Ebenfalls werden die Gesamtpegel im rechten Teil ebenfalls für PKW, LKW und den Mischverkehr (N2-Anteil von 8%) gezeigt.

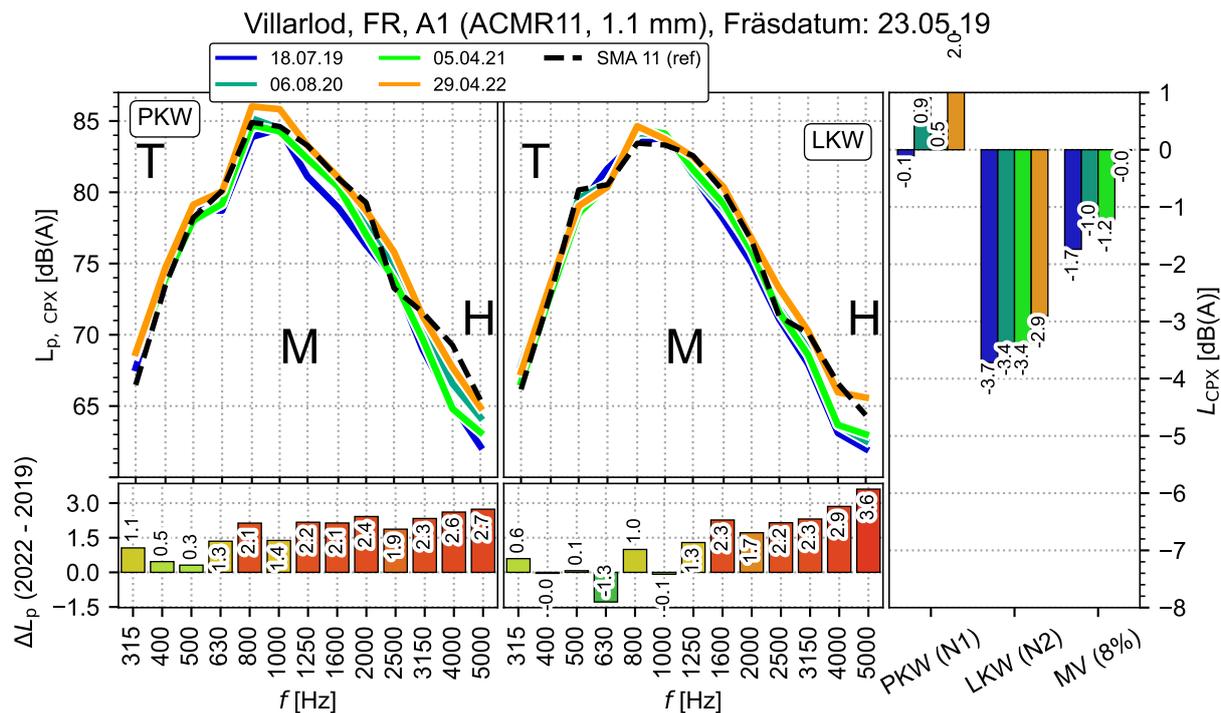


Abbildung R.5: Spektralanalyse in Villarlod, A1, ACMR11

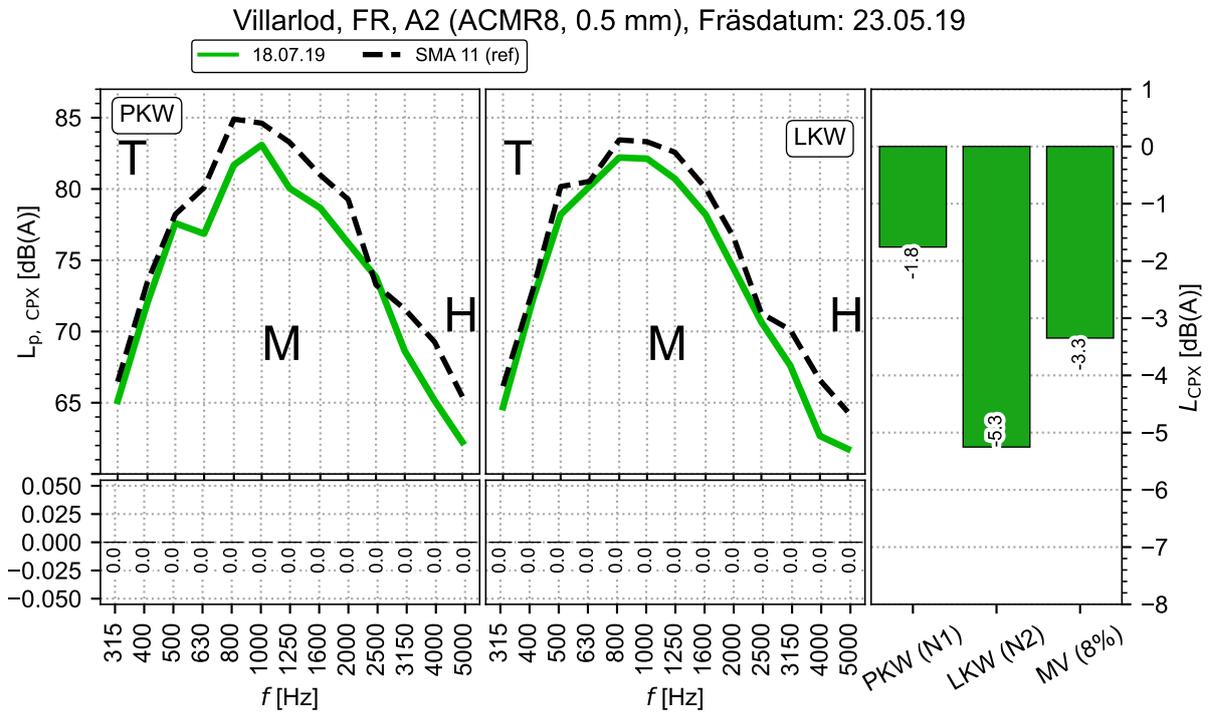


Abbildung R.6: Spektralanalyse in Villarlod, A2, ACMR8

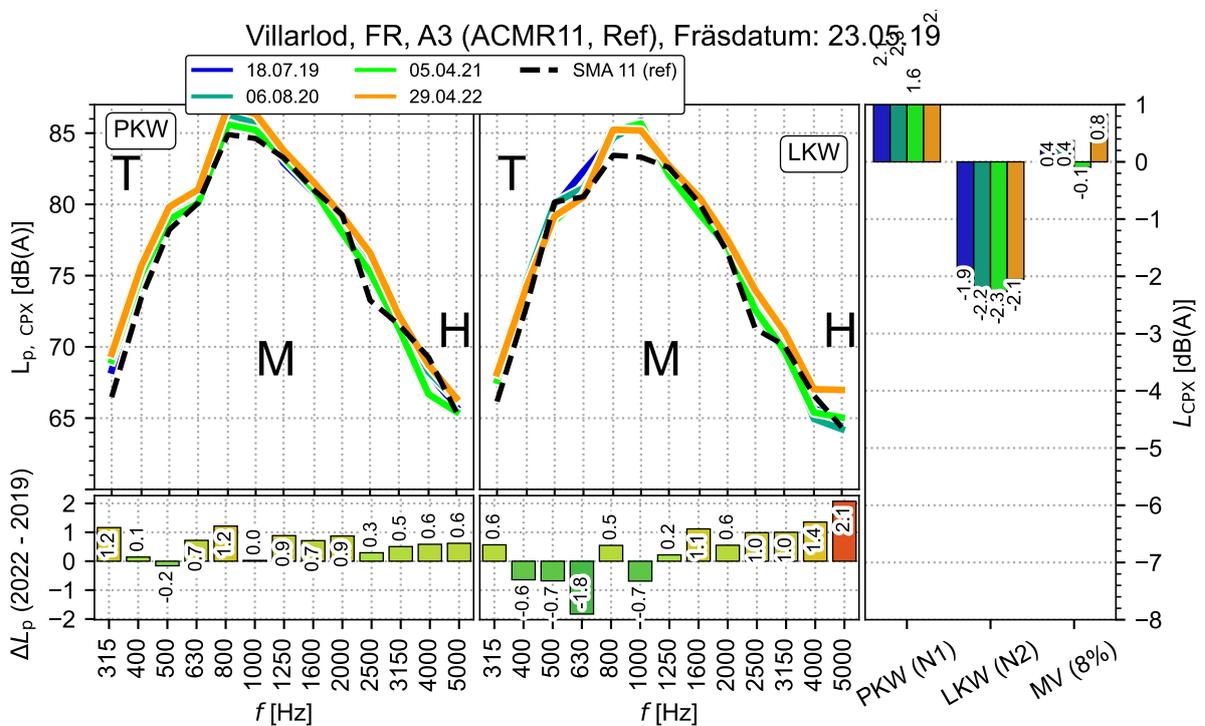


Abbildung R.7: Spektralanalyse in Villarlod, A3, ACMR11, Ref

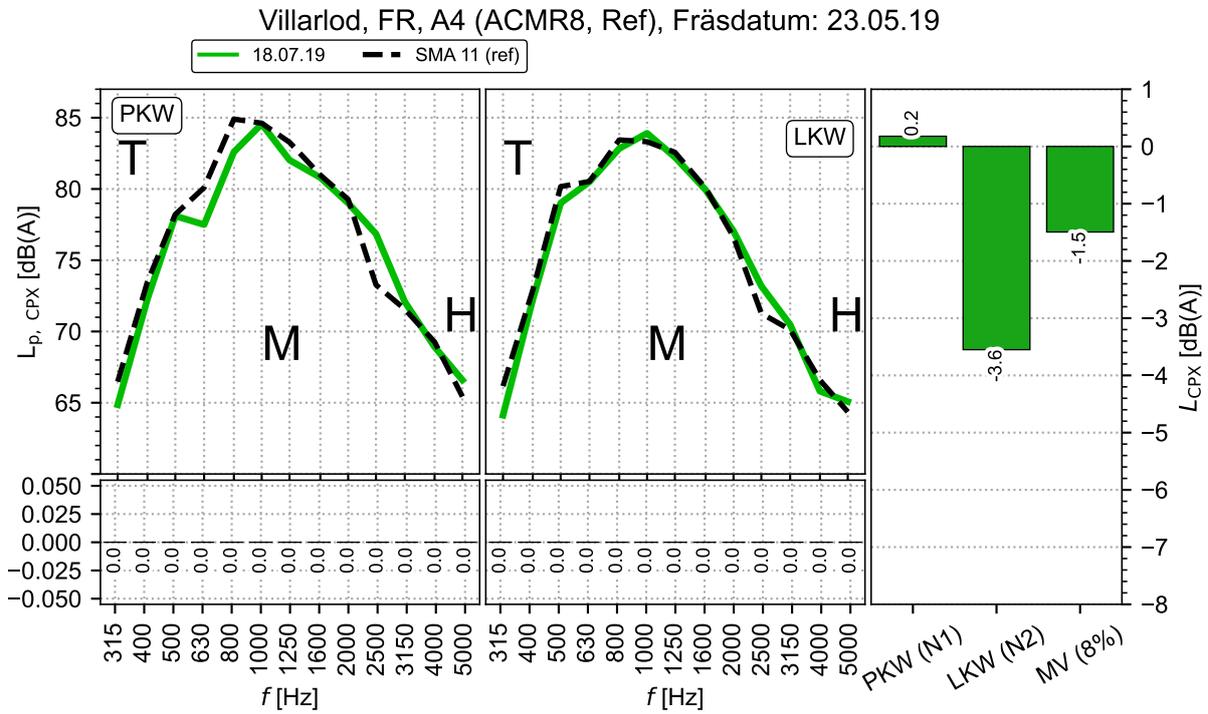


Abbildung R.8: Spektralanalyse in Villarlod, A4, ACMR8, Ref

## S. Zofingen

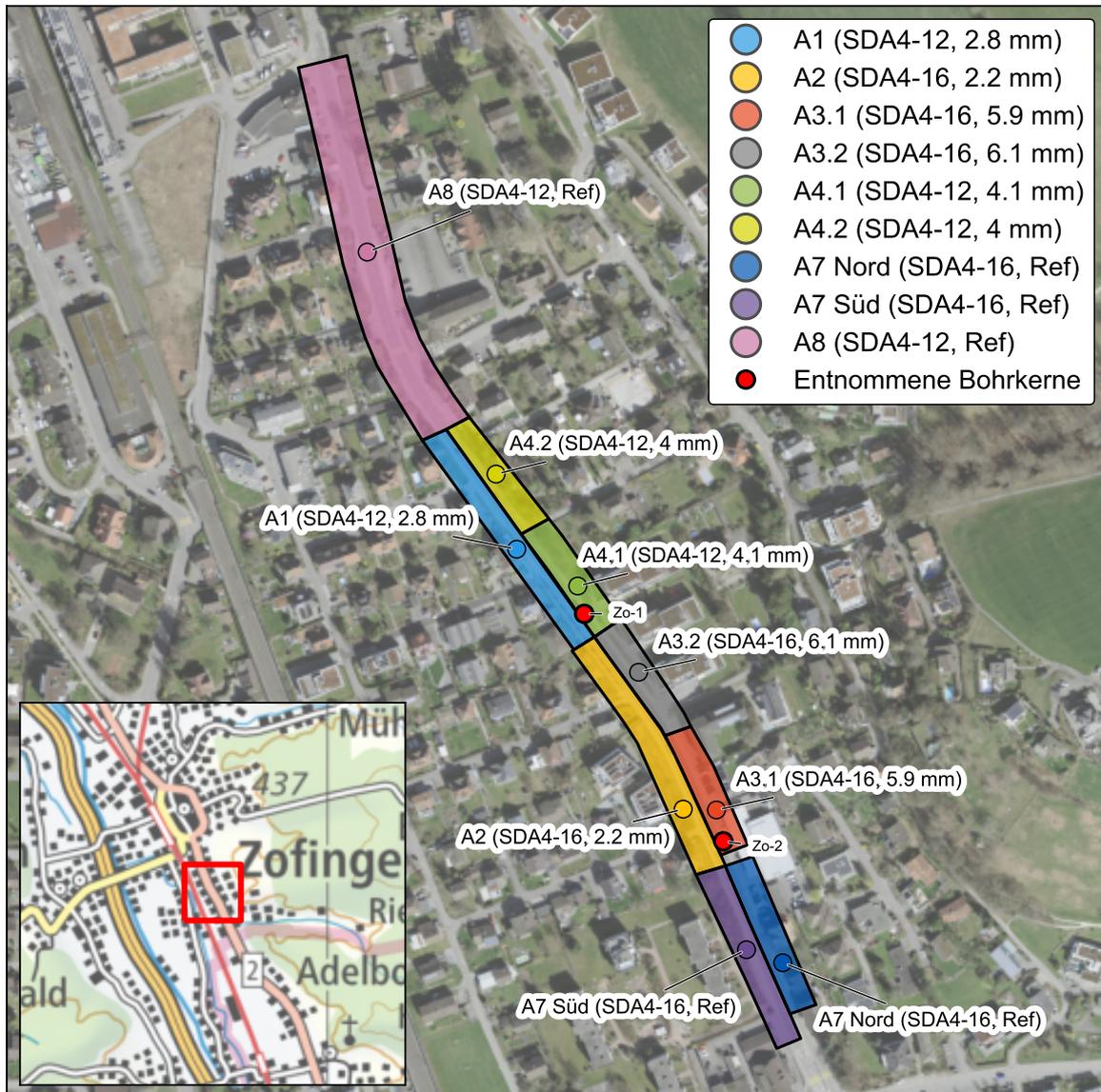
Aus einer vertieften (früheren) Analyse hat sich ergeben, dass die beiden Fahrbahnrichtungen des SDA 4-16 unterschiedlich altern. Die Referenzstrecke für den SDA 4-16 ist daher in zwei Abschnitte aufteilt: FB Rg Süd ist repräsentative Referenz für A2 und FB Rg Nord ist Referenz für A3.1 und A3.2 (Vgl. Tabelle S.1).

**Tabelle S.1:** Abschnitte in Zofingen, AG.

Belag	Abschnitt	Fräsdatum	Fahrbahn	Länge	Abtrag	Bezeichnung in Plots
SDA 4-12 (2012)	A1	25.09.2019	Rg Süd	150 m	2.8 mm (1x WZg)	A1 (SDA 4-12, 2.8 mm)
	A4.1	25.09.2019	Rg Nord	75 m	4.1 mm (2x WZg+b)	A4.1 (SDA 4-12, 4.1 mm)
	A4.2	25.09.2019	Rg Nord	75 m	4.0 mm (2x WZg+b)	A4.2 (SDA 4-12, 4.0 mm)
	Referenz		Rg Nord+Süd	230 m	ungeschliffen	Ref (SDA 4-12)
SDA 4-16 (2012)	A2	25.09.2019	Rg Süd	150 m	2.2 mm (1x WZg)	A2 (SDA 4-16, 2.2 mm)
	A3.1	25.09.2019	Rg Nord	75 m	5.9 mm (2x WZg+b)	A3.1 (SDA 4-16, 5.9 mm)
	A3.2	25.09.2019	Rg Nord	75 m	6.1 mm (2x WZg+b)	A3.2 (SDA 4-16, 6.1 mm)
	Referenz 1		Rg Nord	100 m	ungeschliffen	Ref1 (SDA 4-16)
	Referenz 2		Rg Süd	100 m	ungeschliffen	Ref2 (SDA 4-16)

### S.1. Übersichtskarte

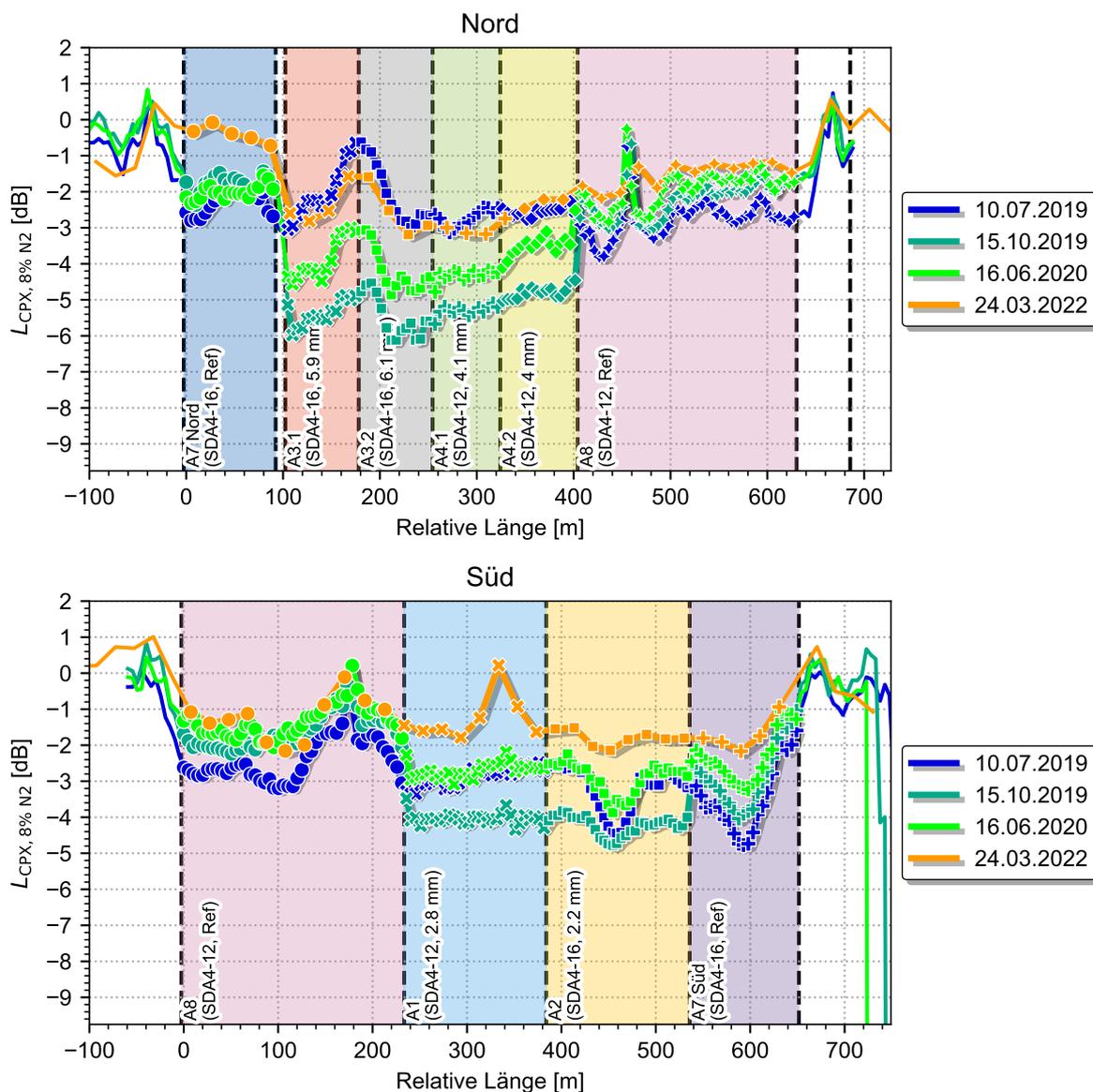
In Zofingen wurden bereits viele Untersuchungen an den Belägen durchgeführt. Die folgende Karte in Abbildung S.1 zeigt die Lage der Untersuchungsflächen. Im Rahmen dieser Studie wurden in Zofingen ebenfalls Bohrkerne entnommen. Diese wurden mit dem AVCA-Verfahren (Zo-1, Abschnitt A4.1, SDA4-12 mit 4.1 mm Schleiftiefe) und (Zo-2, Abschnitt A5.9, SDA4-16 mit 5.9 mm Schleiftiefe) untersucht. Dabei



**Abbildung S.1:** Übersichtskarte Zofingen, AG mit Lage der Abschnitte inklusive der in diesem Projekt entnommenen Bohrkerne (Zo-1 und Zo-2.)

## S.2. Akustische Resultate

### S.2.1 CPX-Streckenverlauf



**Abbildung S.2:** Streckenverlauf Zofingen, AG

Diese CPX-Verläufe (Abbildung S.2) auf gute Weise, wie die akustische Alterung des Belags durch lokale Phänomene bestimmt ist. So sieht man z.B. auf der FB Rg Nord im Abschnitt A3.2 (relative Länge 160-200 m) markant schlechtere Lärmwerte. Ein ähnlicher Effekt erkennt man auf der FB Rg Süd im Referenzabschnitt des SDA 4-12 bei relativer Länge 150-200 m. Der Grund dafür sind anliegende Siedlungsparkplätze und der Einlenker einer Nebenstrasse. Auch nach einem doppelten Abtrag bleibt im

Abschnitt A3.2 der Effekt weitgehend bestehen, wie Vergleich zwischen Messung vom 10.7.19 (blau) und 15.10.19 (blaugrün) sowie Folgemessungen im Abschnitt A3.2 deutlich zeigt. Demgegenüber gibt es auch Bereiche, die einer deutlich langsameren akustischen Alterung ausgesetzt sind. So z.B. auf der FB Rg Süd im Abschnitt A2 (r.L. 460 m) und Referenzabschnitt des SDA 4-16 (r.L. 600m) wo bei der Vorhermessung vom 10.7.19 (blau) die CPX-Pegel deutlich unter dem Mittelwert liegen. Der einmalige Abtrag in A2 vermag diese Stelle kaum weiter zu verbessern, wie der Vergleich mit Messung vom 15.10.2019 (blaugrün) zeigt. Im weiteren zeitlichen Verlauf verschwindet der Effekt und die akustische Belagsgüte aus Messung 2022 (orange) gleicht sich in diesem Streckenbereich dem Mittelwert an (□ «lokal verzögerte akustische Alterung holt restlichen Belag wieder ein»). Wie der Vergleich zwischen Abschnitt A2 und Referenz verdeutlicht, verzögert die Schleifmassnahme diesen Effekt nicht.

### S.2.2 CPX- Zeitverlauf

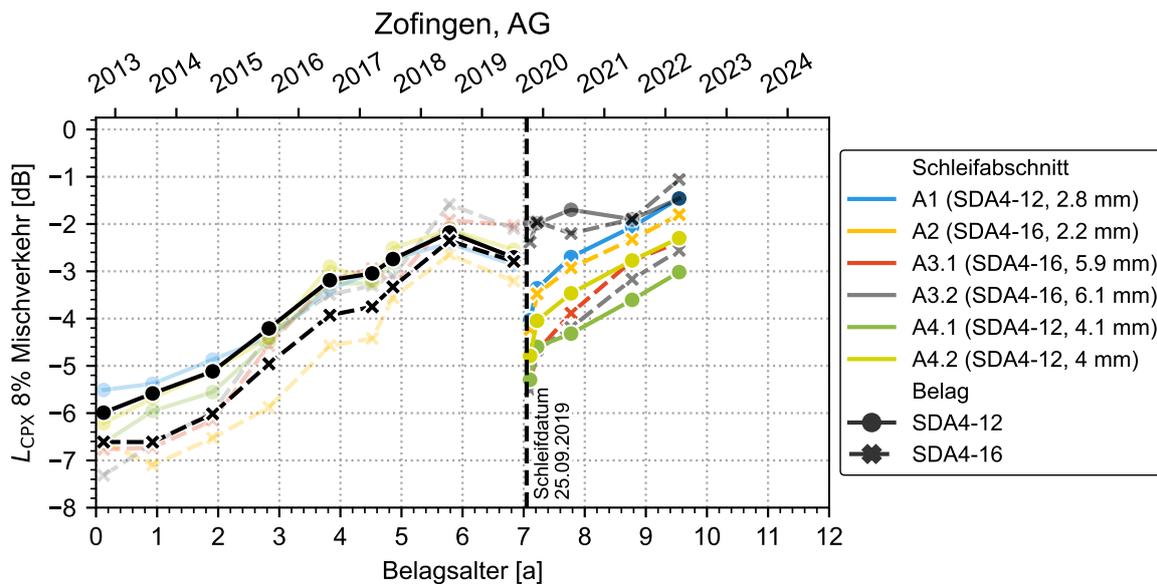


Abbildung S.3: Wirkung der Schleifmassnahmen Zofingen, AG

### S.2.3 Akustische Regeneration

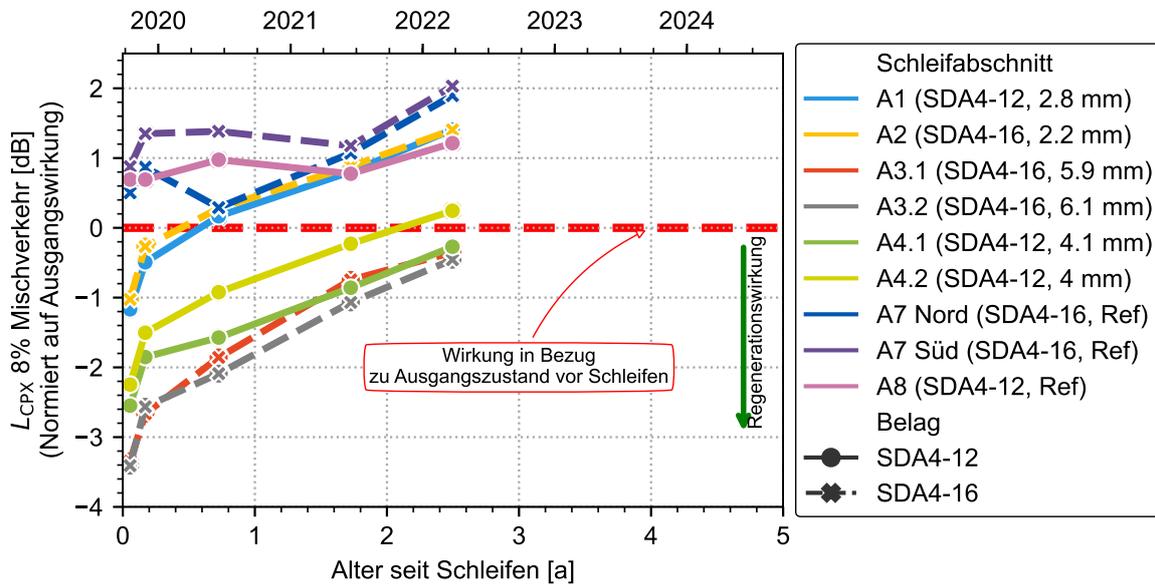


Abbildung S.4: Streckenverlauf Zofingen, AG

### S.2.4 Akustische Wirkung

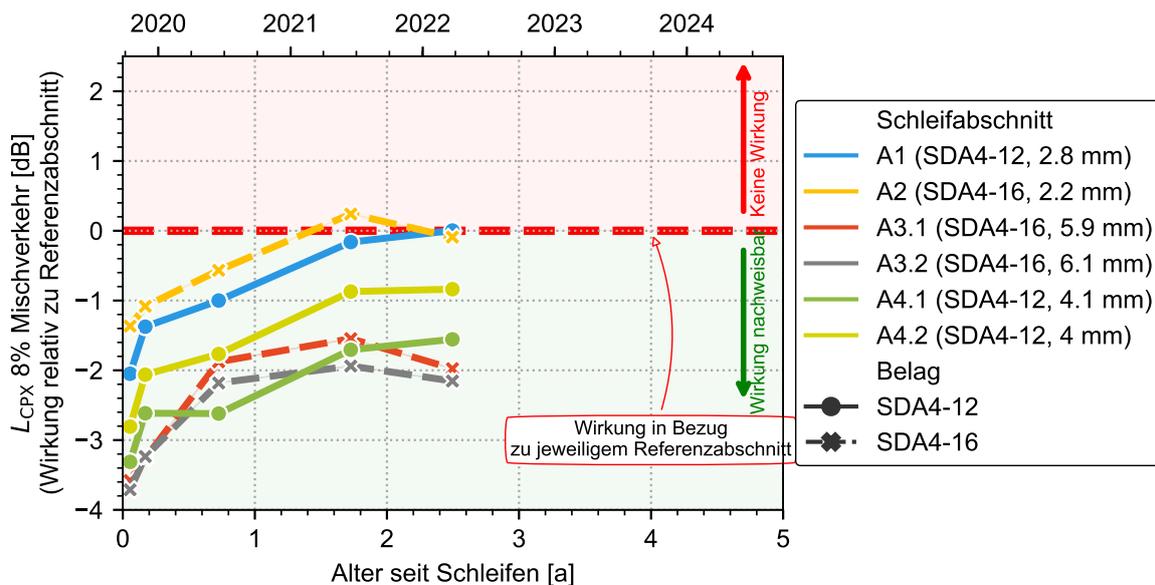


Abbildung S.5: Wirkung relativ zu Referenzabschnitt

### S.2.5 Spektralanalyse

Bei den Spektralanalysen wird jeweils die spektrale Veränderung der gemessenen CPX-Pegel im Zeitraum von der letzten Messung vor der Schleifmassnahme gezeigt. In den Abbildungen wird unterschieden zwischen den PKW und LKW Messreifen. Ebenfalls werden die Gesamtpegel im rechten Teil ebenfalls für PKW, LKW und den Mischverkehr (N2-Anteil von 8%) gezeigt.

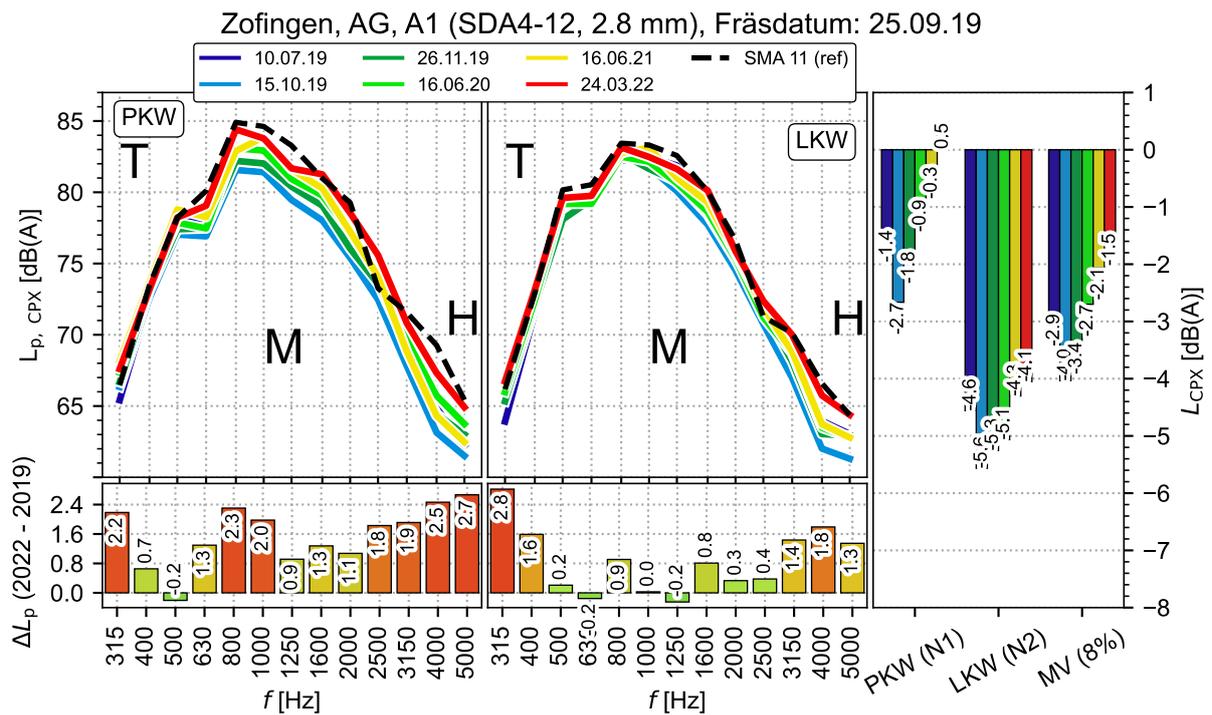
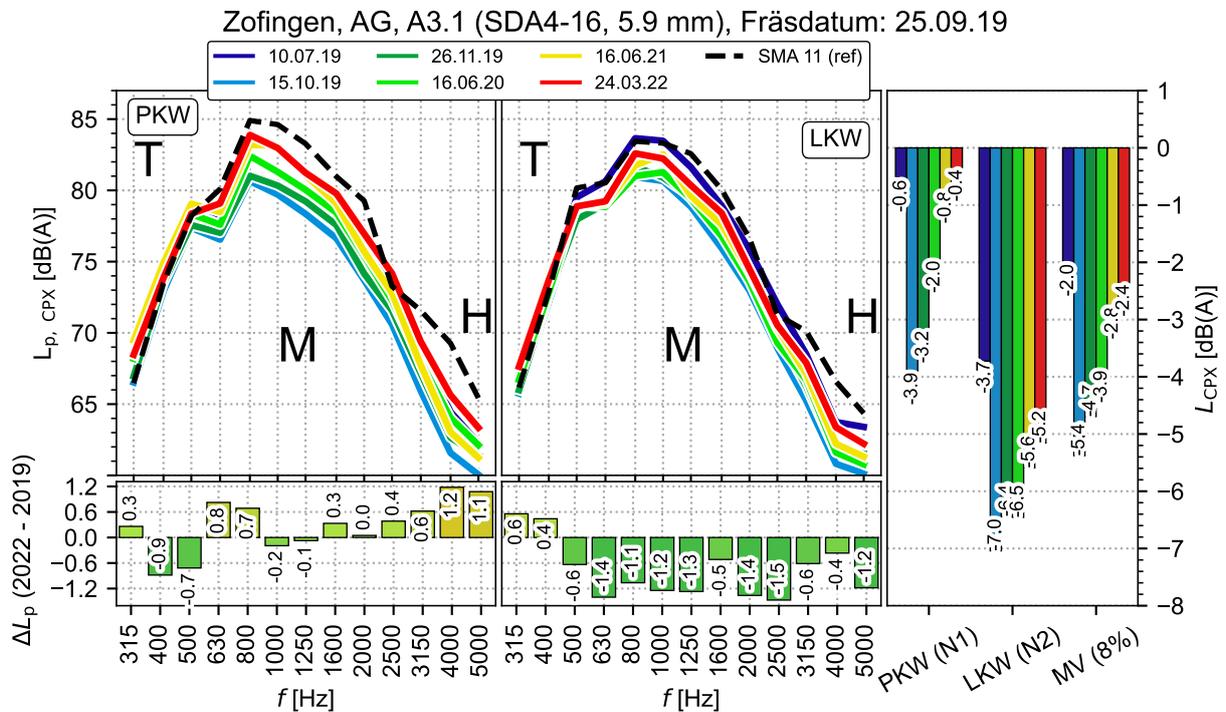
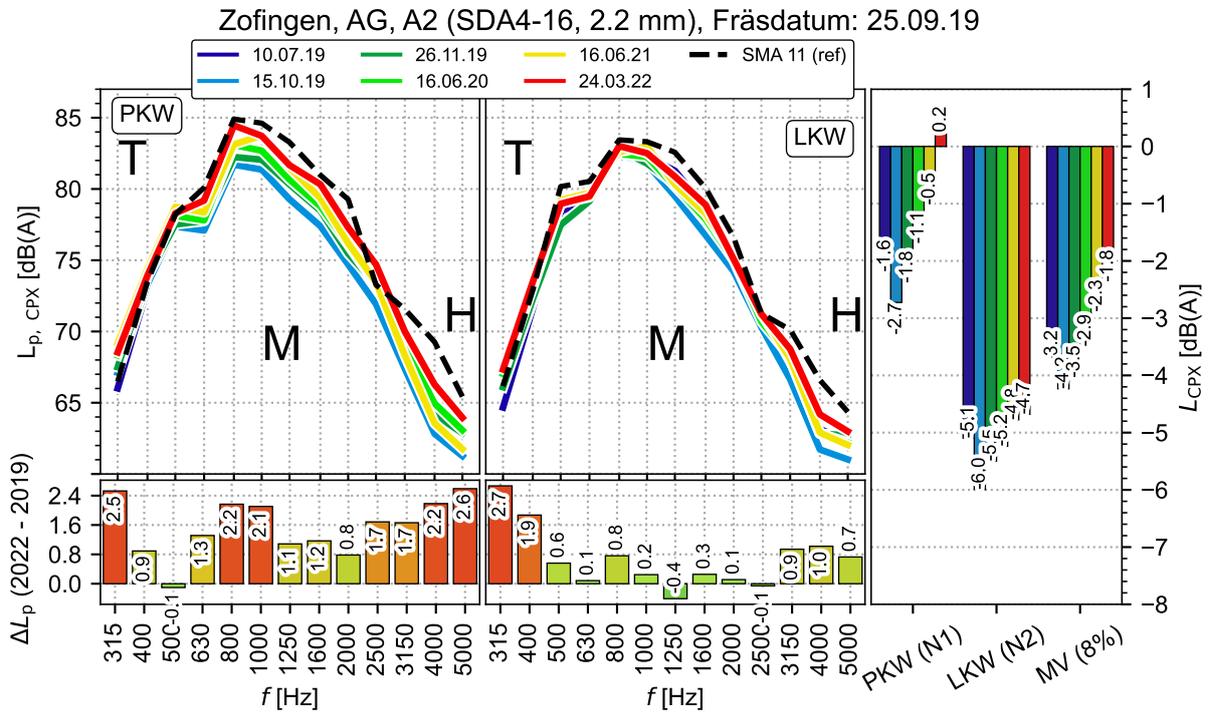


Abbildung S.6: Spektralanalyse in Zofingen, A1, SDA4-12, 2.8mm



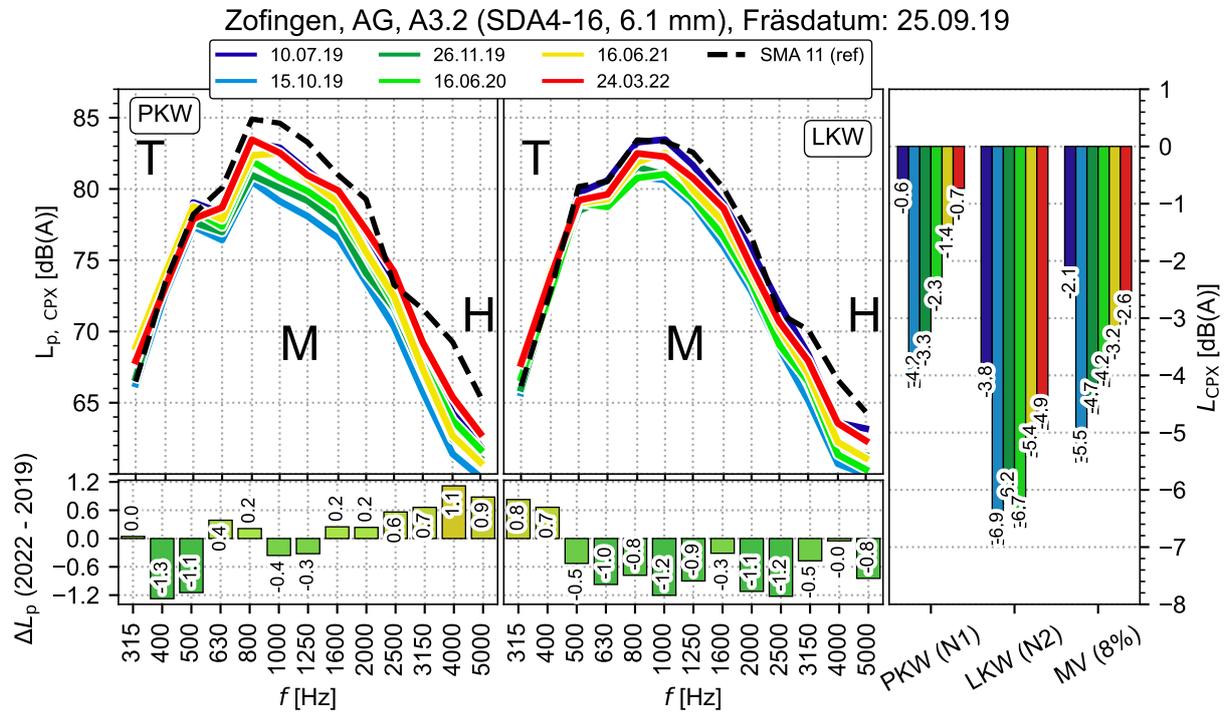


Abbildung S.9: Spektralanalyse in Zofingen, A3.2, SDA4-16, 6.1mm

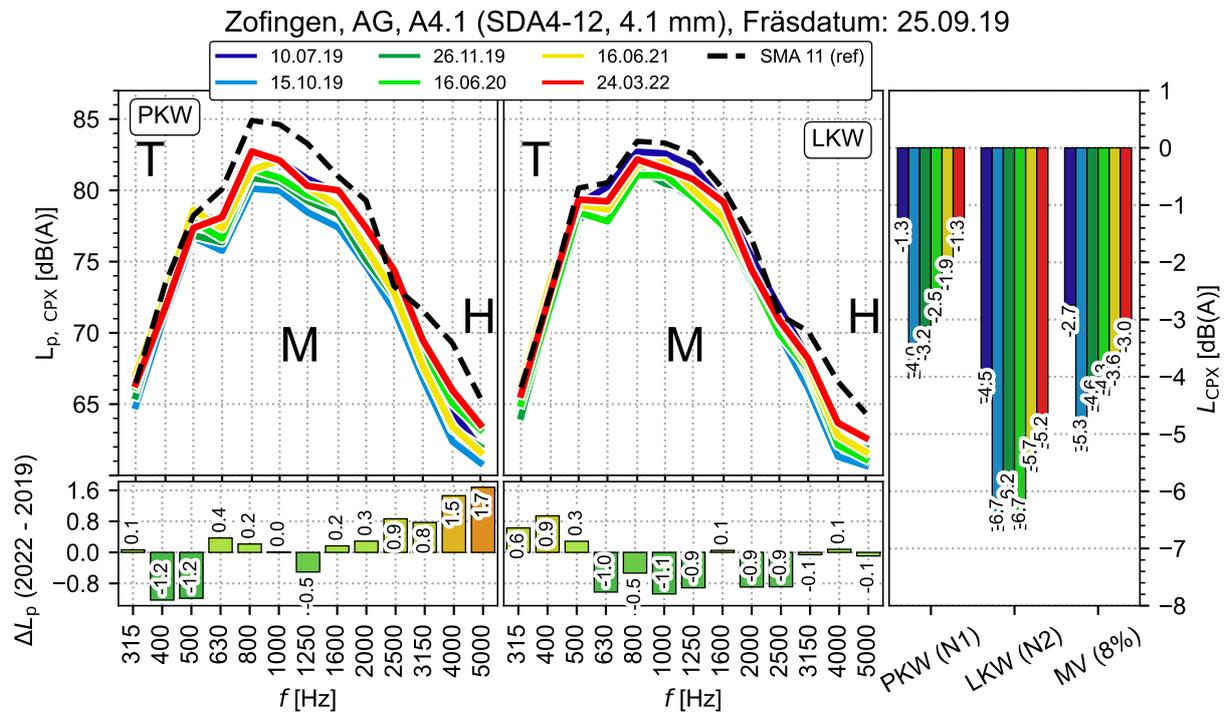
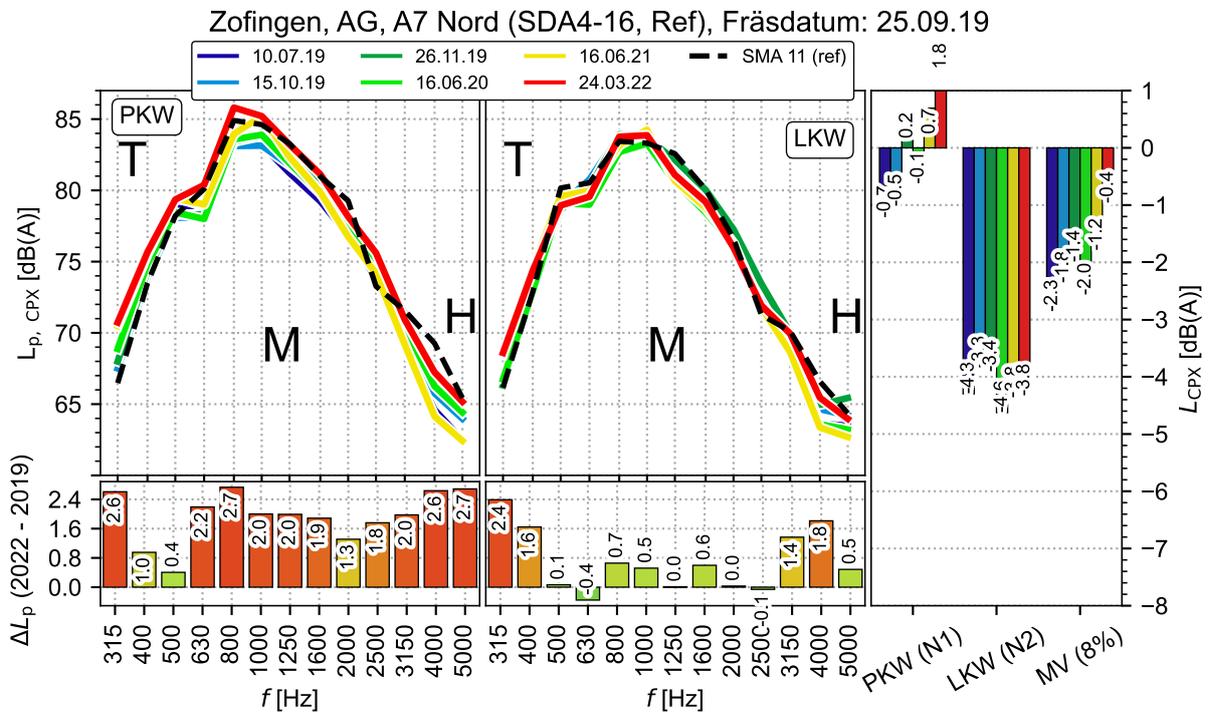
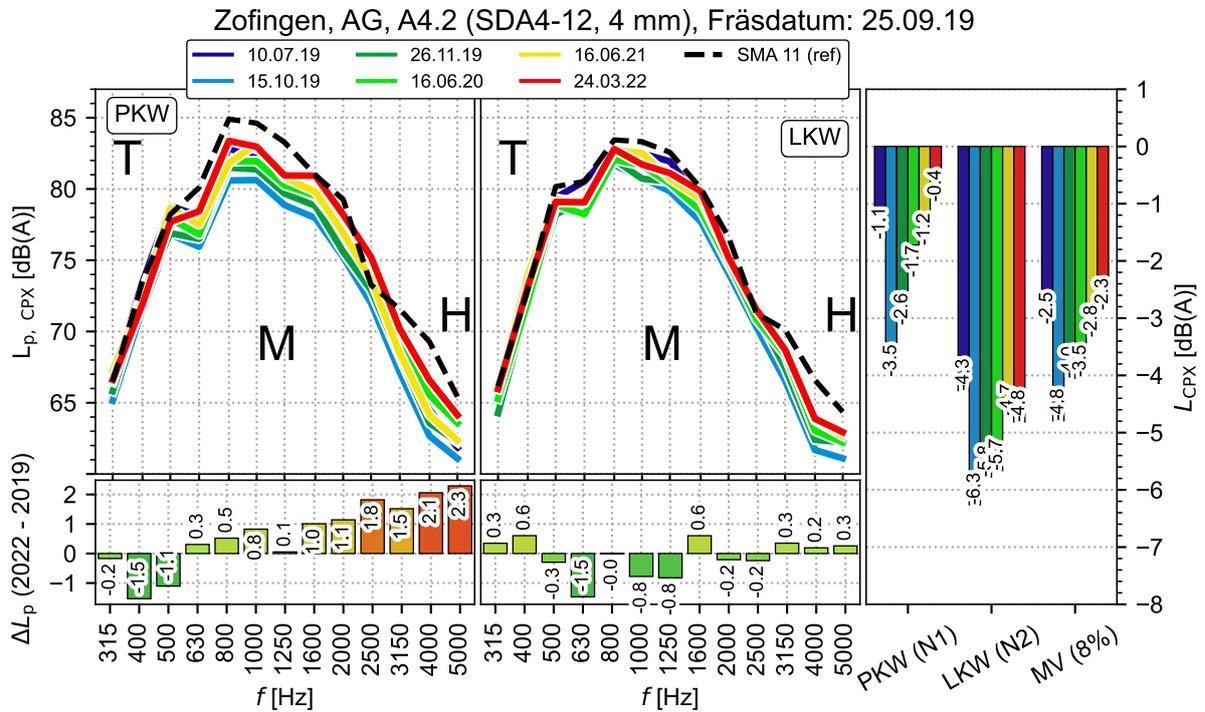
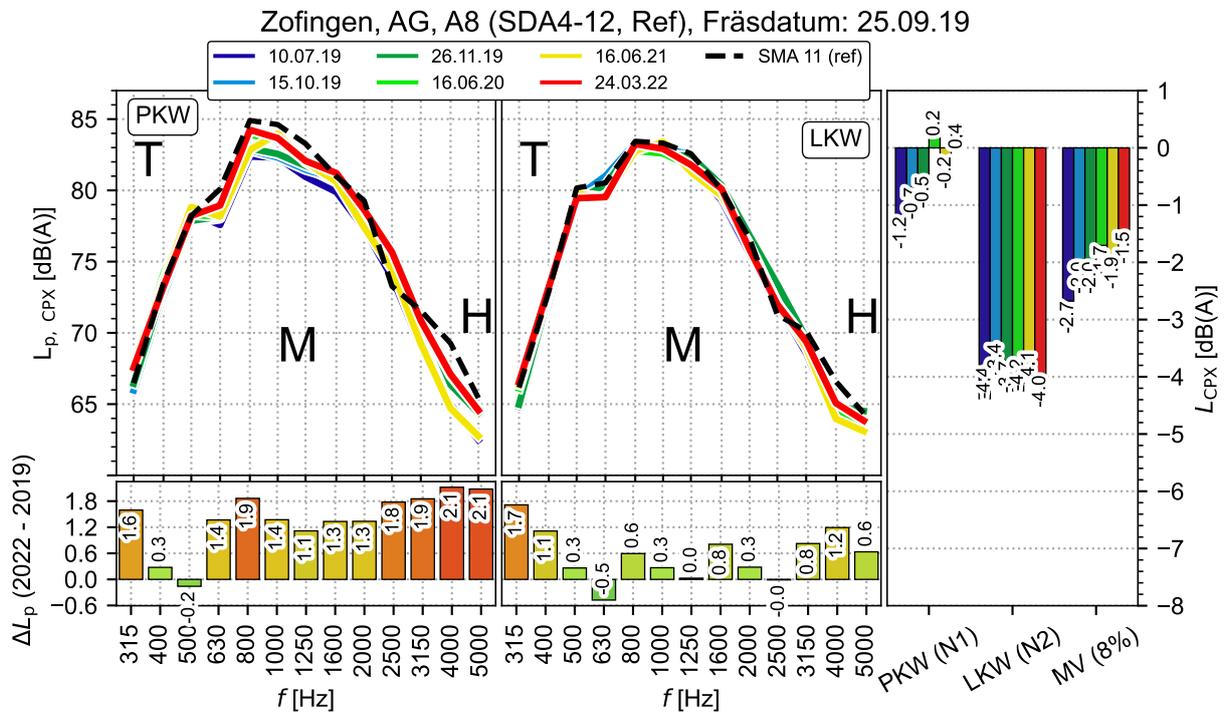
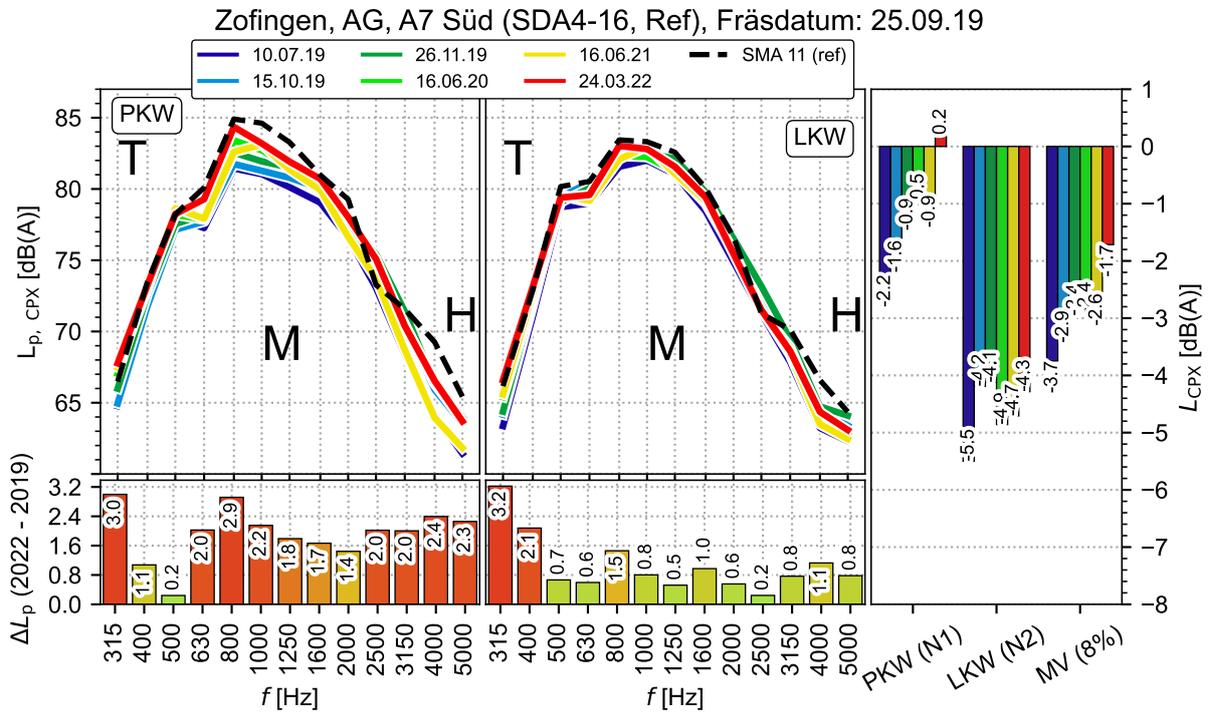


Abbildung S.10: Spektralanalyse in Zofingen, A4.1, SDA4-12, 4.1mm





### S.3. Lufttopfmessungen

Im Rahmen des Projekts wurde auch die Lufttopfmessung an den Profilstandorten der Bohrkernentnahme über die Folgejahre 2021-2022 weitergeführt. Leider fehlt eine Vorhermessung um den unmittelbaren Effekt des Schleifens auf den Luftströmungswiderstand beurteilen zu können. Die Niveaus an den einzelnen Standorten bleiben über die ersten zwei Jahre in der Grössenordnung erhalten. Auffallend ist dabei vor allem der Unterschied zwischen dem Belagstyp SDA 4-12 und SDA 4-16. Die deutlich tieferen Strömungswiderstandswerte des letzteren dürften primär auf eine gröbere Makrotextur (erhöhter Kornausbruch) des hohlraumreicheren Belags zurückzuführen sein. Der Trend bei der Veränderung über Zeit ist an jedem Standort unterschiedlich und scheint nicht direkt im Zusammenhang mit dem akustischen Verhalten zu stehen.

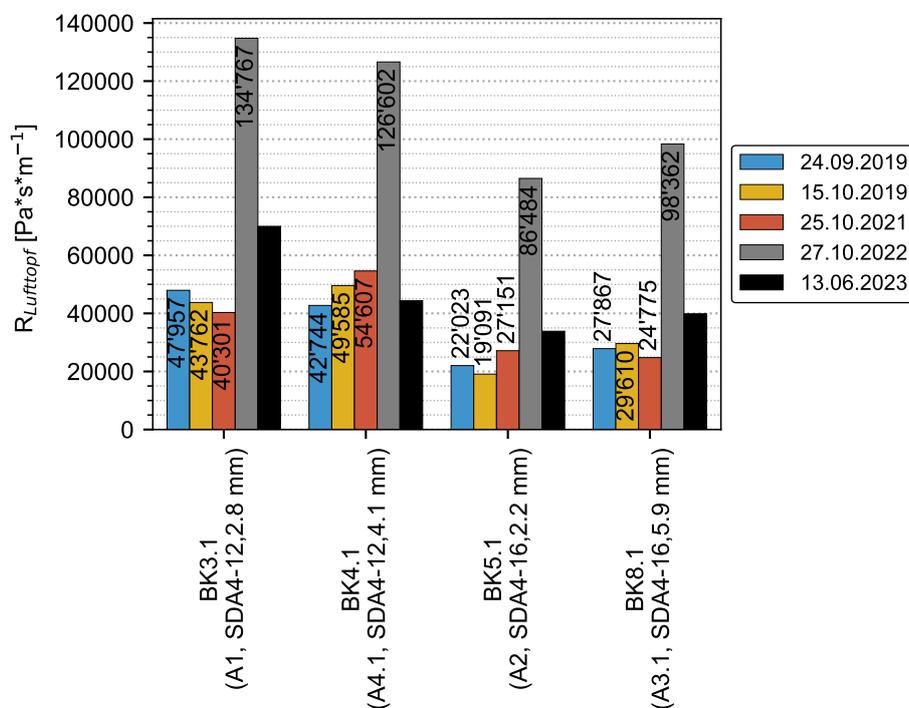


Abbildung S.15: Lufttopfmessungen in Zofingen, AG

### S.4. Texturmessungen

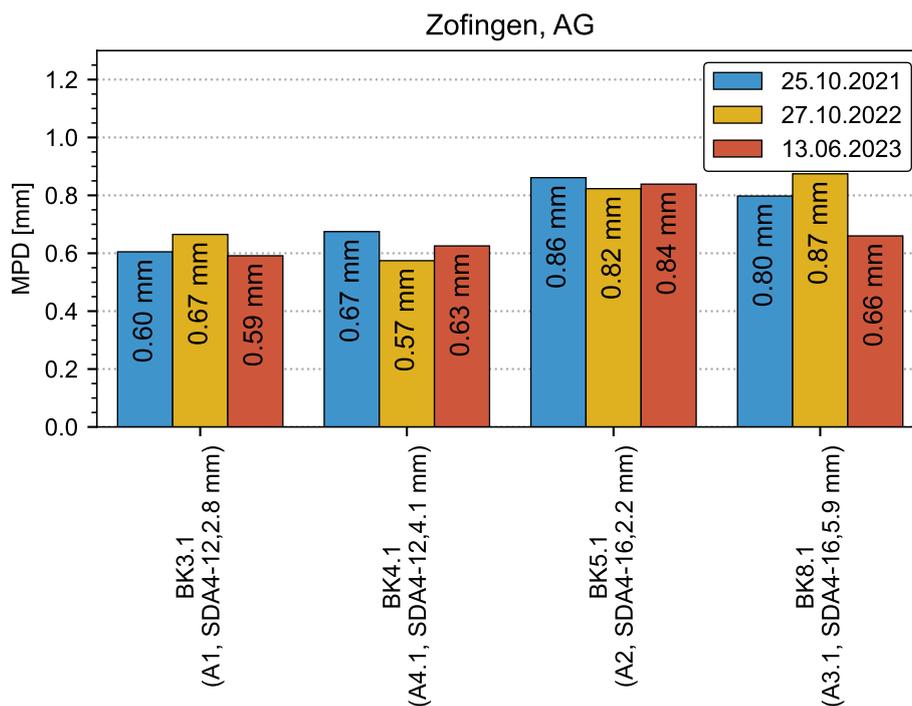
Wie bereits in Remigen (Kapitel J.3) beschrieben sind in Zofingen ebenfalls verschiedene Messverfahren verwendet worden. Die Tabelle S.2 fasst die Messungen zusammen.

**Tabelle S.2:** Übersicht zu den Messungen in Zofingen. Mit (G = Greenwood und B = Laserbalken)

Datum	BK3.1, A1 SDA4-12, 2.8 mm	BK4.1, A4.1, SDA4-12, 4.1 mm	BK5.1, A2, SDA4-16, 2.2 mm	BK8.1, A3.1, SDA4-16, 5.9 mm
September 2019: Schleifen				
25.10.2021	G	G	G	G
27.10.2022	G	G	G	G
13.06.2023	B	B	B	B

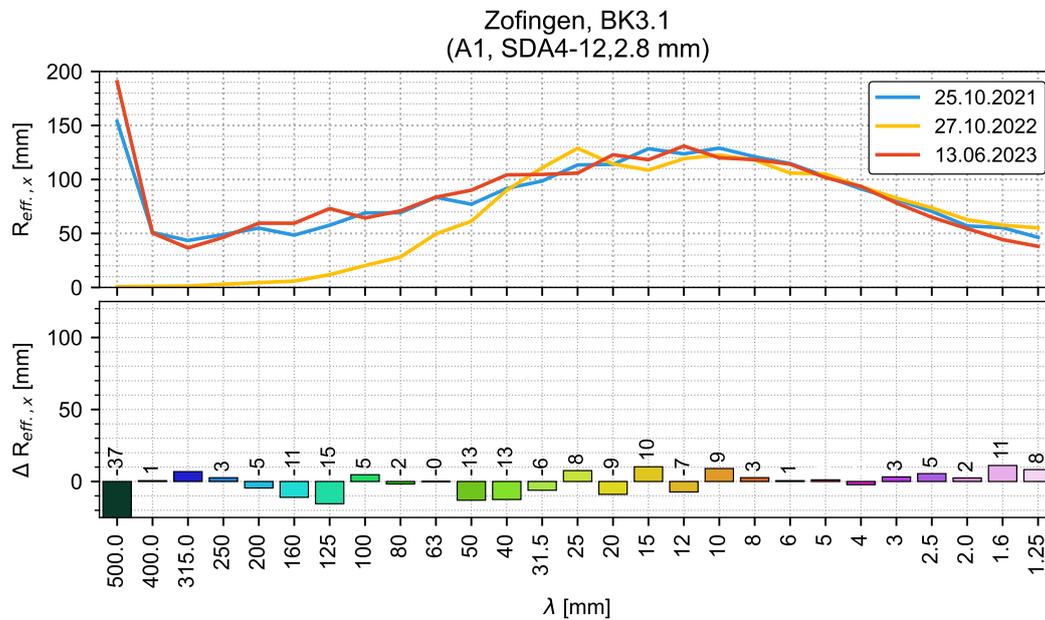
### S.4.1 Mittlere Profiltiefe

Die Tabelle S.16 zeigt die Entwicklung der mittleren Profiltiefe in Zofingen nach der Massnahme. Dabei zeigt sich, dass hinsichtlich der MPD nicht viel passiert. An den meisten Messpunkten (A1, A4.1 und A2) bleibt die MPD über die Jahre relativ konstant. Einzig der Abschnitt A3.1 wies in der letzten Messung tiefere Werte auf. Dies ist nicht ganz klar wieso, denn mit zunehmender Verkehrslast sollte eigentlich die Profiltiefe wiederum zunehmen.

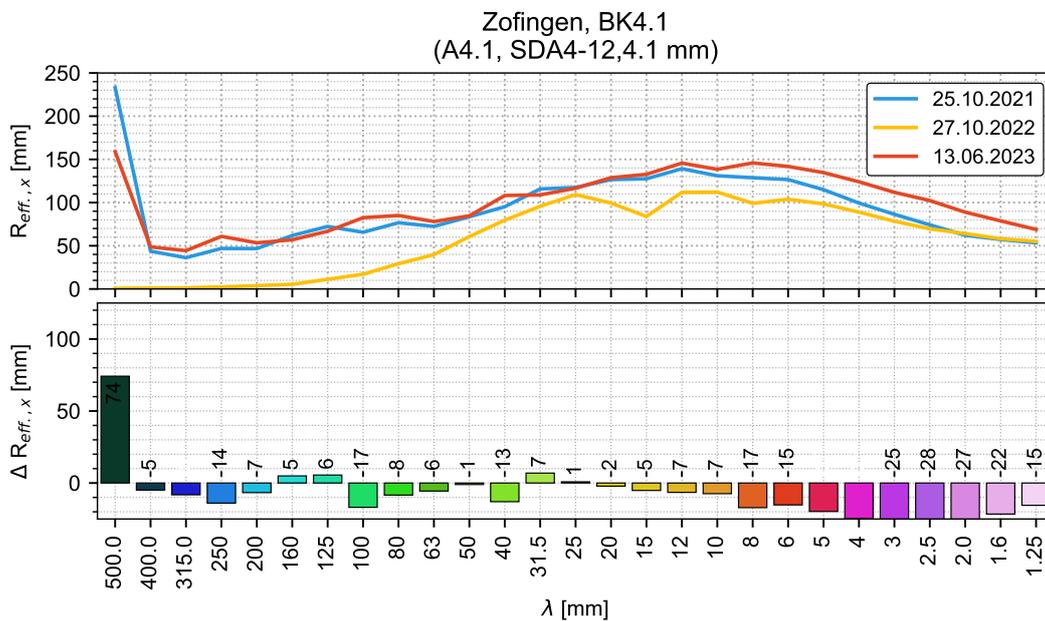


**Abbildung S.16:** Mittlere Profiltiefe gemessen an den 4 Messpunkten in Zofingen. Dabei sind nur Messung nach der Massnahme aufgezeigt.

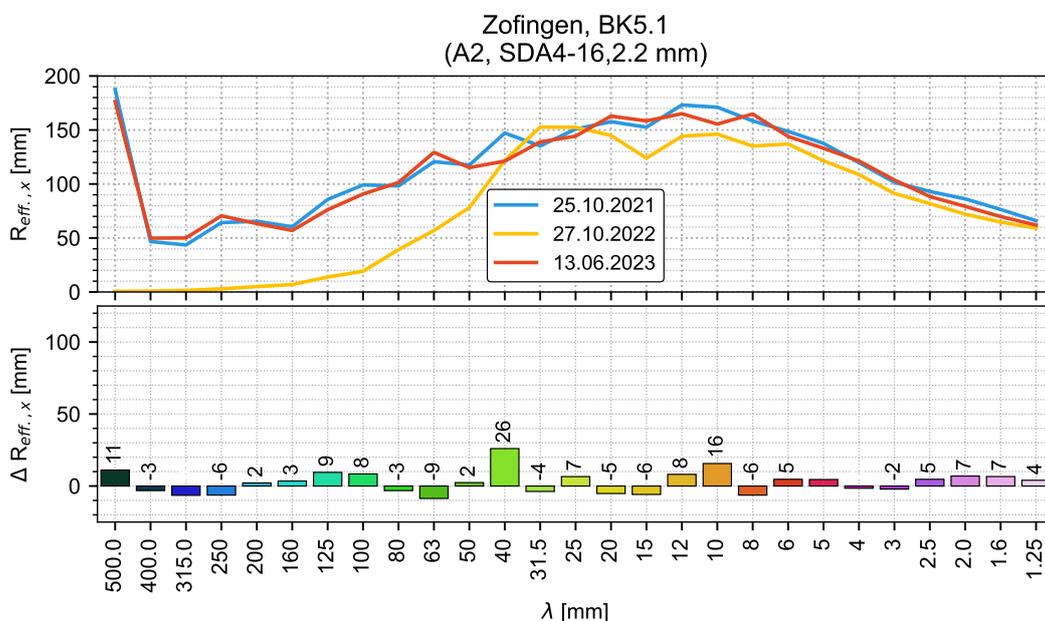
### S.4.2 Effektive Rauigkeitstiefe



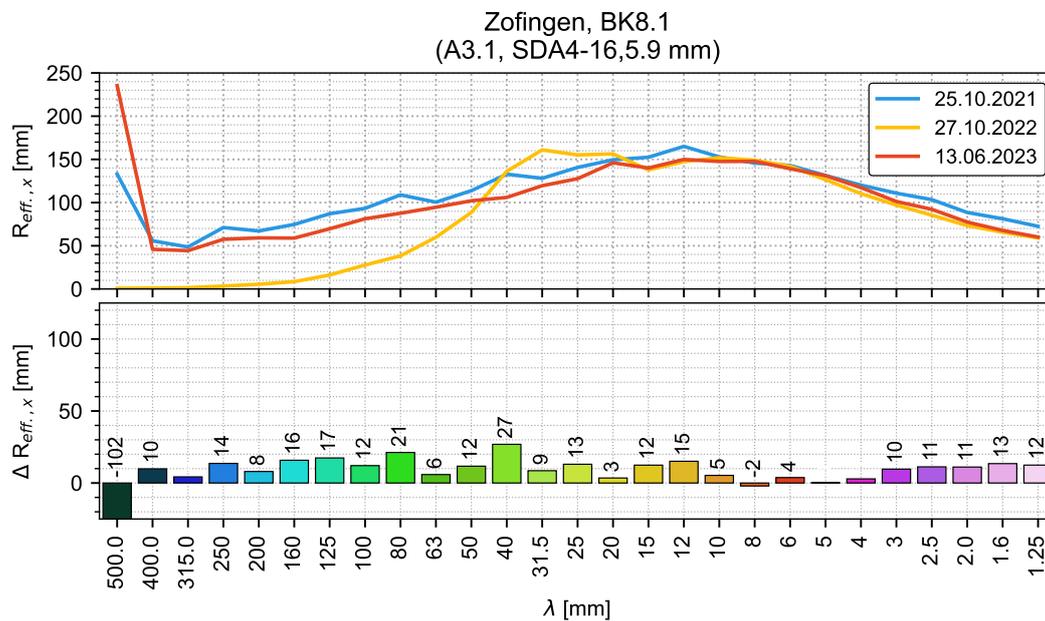
**Abbildung S.17:** Messungen zur spektralen effektiven Rauigkeitstiefe in Zofingen (MP 3.1, Abschnitt A1 SDA4-12, 2.8 mm). Leider sind an diesem Standort nur Messungen kurz nach der Massnahme verfügbar.



**Abbildung S.18:** Messungen zur spektralen effektiven Rauigkeitstiefe in Zofingen (MP 4.1, Abschnitt A4.1 SDA4-12, 4.1 mm)). Leider sind an diesem Standort nur Messungen kurz nach der Massnahme verfügbar.



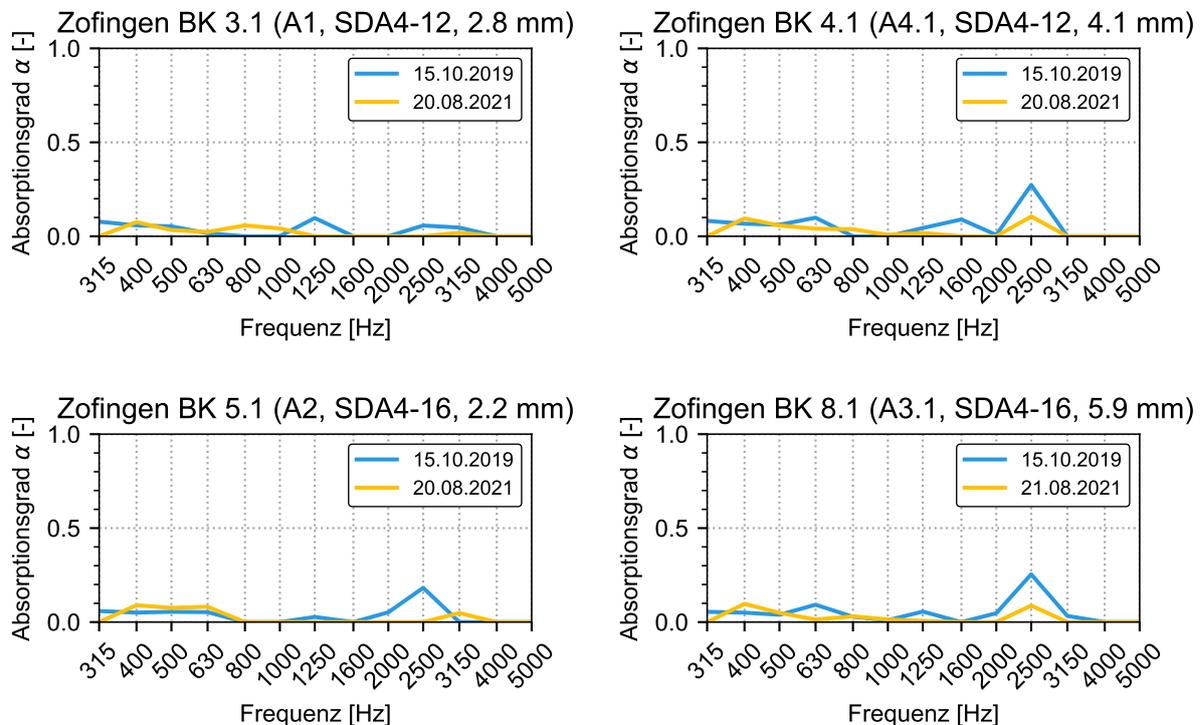
**Abbildung S.19:** Messungen zur spektralen effektiven Rauigkeitstiefe in Zofingen (MP 5.1, Abschnitt A2, SDA4-16, 2.2mm). Leider sind an diesem Standort nur Messungen kurz nach der Massnahme verfügbar.



**Abbildung S.20:** Messungen zur spektralen effektiven Rauigkeitstiefe in Zofingen (MP 8.1, Abschnitt A3.1 SDA4-16, 5.9 mm). Leider sind an diesem Standort nur Messungen kurz nach der Massnahme verfügbar.

### S.5. Schallabsorptionsmessungen

In Zofingen wurde auch die Messserie der Schallabsorptionsmessungen weitergeführt, allerdings nur bis ins Jahr 2021. Diese Messungen wurden am 20.08.2021 an denselben Stellen, wie bereits kurz nach der Schleifnahme im Jahr 2019 durchgeführt. Auf eine weitere Folgemessung 2022 wurde aufgrund der bereits geringen Aussagekraft der bestehenden Messungen verzichtet. Die Resultate sind in der Abbildung S.21 dargestellt. Dabei erfolgte die Anordnung der Grafiken analog zur Lage der Abschnitte, wie in der Karte gemäss Abbildung S.1 dargestellt (Linke Fahrspur, Rechte Fahrspur und jeweils in Fahrtrichtung).



**Abbildung S.21:** Schallabsorptionsmessungen in Zofingen, AG vom 15.10.2019 und 20.08.2021.

Es zeigte sich, dass sich die ohnehin geringe Schallabsorptionswirkung kurz nach der Intervention zwei Jahre später weitgehend verschwunden ist. Einzig die Abschnitte A3.1 und A4.1 (beide nördliche Fahrtrichtung mit höheren Frästiefen) weisen im Vergleich zur südlichen Fahrtrichtung noch minim die höheren Absorptionsgrade auf. Dies deckt sich auch gewissermassen mit der akustischen Entwicklung gemäss dem vorhergehenden Kapitel.

## S.6. Bohrkernanalysen 2022

### S.6.1 AVCA

In Zofingen wurden 2 AVCA-Untersuchungen durchgeführt. Die Orte der Entnahmepunkte sind in der Karte S.1 ersichtlich. Im Rahmen des Projekts hat man sich beschränkt auf diese zwei Punkte, da die akustischen Resultate der anderen Abschnitte verhältnismässig schlechter ausfielen. Daher hat man die am besten abschneidenden Abschnitte (A3.1 mit 5.9mm Schleiftiefe und A4.1 mit 4.1 mm Schleiftiefe ausgewählt).

Die folgende Tabelle S.3 zeigt eine (kurz-) Zusammenfassung der Ergebnisse. Es zeigt sich, dass an beiden Standorten relativ weit oben eine prominente Verschmutzungsschicht vorhanden ist. Diese Verschmutzungsschicht führt dazu, dass bei beiden Belägen nur gerade 1% verfügbares Porenvolumen zur Verfügung steht. Folglich kann der Belag diese 1% an Poren kaum ausschöpfen. Dies äussert sich ebenfalls in den CPX-Werten, welche mit -3.0 respektive -2.4 dB wiederum nahe am Ausgangszustand sind. Im Vergleich zu den AVCA-Messungen 2020, welche kurz nach der Massnahme durchgeführt wurden, hat sich somit an beiden Messpunkten wiederum eine dichtere Schicht an Verschmutzung aufgebaut,

welche die oberflächennahen Poren beinahe verstopft.

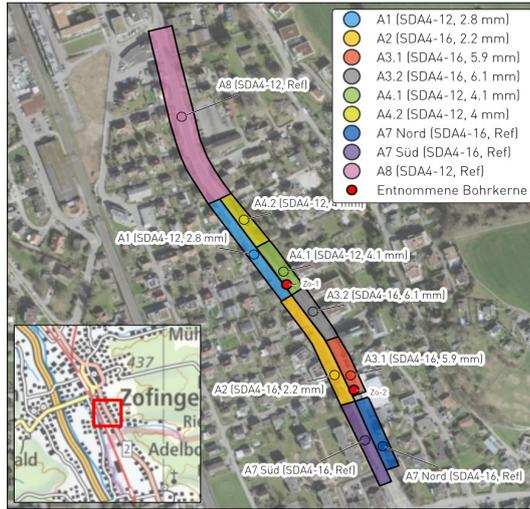
**Tabelle S.3:** Zusammenfassung AVCA für Zofingen

Messpunkt	AVCA-Bezeichnung	$L_{CPX}$		Min. (zugängliche) Porosität	
		2020	2022	2020	2022
A4.1, SDA4-12, 4.1 mm	Zo-1	-6.7	-3.0	1.3% (4.2 mm)	1.0% (3.5 mm)
A3.1, SDA4-16, 5.9 mm	Zo-2	-7.0	-2.4	6.4% (12.4 mm)	1.1% (4.7 mm)

Auf den folgenden Seiten werden die AVCA-Messprotokolle für Zo-1 und Zo-2 (Messungen 2022) gezeigt.

Grolimund + Partner AG  
Bern, Aarau, Zürich, Deitingen, Neuchâtel  
www.grolimund-partner.ch

**Akustische Hohlraumanalyse (AVCA)**  
Zo-1



**Strasse**

Zofingen, Luzernerstrasse  
Richtung: Nord, Rechte Radspur

**Belagstyp**

SDA4-12, geschliffen 4.1 mm

**Entnahmepunkt**

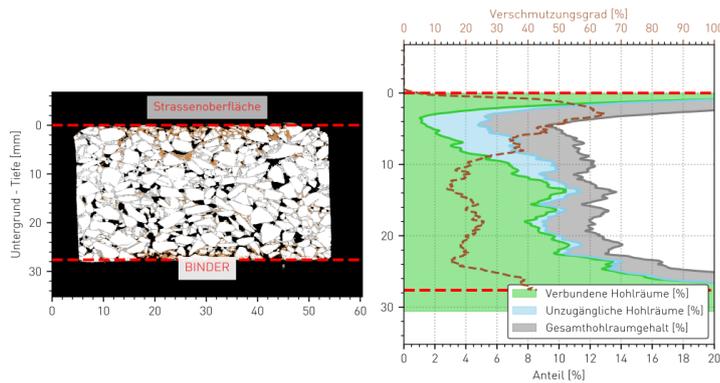
X = 2638716  
Y = 1236734  
Datum: Okt 22

**CT- Scan Analyse**

Schichtdicke: 28 mm  
Ø Hohlraumgehalt 10,6%

**Analyse zugänglicher Hohlräume**

	# zugänglicher Poren	zugänglicher HR-Gehalt [%]	Verschmutzungsgrad [%]	Gesamthohlraumgehalt [%]
Unterhalb Oberflächenporen	85	1.1%	52%	11%
10 mm unter Fahrbahn	217	6.8%	21%	12%
20 mm unter Fahrbahn	318	9.7%	20%	13%
30 mm unter Fahrbahn	0	99.9%	0%	0%

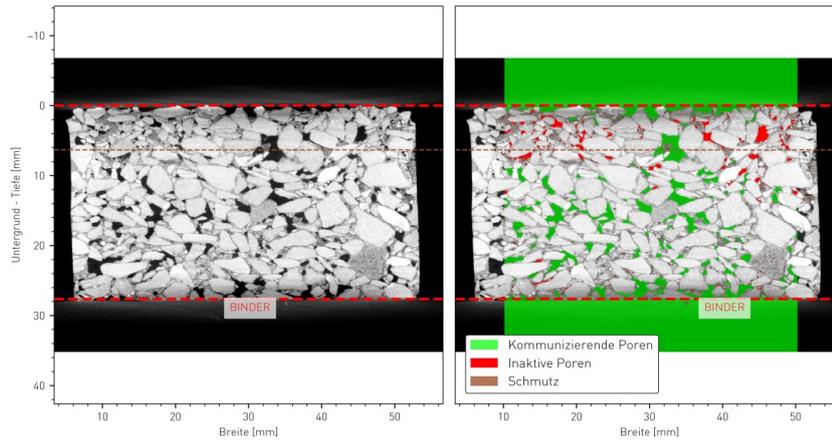


Grolimund + Partner AG  
Bern, Aarau, Zürich, Deitingen, Neuchâtel  
www.grolimund-partner.ch

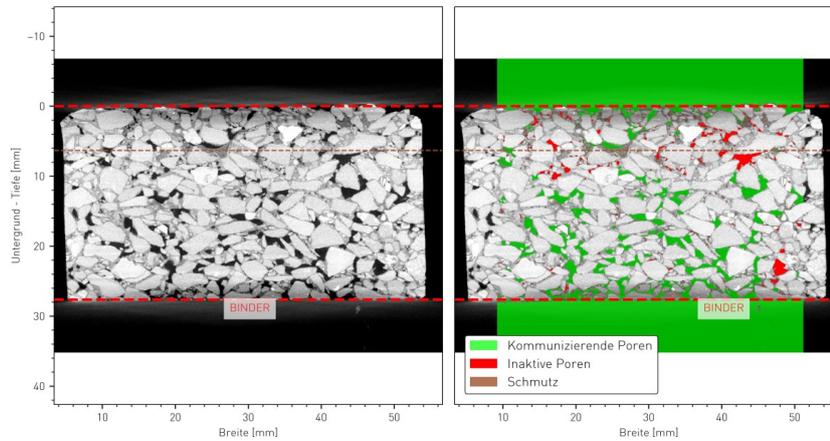
++ **G+P**  
INGENIEURE

Querschnittsbilder:

Schnitt-Nr: 800 (24 mm)



Schnitt-Nr: 1000 (30 mm)

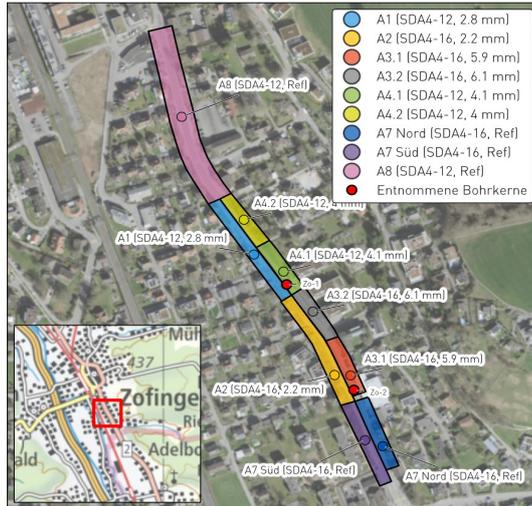


**Kommentare:**

- Gesamthohlraumgehalt am Bohrkern beträgt 10.6%
- Es sind über den gesamten Bohrkern kommunizierende Poren vorhanden
- 1 cm unterhalb der Fahrbahn sind mit 6.8 % zugänglicher Poren eine gut verbundene Schicht mit der Oberfläche vorhanden; Der Luftaustausch mit den tieferen Schichten kann stattfinden

Grolimund + Partner AG  
Bern, Aarau, Zürich, Deitingen, Neuchâtel  
www.grolimund-partner.ch

**Akustische Hohlraumanalyse (AVCA)**  
Zo-2



**Strasse**

Zofingen, Luzernerstrasse  
Richtung: Nord, Rechte Radspur

**Belagstyp**

SDA4-16, geschliffen 5.9 mm

**Entnahmepunkt**

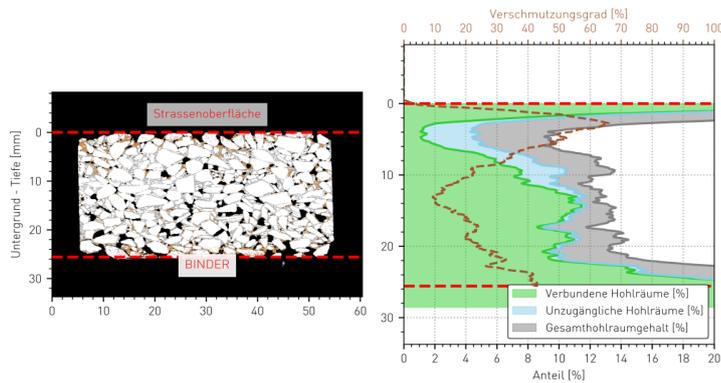
X = 2638798  
Y = 1236600  
Datum: Okt 22

**CT- Scan Analyse**

Schichtdicke: 26 mm  
Ø Hohlraumgehalt 10,8%

**Analyse zugänglicher Hohlräume**

	# zugänglicher Poren	zugänglicher HR-Gehalt [%]	Verschmutzungsgrad [%]	Gesamthohlraumgehalt [%]
Unterhalb Oberflächenporen	95	1.1%	53%	9%
10 mm unter Fahrbahn	218	7.4%	22%	13%
20 mm unter Fahrbahn	377	9.7%	24%	13%
30 mm unter Fahrbahn	0	0.0%	0%	0%

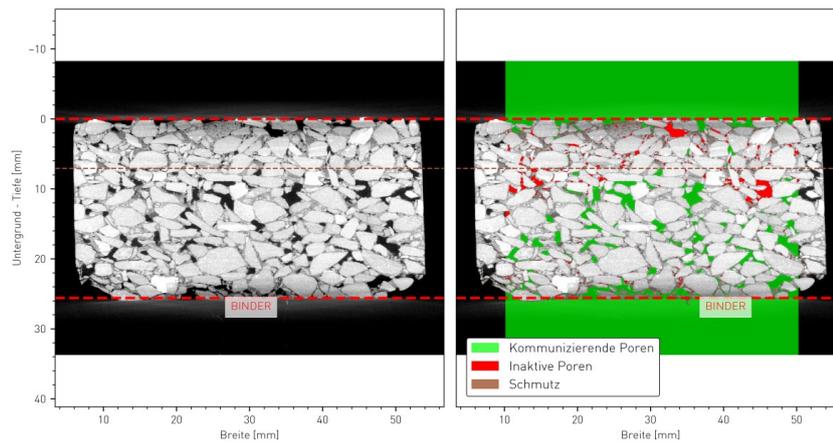


Grolimund + Partner AG  
Bern, Aarau, Zürich, Deitingen, Neuchâtel  
www.grolimund-partner.ch

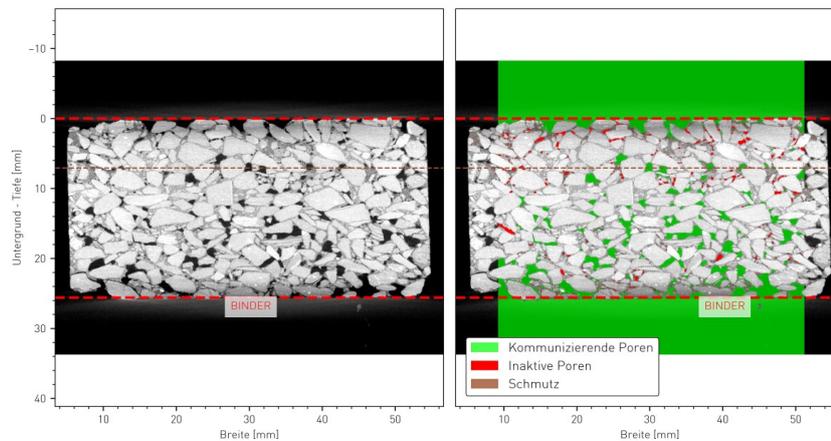
++ G+P  
INGENIEURE

Querschnittsbilder:

Schnitt-Nr: 800 (24 mm)



Schnitt-Nr: 1000 (30 mm)



**Kommentare:**

- Gesamthohlraumgehalt am Bohrkern beträgt 10.8%
- Keine verbundenen Poren bis zur Deckschicht
- 1 cm unterhalb der Fahrbahn sind mit 7.4 % zugänglicher Poren eine gut verbundene Schicht mit der Oberfläche vorhanden; Der Luftaustausch mit den tieferen Schichten kann stattfinden



## S.6.2 Imprägnierung