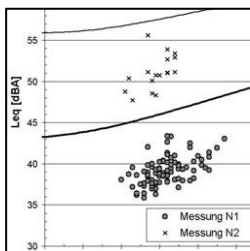
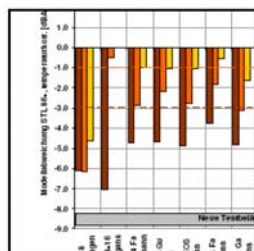
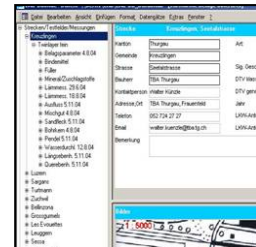


Lärmarme Strassenbeläge innerorts



Jahresbericht 2009



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Strassen ASTRA

Bundesamt für Umwelt BAFU

Herausgeber

Bundesamt für Strassen (ASTRA)

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

ASTRA und BAFU sind Ämter des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)

Auftraggeber

Bundesamt für Strassen (ASTRA)

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Autoren

Angst Christian, Dr. sc. techn., IMP Bautest AG, Oberbuchsitzen

Beltzung Françoise, Dr. sc., IMP Bautest AG, Oberbuchsitzen

Bosshardt Dieter, beratender Ing.HTL/SIA/usic, Aquila

Grolimund Hans-Jörg, Dipl. Bauing. ETH/SIA/SGA, Grolimund & Partner AG, Bern

Bühlmann Erik, Phil. nat. Geograf., Grolimund & Partner AG, Bern

Begleitkommission

Mariotta Carlo, Präsident Begleitkommission, Präsident FoKo

Schguanin Gregor, BAFU, Abt. Lärmbekämpfung

Beyeler Hans-Peter, ASTRA, Abt. Infrastruktur

Gloor Hanspeter, Dep. Bau Verkehr und Umwelt Kt. Aargau, Fachstelle Lärm

Künzle Walter, Tiefbauamt TG

Levental Mario / Nicolas Gouneaud, Service cantonal de protection contre le bruit, GE

Dagani Mauro, Divisione delle costruzioni, TI

Forschungsstellen

Koordination

Dieter Bosshardt

berat.Ing.HTL/SIA

Cresedo

6719 Aquila

Tel. 091 872 15 59

Akustik

Hans-Jörg Grolimund

Grolimund & Partner AG

Thunstrasse 101 a

3006 Bern

Tel. 031 356 20 00

Beläge

Christian Angst

IMP Bautest AG

Hauptstrasse 591

4625 Oberbuchsitzen

Tel. 062 389 98 99

Download PDF

ASTRA: www.astra.admin.ch

BAFU: www.umwelt-schweiz.ch/ud-1022-d

Inhalt

1	Einleitung	5
1.1	Ziel, Auftrag	5
1.2	Vorgehen	5
2	Pilotstrecken und bestehende Beläge	6
3	Methoden	7
3.1	Akustische Belagsgütemessungen	7
3.1.1	Messungen mit dem SPB-Verfahren	7
3.1.2	Akustische Belagsgütemessungen mit dem CPX-Verfahren	8
3.2	Korrelation zwischen CPX-Messwerten und SPB-Messungen	9
3.3	Makrotextur	10
3.4	SPERoN – Prognose – Modell	11
3.4.1	Allgemeines	11
3.4.2	Luftströmungswiderstand	11
3.4.3	Lärmvorhersage mit dem SPERoN Modell	12
4	Resultate	14
4.1	Akustische Belagsgütemessungen mit dem SPB-Verfahren	14
4.1.1	Neu eingebaute Beläge	14
4.1.2	Bestehende Beläge	15
4.2	Akustisches Alterungsverhalten	16
4.2.1	Neu eingebaute Beläge	17
4.2.2	Bestehende Beläge	17
4.3	Akustische Belagsgütemessungen mit dem CPX-Verfahren	17
4.3.1	Akustische Homogenität	17
4.3.2	Alterungsverhalten	18
4.3.3	Besonderheiten	19
4.4	Oberflächentextur der Pilotstrecken	20
4.4.1	Mittlere Profiltiefe	20
4.4.2	Gestaltfaktor und Wellenlänge bei Amax	22
4.5	SPERoN	25
4.5.1	Luftströmungswiderstand	25
4.5.2	SPERoN Prognose	26

5	Folgerungen	27
5.1	Akustische Erkenntnisse	27
5.2	Belagstechnische Kennwerte versus Akustik	27
5.3	Empfehlungen	28
	Anhang	29
A1	CPX-Verlaufsdigramme	29
A2	Situationsplan, Textur- und Wellenlängenspektren, Frequenzspektren Personenwagen, Belagsfotos	38

1 Einleitung

1.1 Ziel, Auftrag

Die Lärmschutzverordnung verlangt die Lärmsanierung aller Haupt- und übrigen Strassen bis 31. März 2018. Das Umweltschutzgesetz sieht in Art. 11 vor, dass Lärm grundsätzlich durch Massnahmen an der Quelle zu begrenzen ist.

Über 80 % der Betroffenen mit Strassenlärmbelastungen über den Immissionsgrenzwerten befinden sich an Innerortsstrecken. Um hier zielgerichtet Lösungen zu finden, haben BAFU und ASTRA gemeinsam das Forschungsprojekt «Lärmarme Beläge Innerorts» lanciert, damit möglichst rasch einheitliche, technische Empfehlungen in Form von typisierten Belagsrezepturen für die praktische Anwendung zur Verfügung stehen.

1.2 Vorgehen

Aufgrund der Erkenntnisse einer umfangreichen Literaturrecherche und Erfahrungen der Kantone mit lärmarmen Belägen (Statusbericht 2003^[8]) wurden 12 Belagstypen evaluiert und als neue Teststrecken eingebaut. Zusätzlich wurden 9 bestehende, von den kantonalen Tiefbauämtern als lärmarm bezeichnete Beläge in die Untersuchungen miteinbezogen. Die Teststrecken befinden sich im Innerortsbereich (Tempo 50 km/h).

Die gewählten Belagstypen bewegen sich innerhalb der geltenden Normen oder im Rahmen langjähriger Erfahrungen. Neben zwei offenporigen Twinlayer-Belägen wurden vor allem feinkörnige Beläge der Typen AC MR und SPA getestet (Tab. 1).

Zur Verbesserung der akustischen Dauerhaftigkeit der Beläge wurden durchwegs polymermodifizierte Bindemittel und verschiedene Materialien wie Elektroofenschlacke (EOS), Gummigranulat sowie ausgewählte Provenienzen der Gesteinskörnungen (Famsa, Gasperini) verwendet.

An den meisten Teststrecken wurden 2004 bis 2009 jährlich belagstechnische Messungen und akustische Belagsgütemessungen durchgeführt. Im Jahr 2007 wurde ein umfangreicher Schlussbericht verfasst^[8].

Die bis 2007 durchgeführten Messungen wurden 2008 und 2009 wiederholt und mit CPX-Messungen, welche die akustische Homogenität der gesamten Teststrecke wiedergeben, ergänzt. Zudem wurden 2009 erstmals auch die Luftströmungswiderstände gemessen und das Lärm-Prognose-Modell SPERoN angewendet.

Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse dieser neuen Messungen zusammengestellt und mit den Messergebnissen früherer Jahre verglichen.

2 Pilotstrecken und bestehende Beläge

Die Teststrecken wurden im Jahr 2003 aufgrund von Vorschlägen der Kantone ausgewählt.

Die Testbeläge sind in den nachfolgenden Tabellen zusammengestellt. Die genaue Lage der Strecken geht aus den Streckenprotokollen (Beilagen A2) hervor.

Tab. 1 Belagstypen, die auf den neuen Pilotstrecken eingebaut wurden

Pilotstrecken	Neue Testbeläge	Herkunft Splitt	Länge [m]	DTV	Datum Einbau
Kreuzlingen TG	PA 4 / PA 8 Twinlayer	Walliswil	150	11500	04.08.2004
Sargans SG	PA 8 / PA 16 Twinlayer	Hagerbach	320	6170	17.09.2004*
Turtmann VS	SPA 4	Famsa	550	14500	28.09.2004
	AC MR4 EOS Gummigranulat	Stahl Gerlafingen	250		29.09.2004
	AC MR4 EOS	Stahl Gerlafingen	250		29.09.2004
	AC MR4	Famsa	550		30.09.2004
Sargans SG	AC MR4	Gasperini	300	6170	20.09.2004
	AC MR8 EOS Gummigranulat	Stahl Gerlafingen	300		13.09.2004
Zuchwil SO	AC MR8 EOS	Stahl Gerlafingen	180	8924	31.08.2004
Luzern LU	Whisper-Grip®	Chromerzschlacke	150	16100	31.08.2004**
Altendorf SZ	SPA 8 Schichtdicke 15 mm	Gasperini	110	14500	06.10.2005**
	SPA 8 Schichtdicke 20 mm	Gasperini	130		06.10.2005**

* wegen massiver Kornausbrüche aus dem Messprogramm eliminiert

** wegen Nichterfüllens der Lärminderungsbedingungen aus dem Messprogramm eliminiert

Tab. 2 Bestehende lärmarme Beläge, die in die Untersuchungen miteinbezogen wurden

Strecken		Beläge	Herkunft Splitt	Länge	DTV	Einbaujahr
Leuggern	AG	PA 8		90	2000	2004
		SPA 8		90	2000	
		MA 8 mit Abstreuerung 2/4		60	2000	
		MA 8 mit Abstreuerung 3/6		60	2000	
Sargans	SG	AC 11		320	6170	2004
Sessa	TI	AC 11 Leca	Gasperini		1086	2002
Bellinzona	TI	AC 11 Leca	Gasperini	320	19800	2004
Les Evouettes	VS	Colsoft 8®			6000	2002***
Grossgurmels	FR	Wecophone 6®	Famsa		10400	2003

*** Messungen nicht in allen Jahren wegen Nichterfüllens der Lärminderungsbedingungen

3 Methoden

3.1 Akustische Belagsgütemessungen

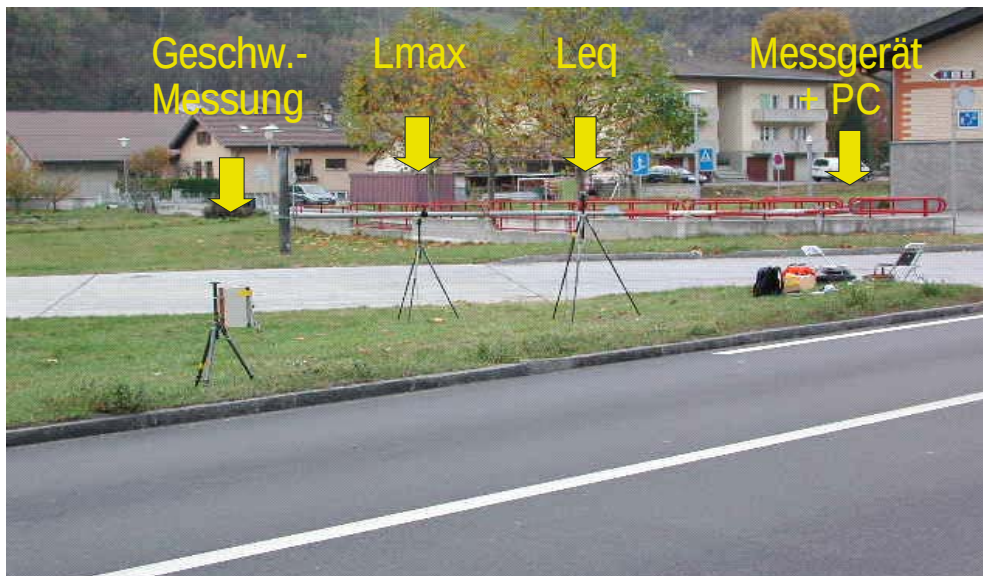
3.1.1 Messungen mit dem SPB-Verfahren

Die akustischen Belagsgütemessungen wurden nach der statistischen Vorbeifahrtmethode (statistical pass-by method SPB, ISO 11819-1) durchgeführt. Dabei werden die Vorbeifahrtspegel von 80–100 Personenkraftwagen und 30 Lastwagen gemessen, wobei auf den Innerortsstrecken nicht immer die nötige Anzahl Lastwagenvorbeifahrten innerhalb vernünftiger Zeit registriert werden können.

Neben dem maximalen Schalldruckpegel $L_{\max}$ wurde auch der energieäquivalente Dauerschallpegel L_{eq} jeder Vorbeifahrt in dBA gemessen, wie dies im «Technischen Merkblatt für akustische Belagsgütemessungen an Strassen» des ASTRA beschrieben ist, da dieser Wert direkt mit dem in der Schweiz üblichen Lärm-Berechnungsmodell STL86+ der EMPA korreliert werden kann. Die Distanzen der Mikrophone zu den Fahrstreifenachsen betrugen an allen Messorten 7,5 m für $L_{\max}$ und 5 m für L_{eq} . Bei jeder Vorbeifahrt wurde die Geschwindigkeit des Fahrzeugs mit einem Radargerät erfasst.

Abb. 1 Messanordnung für die statistische Vorbeifahrtmethode

Von links nach rechts: Geschwindigkeitsmessgerät, Mikrophon in 7,5 m Distanz ($L_{\max}$) und 5 m Distanz (L_{eq}), Messgeräte und PC. Die Vorbeifahrtsmessung erfolgte nach dem «Technischen Merkblatt für akustische Belagsgütemessungen an Strassen», welches sich nach ISO 11819-1 richtet.



Die Auswertung der zusätzlich zur ISO-Norm erhobenen L_{eq} -Werte erfolgte nach dem in der Schweiz gültigen Standardberechnungsverfahren StL-86+, welches auf dem L_{eq} basiert (Korrekturen zum Strassenlärm – Berechnungsmodell^[8]).

Die Werte wurden mit einem der Literatur entnommenen Faktor von -0,06 dBA/°C für dichte Beläge und -0,04 dBA/°C für offenporige Beläge auf 20 °C Belagstemperatur korrigiert. Bei den Lastwagen wurde eine Temperaturkorrektur von -0,03 dBA/°C verwendet. Die Korrekturfaktoren für dichte Beläge wurden in diesem Forschungsprojekt im Rahmen der Zusatzuntersuchungen überprüft und haben sich dort bestätigt.

Im Bericht wird die akustische Belagsgüte als Modellabweichung des Mischverkehrs mit 8 % Lastwagenanteil am Gesamtverkehr angegeben. Diese Werte sind mit dem Leitfaden Strassenlärm des ASTRA/BAFU^[8] kompatibel.

Bei einzelnen Standorten ist der Mischverkehrswert aufgrund der geringen Anzahl messbarer Lastwagen weniger gut abgestützt als der Wert für Personenwagen allein. Für Detailanalysen sind in den Beilagen deshalb die Werte für Personenwagen allein ebenfalls dargestellt.

3.1.2 Akustische Belagsgütemessungen mit dem CPX-Verfahren

Bei der CPX-Methode wird der Schallpegel in schallgedämmten Kammern innerhalb des Messanhängers in unmittelbarer Reifennähe mit zwei Mikrofonen gemessen (ISO 3rd CD 11819-2). Die zwei verwendeten Testreifensätze entsprechen den heutigen Empfehlungen der ISO. Es sind dies:

- Uniroyal Tigerpaw (SRTT) 225/60-R16 (Testreifen A1 für leichte Fahrzeuge)
- Avon AV4 195-R14C (Testreifen D1 für schwere Fahrzeuge).

Pro Reifen werden die A-bewerteten Schallpegel kontinuierlich auf der gesamten Messstrecke erfasst. Dabei werden die Mikrofonsignale alle 125 Millisekunden mit einer Frequenz von 8 Hz aufgezeichnet und über ein Messsegment von 20m Länge energetisch gemittelt. Die Messfahrt erfolgte bei möglichst konstanter Geschwindigkeit von 50 km/h. Zudem werden die Parameter Geschwindigkeit, Lufttemperatur und die GPS-Signale fortlaufend aufgezeichnet.

Die Messresultate werden entsprechend der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit sowie bezüglich geräteeigener Schallreflexionen korrigiert. Ausgehend von den korrigierten Schallpegeln werden anschliessend die CPX-Werte für leichte Fahrzeuge (Personenwagen) und für schwere Fahrzeuge (Lastwagen) ermittelt und mit einer Temperaturkorrektur von $-0,05 \text{ dBA}/^{\circ}\text{C}$ ausgegeben. Die Umrechnung in die in der Schweiz übliche «Abweichung vom Modell STL86+» erfolgt durch lineare Korrelation mit den SPB-Messungen.

Abb. 2 CPX-Messanhänger



Sämtliche nicht ausgegliederte Teststrecken des Forschungsprojekts wurden im 2008 erstmalig mit einem CPX-Messanhänger gemessen. Im Herbst 2009 wurden diese Messungen wiederholt.

Die CPX-Methode erlaubt es, die Homogenität der Teststrecken zu beurteilen. Während die SPB-Messungen nur die akustische Belagsgüte an einem einzigen Querschnitt wiedergeben, zeigen die CPX-Pegelverläufe die akustische Belagsgüte über die ganze Länge der Teststrecke.

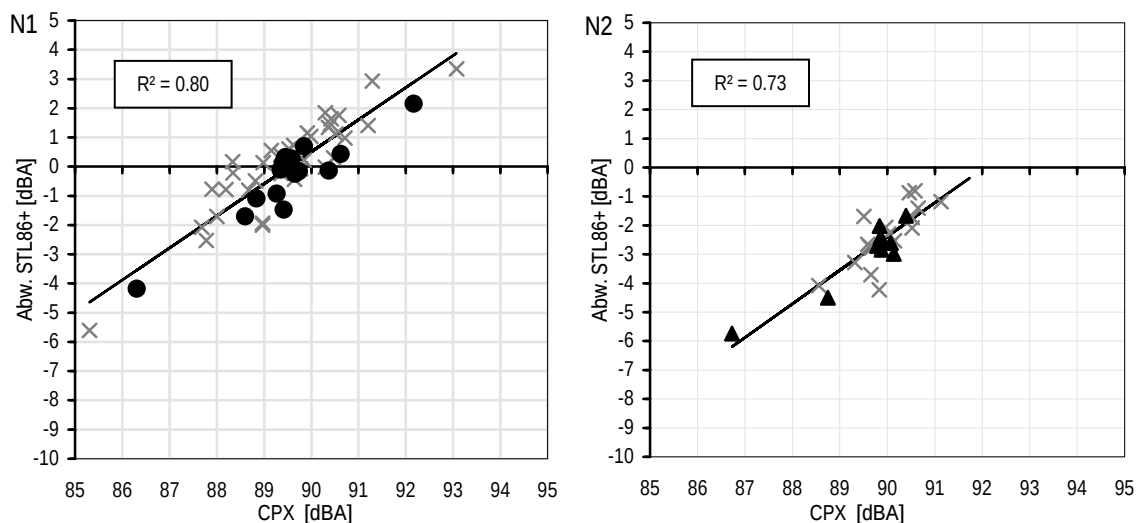
Für CPX-Messungen stellen Teststreckenlängen von 100 m die untere Grenze dar, da sich sonst die Messresultate der einzelnen Teststrecken zu stark überlagern. Deutlich erkennbar ist dies aus dem Messprotokoll von Leuggern. Längere Teststrecken sind auch aus einbautechnischer Sicht von Vorteil.

3.2 Korrelation zwischen CPX-Messwerten und SPB-Messungen

Die CPX-Werte werden mittels Regressionsmodellen in die im Bericht verwendete «Abweichung vom Modell STL86+» umgerechnet. Dazu wurden die CPX-Pegel an einer Vielzahl von Standorten mit in derselben Zeitspanne durchgeführten SPB-Messungen korreliert. Das Resultat der Korrelation ist in Abb. 3 dargestellt. Die fett ausgefüllten Symbole sind Wertepaare aus dem vorliegenden Forschungsprojekt, die Kreuze stellen andere SPB-CPX-Wertepaare von Strassen im Innerortsbereich dar.

Abb. 3 Korrelation zwischen CPX-Messwerten und SPB-Messungen im Innerortsbereich

Korrelation zwischen CPX-Messwerten und SPB-Messungen im Innerortsbereich (Tempo 50 km/h). Die ausgefüllten Symbole sind Wertepaare aus dem Forschungsprojekt. N1 / N2 = PW / LW (gemäss LSV)



Die Genauigkeit dieser Umrechnungsmodelle wurde anhand von Korrelations- und Regressionsanalysen überprüft. Die Bestimmtheitsmasse (R^2) für die verwendeten Umrechnungsmodelle betragen 80 % für CPXcars und SPB N1 (Vorbeifahrtmessungen von Personenwagen und leichten Fahrzeugen) und 73 % für CPXtrucks und SPB N2 (Vorbeifahrtmessungen von Lastwagen und schweren Fahrzeugen).

Für das Umrechnungsmodell CPXcars–SPB N1 liegt das 95 % Vertrauensintervall zwischen 0,4 und 1,2 dBA, was einer Abweichung von $\pm 0,2$ bis $\pm 0,6$ dBA entspricht; für das Umrechnungsmodell CPXtrucks–SPB N2 bewegt sich das 95 % Vertrauensintervall zwischen 0,5 und 1,4 dBA, was einer Abweichung von $\pm 0,25$ bis $\pm 0,7$ dBA entspricht.

3.3 Makrotextur

Für die Schallentstehung hat die Oberflächentextur eines Belages einen entscheidenden Einfluss. Das Oberflächenprofil wurde mit einem Laser-Profilometer nach EN ISO 13473-4^[1] linear aufgezeichnet. Es wurden 5 Messpunkte pro Millimeter gespeichert und daraus folgende Kennwerte abgeleitet:

Tab. 3 Makrotexturkennwerte

Kennwert	Beschreibung	Richtwerte
MPD (Mean Profile Depth)	Mittlere Profiltiefe; das ist der Abstand zwischen der höchsten Profilschneidspitze und dem Mittelwert der Profilkurve innerhalb einer Messlänge von 100 mm. Die Definition ist in EN ISO 13473-1 ^[2] angegeben.	keine
Gestaltfaktor g	Durch eine statistische Auswertung der Häufigkeit der Profiltiefen entsteht ein Parameter zur Kennzeichnung der Gestalt der Textur, der als Gestaltfaktor g bezeichnet wird. Konkave Texturen (Plateau mit Tälern) gelten als lärmarm, da sie die Reifen weniger stark anregen und trotzdem für eine gute Entlüftung der in den Reifen eingepressten Luft sorgen und damit den Air-Pumping-Effekt reduzieren ^[6] .	g < 60 % konvex g > 60 % konkav
Spektralanalyse	Gemäss EN ISO 13473-2 wird das Belagsprofil mathematisch mittels einer Fourier-Transformation in Sinusschwingungen mit unterschiedlichen Wellenlängen und Amplituden zerlegt. Dargestellt wird die Rautiefe (als quadratischer Mittelwert des Sinus-Profils) in Abhängigkeit der Texturwellenlänge.	keine
max. Rautiefe $R_{t_{\max}}$	Maximale Rautiefe [µm] im Wellenlängenbereich von 2,5 bis 200 mm.	keine
Wellenlänge bei $R_{t_{\max}}$	Texturwellenlänge [mm] die der maximalen Rautiefe entspricht. Nach ^[6] wird postuliert, dass akustisch günstige Beläge die grössten Rautiefen im Wellenlängenbereich unter 12,5 mm und niedrige Rautiefen bei Texturwellenlängen von 16 bis 50 mm aufweisen.	$12,5 \geq R_{t_{\max}} \geq 4,0$

Die in Tab. 3 angegebenen Richtwerte für den Gestaltfaktor sowie die Wellenlänge bei maximaler Rautiefe stammen aus dem Jahr 2002^[6] und sollten nur als Gedankenstütze dienen. Sie drücken auf einfacher Weise zwei wichtige Postulate für lärmarme Beläge aus (siehe Beschreibung). Gleichzeitig sind sie aber kein allgemeingültiges Bewertungskriterium für diese Beläge.

3.4 SPERoN – Prognose – Modell

3.4.1 Allgemeines

SPERoN ist ein Akronym für Statistical Physical Explanation of Rolling Noise. Es handelt sich um ein Simulationsmodell für die Prognose der akustischen Belagsgüte, welches aus einem physikalischen und einen statischen Anteil besteht. Es wurde durch ein Konsortium bestehend aus der Müller-BBM Gruppe und der schwedischen Chalmers University, Division of Applied Acoustics, geschaffen.

Das SPERoN Modell ist in Form einer Software Applikation seit Januar 2009 öffentlich zugänglich^[5]. Die Applikation ist noch nicht vollkommen und wird stets entwickelt. Bereits vorgesehene Einrichtungen werden in den kommenden Monaten umgesetzt, so dass das Modell zu absehbarer Zeit vollständig zur Verfügung stehen wird.

3.4.2 Luftströmungswiderstand

Um das SPERoN-Prognose-Modell anwenden zu können, muss neben dem Oberflächenprofil auch der Luftströmungswiderstand gemessen werden. Dieser Wert wurde im Sinne einer Vorevaluation an lediglich 8 von 17 Testbelägen gemessen. Auswahlkriterien waren die Porosität des Mischgutes sowie der Verkehr auf der Teststrecke. Der Einfachheit halber wurden gut zugängliche Strecken, bei denen die Messungen ohne grosse Verkehrsbehinderung durchgeführt werden konnten, bevorzugt.

Der Luftströmungswiderstand wurde in Anlehnung an die ISO 9053^[3] sowie DIN EN 29053^[4] gemessen. Die erwähnten Normen beschreiben eine Methode, die für Labormessungen vorgesehen ist. Da jedoch in unserem Fall die Messungen in situ durchgeführt wurden, waren einige Anpassungen der Versuchsanordnung notwendig. Es wurde das in Deutschland üblicherweise angewandte modifizierte Verfahren angewendet^[7].

Das Messgerät ist in Abb. 4 dargestellt. Gemessen wird der Überdruck in der Kammer in Abhängigkeit des geregelten Durchflusses der eintretenden Luft. Beide Messgrößen stehen theoretisch in einer linearen Abhängigkeit, wobei die Steigung von der Geschwindigkeit, bei der die Luft durch den Belag entweichen kann, abhängt.

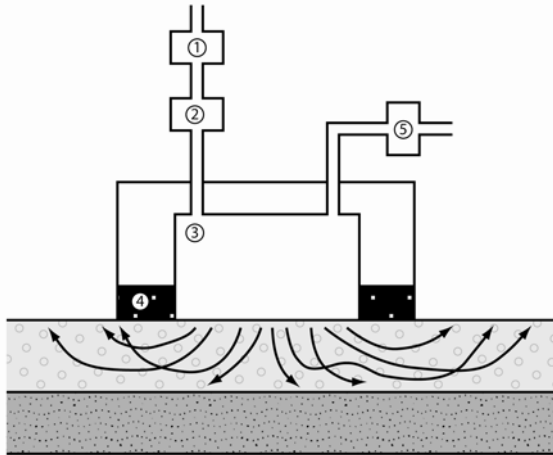
Der Luftströmungswiderstand einer Deckschicht wird definiert als Quotient des Überdruckes in der Kammer Δp zum Durchfluss q . Der spezifische Strömungswiderstand R_s wird definiert als Quotient des Überdruckes zur Strömungsgeschwindigkeit q/A (A bezeichnet die Prüffläche). Diese Definition wird in der folgenden Gleichung erläutert.

$$R_s = A \frac{\Delta p}{q}$$

Ferner wird der spezifische Luftströmungswiderstand eines Strassenbelages empirisch bei einer Luftströmungsgeschwindigkeit von genau 0,0125 m/s bestimmt.

Abb. 4 Messapparatur für die Bestimmung des Luftströmungswiderstandes

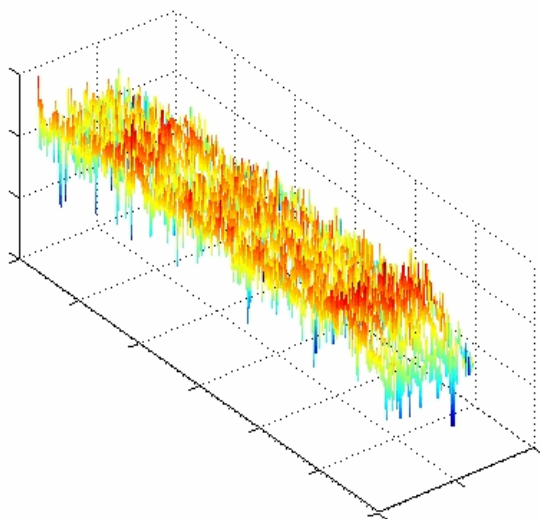
Die Messapparatur zur Bestimmung des Luftströmungswiderstandes besteht aus (1) Kompressor, (2) Durchflussregler, (3) Kammer, (4) Dichtung und (5) Differenzdrucksensor. Der Innendurchmesser der Kammer beträgt 100 mm.



3.4.3 Lärmvorhersage mit dem SPERoN Modell

Der physikalische Anteil des Modells berechnet die Kontaktkräfte zwischen Belagsoberfläche und Reifen. Die Belagsoberfläche wird durch ein quasi 3D-Profil simuliert (Abb. 5). Für den Reifen wird ein Standardmodell gewählt (Abb. 6). Der statistische Anteil bildet ein virtuelles Lärmspektrum an Hand von geschätzten Reifenvibrationen, Luftströmungsmechanismen, Reibungen, Reifenprofile und dem aerodynamisch erzeugten Schall. Als Simulationsergebnis liefert das Modell ein Lärmspektrum und eine Lärmprognose in dBA.

Das SPERoN Modell ist sowohl für neue wie für alte Beläge geeignet. Im Laborbereich kann es als Optimierungswerkzeug während einer virtuellen Entwicklung von neuen lärmarmen Belägen sowie als akustische Bewertung von Probekörpern in Form von Platten eingesetzt werden. In situ dienen die Prognosen wesentlich der Kalibrierung des Modells im Zusammenhang mit CPX oder SPB Lärmmessungen.

Abb. 5 Quasi 3D plot einer Belagsoberfläche**Abb. 6 Reifen Michelin Energy 195/65 R15**

Dank dieser Applikation ist es dem Anwender möglich, Parameter wie Rauigkeit, Schallabsorption, Luftströmungswiderstand und Steifigkeit zu variieren und deren Einfluss auf das Lärmspektrum nach zu verfolgen.

Die notwendigen Input Parameter für eine Simulation sind

- **Oberflächenprofile**

Es werden üblicherweise sechs parallele Oberflächenprofile mit einem Abtastintervall von 0,2 mm und einer Mindestlänge von zwei Meter gemessen. Der seitliche Abstand der Profile beträgt 10 ... 20 mm. Aus diesen Daten wird das quasi 3D-Profil und das Texturspektrum gebildet. Im Rahmen der durchgeführten Messungen wurde das 3D-Profil mit einem 20 m Profil gebildet. Da bei längeren Messstrecken grössere Wellenlängen (tiefere Frequenzen) erfasst werden, mussten zuerst die Tieffrequenz-Wellen mit einem Hochpassfilter beseitigt und danach das Profil in sechs 3 Meter Abschnitte zerlegt werden (dieser Wert wurde gemessen).

- **Absorptionskoeffizient**

Das Spektrum des Absorptionskoeffizienten der Deckschicht wurde nicht gemessen. Ersatzweise konnte der Betreiber auf Basis der bautechnischen Parameter (Schichtdicke, Hohlraumgehalt) ein Schallabsorptionsspektrum abschätzen.

- **Luftströmungswiderstand**

Der Luftströmungswiderstand geht in die Berechnung der air-pumping-Geräusche ein, da er diesen Geräuschestehungsmechanismus direkt beeinflusst. Der Luftströmungswiderstand beeinflusst grundsätzlich auch das Absorptionsverhalten hohlraumreicher Beläge. Da der Schallabsorptionsgrad solcher Beläge aber maßgeblich von anderen bautechnischen Parametern wie Hohlraumgehalt (nach oben offene Hohlräume) und Schichtdicke bestimmt ist, werden hohlraumreiche Beläge im Modell nicht anhand des Luftströmungswiderstandes, sondern anhand des frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrades berücksichtigt. (der Luftströmungswiderstand wurde gemessen)

- **Mechanische Impedanz**

Die mechanische Impedanz der Oberfläche wurde vom Betreiber der SPERoN Datenbank (Müller-BBM) aufgrund von Erfahrungswerten festgelegt.

Bevor der Rechner die Simulation startet, kann der Benutzer die Fahrzeuggeschwindigkeit präzisieren. Die qualitative Zusammensetzung des Verkehrs (Anteil PW, Anteil LKW) sollte in nächster Zukunft auch berücksichtigt werden können. Momentan wird mit 100 % PW Verkehr simuliert.

Die Berechnungen wurden für ein Reifen Michelin Energy 195/65 R15 (ein Reifen mit minimiertem Rollwiderstand) und für eine Geschwindigkeit von 50 km/h sowie für eine Last pro Reifen von 425 kg durchgeführt.

4 Resultate

Die Lärm- und Textur-Messungen wurden – wie in den Jahren zuvor – zwischen August und Oktober durchgeführt.

4.1 Akustische Belagsgütemessungen mit dem SPB-Verfahren

Die akustische Belagsgüte der Testbeläge ist nachfolgend für den Mischverkehr unter Annahme eines Lastwagenanteils von 8 % dargestellt.

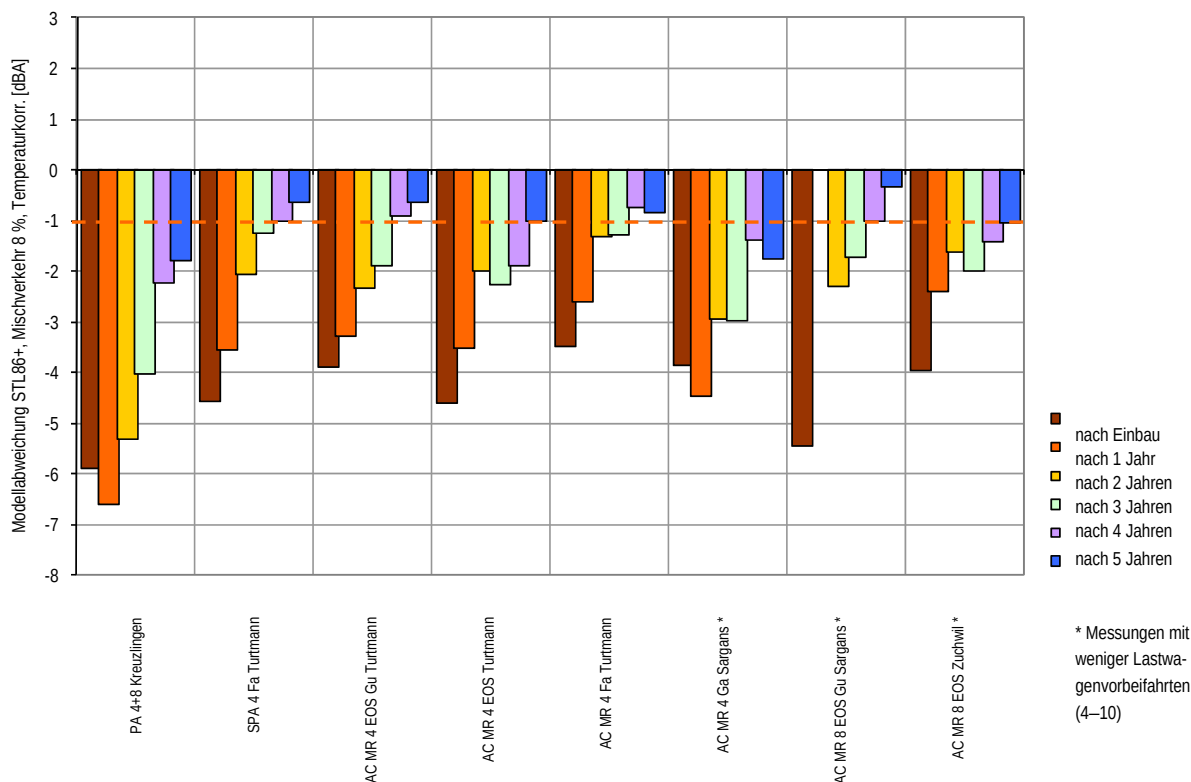
4.1.1 Neu eingebaute Beläge

Bei den neu eingebauten Testbelägen wurden sehr gute Anfangslärmminderungswerte von -3 dBA bis -6 dBA erreicht.

Nach 5 Jahren kontinuierlicher Messung ist erwartungsgemäss festzustellen, dass alle Beläge lauter geworden sind. Der Zielwert von -1 dBA wird bei den Belägen PA 4+8 in Kreuzlingen, AC MR4 EOS in Turtmann, AC MR4 Ga in Sargans und AC MR8 EOS in Zuchwil auch nach 5 Jahren eingehalten. Bei den Belägen SPA Fa, AC MR4 EOS Gu und AC MR4 Fa in Turtmann sowie AC MR8 EOS Gu in Sargans wird der Zielwert überschritten.

Abb. 7 Entwicklung der akustischen Belagsgüte für Mischverkehr auf neu eingebauten Belägen während der letzten 5 Jahre

Dargestellt sind die Differenzen zum in der Schweiz gültigen Modell STL86+. Die Werte sind temperaturkorrigiert. Messungen, die den Zielwert von -1 dBA bei den Personenwagen oder beim Mischverkehr deutlich nicht mehr erreichten, wurden abgebrochen. Messungen, die auf weniger als 10 Lastwagenvorbeifahrten beruhen sind mit einem Stern (*) markiert, solche mit weniger als 4 Lastwagenvorbeifahrten sind gar nicht dargestellt.



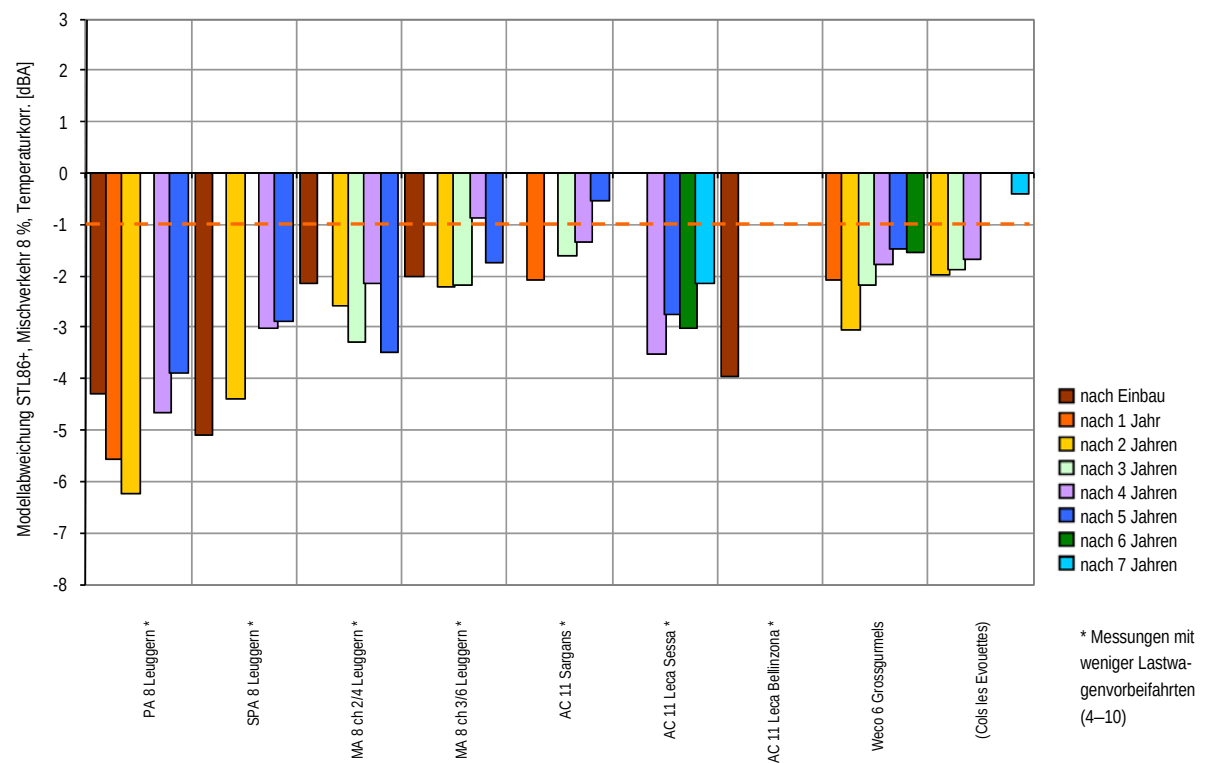
4.1.2 Bestehende Beläge

Im Vergleich zu den neu eingebauten Belägen zeigen sich die bestehenden Beläge generell günstiger in ihrem akustischen Alterungsverhalten. Dies hängt wesentlich mit einzelnen sehr geringen Verkehrsaufkommen zusammen, insbesondere auf den Strecken in Leuggern und in Sessa. Zudem fehlen bei einigen Belägen die Anfangswerte.

Einzig der AC 11 in Sargans und der Colsoft 8 in Les Evouettes erfüllen nach 5 bzw. 7 Jahren den im Forschungsvorhaben gesetzten Zielwert für lärmarme Beläge von -1 dBA nicht mehr.

Abb. 8 Entwicklung der akustischen Belagsgüte für Mischverkehr auf bestehenden Belägen während der letzten 7 Jahre

Dargestellt sind die Differenzen zum in der Schweiz gültigen Modell STL86+. Die Werte sind temperaturkorrigiert. Messungen, die auf weniger als 10 Lastwagenvorbeifahrten beruhen sind mit einem Stern (*) markiert, solche mit weniger als 4 Lastwagenvorbeifahrten sind gar nicht dargestellt.



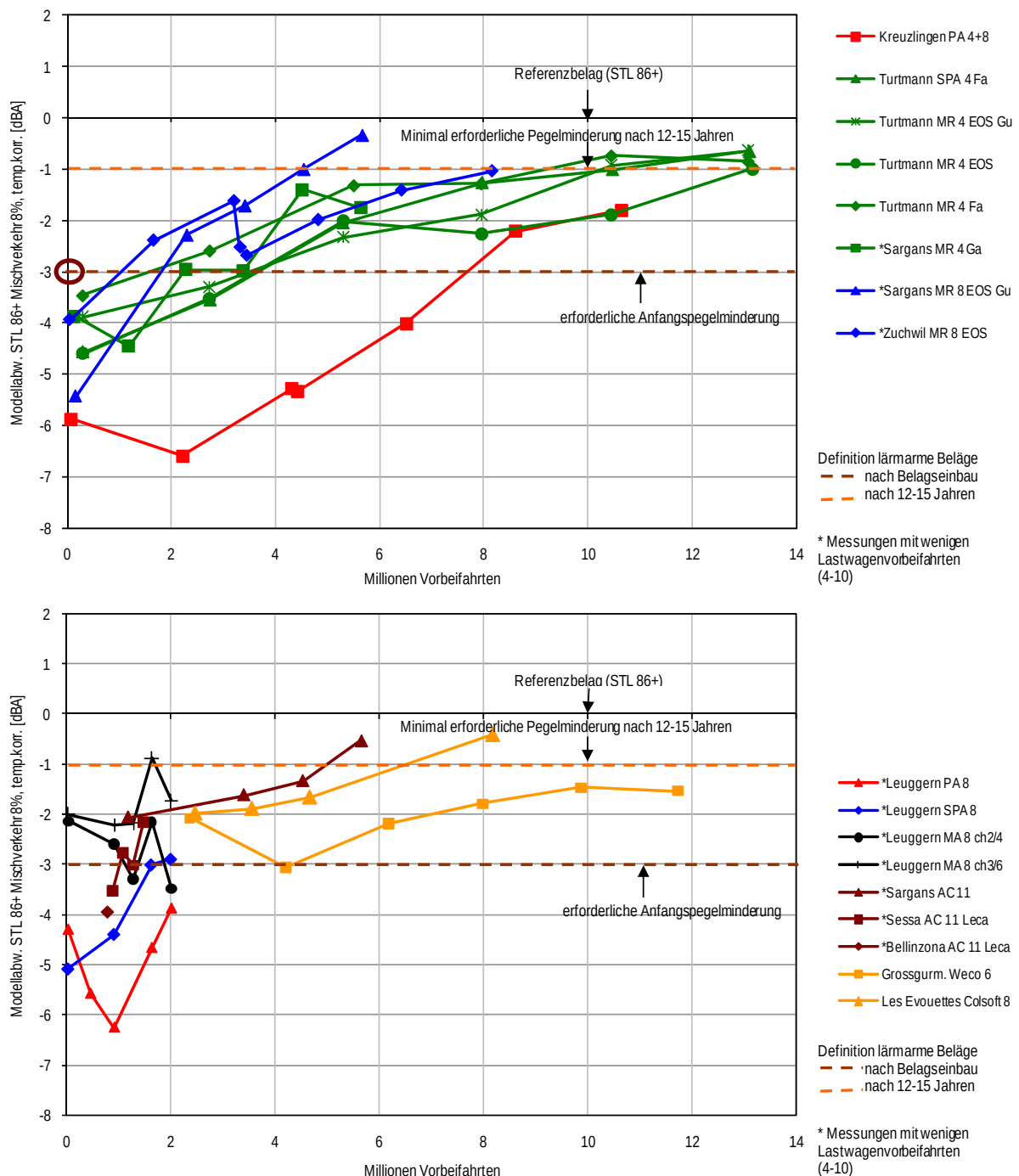
4.2 Akustisches Alterungsverhalten

Beläge mit wenig Verkehrsaufkommen verlieren ihre akustischen Eigenschaften weniger schnell als solche mit einem hohen Verkehrsaufkommen. Die Verkehrsbelastung stellt somit einen entscheidenden Faktor für die akustische Alterung der Beläge dar. Nachfolgend ist die akustische Belagsgüte in Abhängigkeit der Verkehrsbelastung dargestellt.

Angaben über den durchschnittlichen täglichen Verkehr DTV der einzelnen Strecken finden sich im Anhang A2.

Abb. 9 Akustische Belagsgüte in Abhängigkeit der Verkehrsbelastung

Akustische Belagsgüte in Abhängigkeit der Verkehrsbelastung auf neu eingebauten Belägen während der letzten 5 Jahre. Dargestellt sind die Differenzen zum in der Schweiz gültigen Modell STL86+. Die Werte sind temperaturkorrigiert.



4.2.1 Neu eingebaute Beläge

Bei den semidichten Belägen verläuft die akustische Alterung asymptotisch, d. h. die akustische Verschlechterung verlangsamt sich mit zunehmendem Alter. Zudem bestätigt sich, dass die feinkörnigeren 4er-Beläge (grün) bislang bessere akustische Eigenschaften besitzen als die grobkörnigeren 8er-Beläge (blau).

Bisher noch keinen asymptotischen Verlauf zeigt der Twinlayer-Belag in Kreuzlingen, welcher während zweier Jahre hervorragende Lärminderungseigenschaften zeigte, dann aber jährlich fast 2 dBA lauter wurde. Untersuchungen im Jahr 2007 zeigten, dass die Poren dieses Belags weitgehend verstopft waren, was auch durch eine intensive Druck/Vakuum-Reinigung nicht geändert werden konnte. Die visuelle Beurteilung lässt vermuten, dass ebenso Kornausbrüche stattgefunden haben. Der Twinlayer-Belag in Kreuzlingen scheint einen ähnlichen Degradationsprozess zu durchlaufen wie dies schon beim Twinlayer in Sargans in wesentlich kürzerer Zeit beobachtet werden konnte.

4.2.2 Bestehende Beläge

Die Mehrzahl der bestehenden Beläge befindet sich auf Strecken mit wenig Verkehr. Aussagen über ihr akustisches Alterungsverhalten sind zurzeit noch nicht möglich. Von den Belägen mit mehr Verkehr vermag nur der Weco 6 in Grossgurmels den Zielwert von -1 dBA einzuhalten. Sein Alterungsverhalten entspricht jenem der neu eingebauten 4er-Beläge.

Die Teststrecken in Leuggern weisen besondere Charakteristiken auf. Sie befinden sich ausserorts, werden mit höheren Geschwindigkeiten befahren als die anderen Teststrecken und liegen zudem im ländlichen Gebiet (Schmutzeintrag). Ein Vergleich der dort eingebauten Beläge untereinander ist zulässig. Beim Vergleich mit allen andern Teststrecken ist jedoch Vorsicht geboten.

4.3 Akustische Belagsgütemessungen mit dem CPX-Verfahren

Die Pegelverläufe aller gemessenen Teststrecken befinden sich im Anhang. Um das Alterungsverhalten der Beläge über den Verlauf der Strecke feststellen zu können, sind die diesjährigen CPX-Pegelverläufe (durchgezogene Linien) und jene aus dem Jahr 2008 (gestrichelte Linien) jeweils im gleichen Diagramm dargestellt. Dort wo SPB Messungen durchgeführt wurden, sind diese ebenfalls in den Diagrammen eingetragen.

4.3.1 Akustische Homogenität

Die Pegelverläufe der offenporigen Beläge in Kreuzlingen und in Leuggern sind inhomogen. Beide Beläge weisen heute Kornausbrüche auf. Zudem zeigen die Pegelstreifen, dass, in Fahrtrichtung betrachtet, ihre akustische Belagsgüte zu Beginn relativ schlecht ist, um dann mit zunehmender Länge akustisch besser zu werden. Dieser Effekt ist bei beiden Fahrspuren zu beobachten und legt den Schluss nahe, dass die akustische Verschlechterung am Anfang auf verstärkten Schmutzeintrag aus dem Belagsabschnitt vor dem PA zurückzuführen ist.

Tendenziell weisen Testbeläge mit kleinem Grösstkorn (4 mm) eine bessere akustische Homogenität auf als Testbeläge mit grösserem Grösstkorn. Die grössten Inhomogenitäten mit Pegelschwankungen von 2 dBA und mehr weisen die Testbeläge mit einer maximalen Korngrösse von 11 mm auf (AC11 Sargans und AC11 Leca Bellinzona).

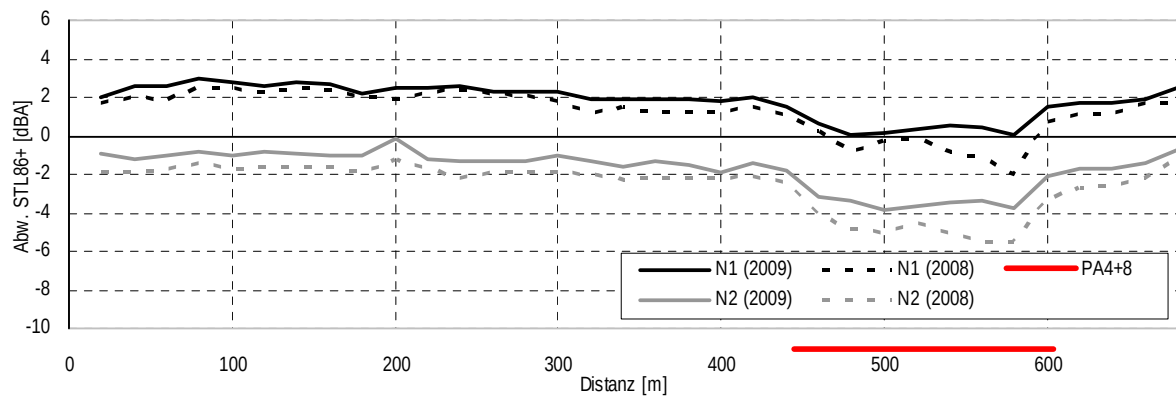
Bei einzelnen Belägen sind Einflüsse von baulichen Gegebenheiten (Schachtdeckel, Fussgängerstreifen, usf.) erkennbar, die nicht mit der Homogenität des Testbelags an sich zusammen hängen. Gerade bei lärmarmen Belägen ist diesem Aspekt aber besondere Beachtung zu schenken.

4.3.2 Alterungsverhalten

Die Abnahme der akustischen Belagsgüte ist auch aufgrund der CPX-Messungen feststellbar. Auf sämtlichen CPX-Messstrecken hat sowohl auf den Testbelägen sowie auch auf den angrenzenden Strassenabschnitten eine Verschlechterung der akustischen Belagsgüte stattgefunden. Auf dem PA 4 + 8 in Kreuzlingen ist diese Verschlechterung im Vergleich zum angrenzenden Abschnitt besonders stark ausgefallen.

Abb. 10 Abnahme der akustischen Belagsgüte

Auf sämtlichen CPX-Messstrecken hat eine Verschlechterung der akustischen Belagsgüte stattgefunden.
N1 / N2 = PW / LW (gemäss LSV)



Die aus den CPX-Messungen erhobene mittlere akustische Alterung fällt belagssortenabhängig unterschiedlich aus.

4.3.3 Besonderheiten

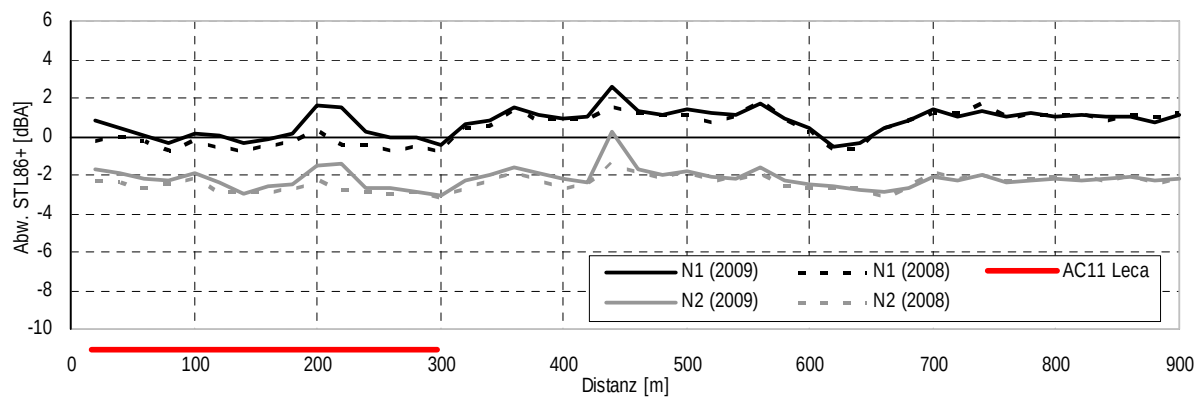
Beim Vergleich der diesjährigen mit den letztjährigen CPX-Pegelverläufen sind vereinzelt auch Abweichungen zu erkennen, die nicht auf das übliche Alterungsverhalten der Beläge zurückzuführen sind. Beispiele dafür sind untenstehend dargestellt und dokumentiert.

AC 11 Leca in Sessa

Auf der Teststrecke in Sessa ist als Folge zunehmender Unebenheiten im Bereich eines Schachdeckels im Vergleich zum Vorjahr eine sprunghafte Pegelzunahme zu beobachten (Fall A). Im Fall B sind neue Unebenheiten im Bereich von Belagsflicken entstanden, die sich auch akustisch auswirken.

Abb. 11 Abnahme der akustischen Belagsgüte Teststrecke Sessa

N1 / N2 = PW / LW (gemäss LSV)

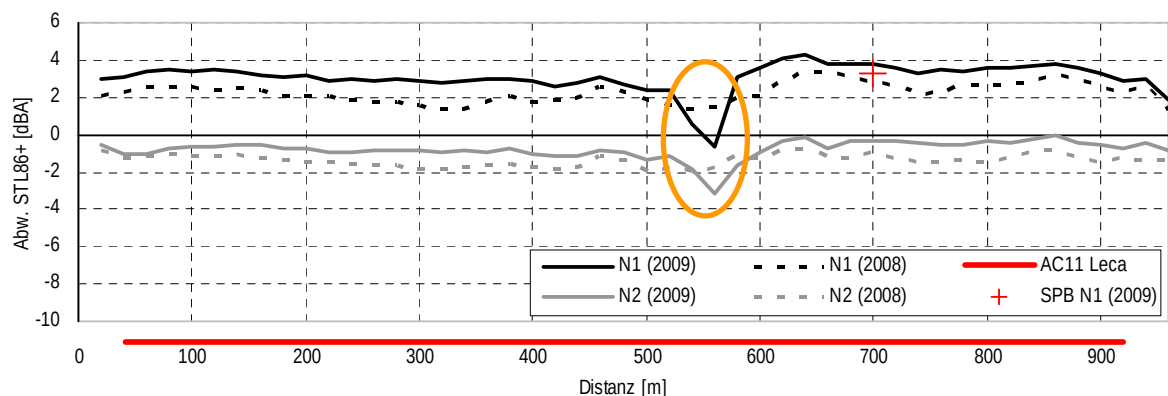


AC 11 Leca in Bellinzona

Auf dem AC 11 Leca in Bellinzona, Fahrbahn Richtung Süden, wurde zwischen den letztjährigen und den diesjährigen Messungen ein Belagsflick erstellt.

Abb. 12 Abnahme der akustischen Belagsgüte Teststrecke Bellinzona

N1 / N2 = PW / LW (gemäss LSV)

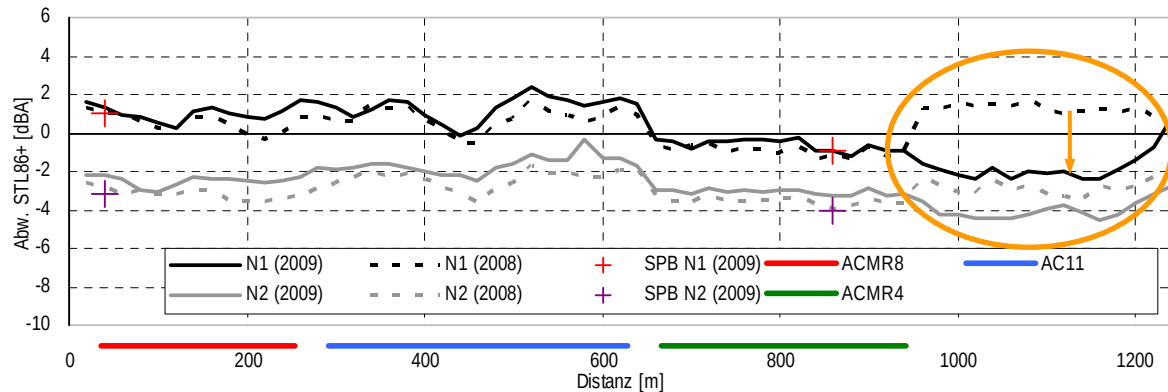


PA 8/16 in Sargans

Der Ersatz des beschädigten PA 8/16 mit einem AC MR8 Belag auf der Teststrecke in Sargans hat im Vergleich zum Vorjahr eine Pegelminderung von ca. 3 dBA zur Folge.

Abb. 13 Abnahme der akustischen Belagsgüte Teststrecke Sargans

N1 / N2 = PW / LW (gemäss LSV)



4.4 Oberflächentextur der Pilotstrecken

Mit fortschreitender mechanischer Belastung erleidet die Fahrbahnoberfläche signifikante Änderungen, die sich mit der mittleren Profiltiefe quantifizieren lassen. Die Änderungen unterteilen sich in zwei Gruppen. Zum einen ist eine Verdichtung der Oberflächentextur zu beobachten; die Rauigkeit nimmt ab und die mittlere Profiltiefe sinkt um mehr als die Hälfte im Vergleich zum neuen Belag. Dieses Verhalten ist typisch für die semi-dichten AC MR Beläge. Zum anderen ist Kornausbruch zu vermerken; die Rauigkeit nimmt zu und so auch die mittlere Profiltiefe. Von dieser Art Veränderung sind vor allem die PA Beläge betroffen. Auch Beläge mit weichen Zusätzen wie Gummigranulat und Leca-Körner können auf die Dauer Kornausbrüche aufweisen.

4.4.1 Mittlere Profiltiefe

Die zwei Kennwerte mittlere Profiltiefe MPD und maximale Rauigkeitstiefe $A_{\max}$ sind in Tab. 4 zusammengefasst. Diese beiden Kennwerte stehen in einem linearen Zusammenhang zueinander und erlauben die Rauigkeit der Oberfläche.

Tab. 4 Evolution der Mittleren Profiltiefe (MPD) zwischen 2004 und 2008

Teststrecke und Mischgutsorte		Maximale Amplitude [μm]							Mittlere Profiltiefe [mm]						
		Herbst 2004	Frühling 2005	Herbst 2005	Herbst 2006	Herbst 2007	Herbst 2008	Herbst 2009	Herbst 2004	Frühling 2005	Herbst 2005	Herbst 2006	Herbst 2007	Herbst 2008	Herbst 2009
Neue Testbeläge															
Kreuzlingen	PA 4 auf PA 8	305	308	310	296	337	385	257	0,87	0,80	0,91	0,88	1,05	1,76	0,70
Turtmann	SPA 4 Famsa	493	243	~	244	189	201	178	1,25	0,67	~	0,63	0,58	0,46	0,41
Turtmann	ACMR 4 EOS Gummigr.	451	190	~	165	173	186	161	0,89	0,53	~	0,51	0,55	0,53	0,45
	ACMR 4 EOS	481	177	~	190	187	149	134	1,06	0,55	~	0,61	0,54	0,49	0,40
	ACMR 4 Famsa	329	160	~	156	185	128	91	0,82	0,61	~	0,58	0,55	0,33	0,27
Sargans	ACMR 4 Gasperini	289	248	259	252	247	235	254	0,84	0,84	0,81	0,79	0,76	0,64	0,64
	ACMR 8 EOS Gummigr.	311	439	430	465	451	435	431	0,76	1,15	0,96	1,20	1,13	*	0,95
Zuchwil	ACMR 8 EOS	350	334	295	252	266	211	256	0,82	0,78	0,68	0,61	0,66	0,64	0,48
Bestehende Testbeläge															
Leuggern	PA 8	543	~	687	646	668	591	700	1,13	~	1,27	1,47	1,37	1,48	1,53
Leuggern	SPA 8	583	~	507	515	545	530	560	1,05	~	1,08	1,30	1,22	1,28	1,21
Leuggern	MA 8 2/4	318	~	134	144	163	181	136	0,79	~	0,54	0,56	0,58	0,54	0,44
	MA 8 3/6	325	~	410	356	374	330	351	1,12	~	1,18	1,15	1,14	1,30	1,05
Sargans	AC 11	229	200	204	~	189	230	239	0,55	0,62	0,51	~	0,59	0,60	0,53
Sessa	AC 11 Leca Gasperini	322	252	~	230	212	231	225	0,59	0,51	~	0,65	0,63	0,54	0,53
Bellinzona	AC 11 Leca Gasperini	466	312	~	380	330	398	650	1,22	0,96	~	1,05	1,04	1,15	1,73
Grossgurmels	Wecophone 6 Famsa	303	298	~	261	301	255	283	0,70	0,60	~	0,61	0,62	0,66	0,62
L. Evouettes	Colsoft 8	361	400	~	369	417	~	402	0,76	0,93	~	1,00	1,04	~	0,99

* Kein Ergebnis infolge Grenzwertüberschreitung

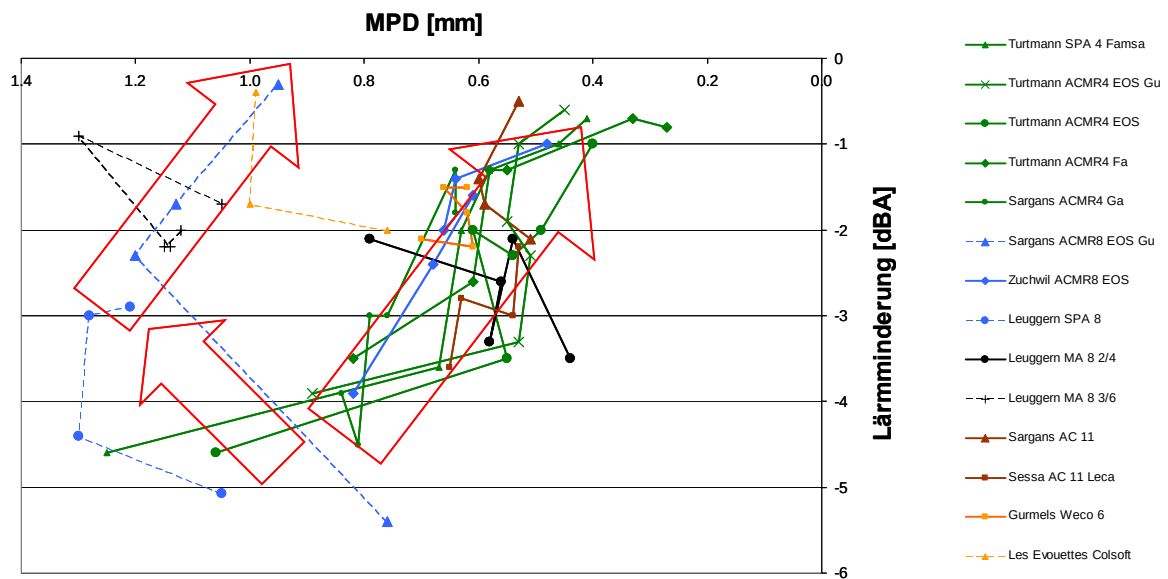
Mit fortschreitender mechanischer Belastung erleidet die Fahrbahnoberfläche signifikante Änderungen die sich mit der mittleren Profiltiefe quantifizieren lassen. Die Änderungen unterteilen sich in zwei Tendenzen. Zum einen sind eine Verdichtung und eine Glättung der Oberflächentextur zu beobachten. Die mittlere Profiltiefe sinkt um mehr als die Hälfte im Vergleich zum neuen Belag. Die eingepresste Luft kann immer weniger durch die Hohlraumstruktur des Belags und dessen Oberfläche ausweichen. Dieses Verhalten ist typisch für die dichten und semi-dichten Beläge. Die wahrscheinlichsten Gründe dafür sind bleibende thermomechanische Verformungen der Matrix und Abrasion der Gesteinskörner.

In dieser Hinsicht ist der Belag Wecophone[®] mit einem Grösstkorn von 6 mm erwähnenswert. Obwohl die Anfangslärminderung relativ bescheiden war, hat dieser Belag auf die Dauer seine lärmreduzierende Eigenschaft beibehalten. Parallel dazu haben sich die Texturmerkmale kaum verändert. Der MPD-Wert und das Texturspektrum sind gleich bleibend. Die Erklärungen des Herstellers beziehen sich auf die Qualität der Gesteinkörnung. Es handelt sich um einen Sandstein bestehend aus feinen, sehr harten Quarzkörnern, umgeben von einem Kalkmörtel. Der ungleichmässige Abrieb der zwei Mineralien führt zu einer dauerhaften Mikrorauheit der Splittoberfläche. Der Polierwiderstand PSV liegt über 61 und der Widerstand gegen Zertrümmerung LA unter 16. Dieser Belag ist ein gutes Beispiel einer dauerhaften Oberflächentextur.

Offensichtlich liegt es aber nicht nur an der Qualität der Gesteinkörnung. Gesteine aus demselben Steinbruch wurden für die Herstellung der Mischgüter Turtmann ACMR 4 Famsa und Turtmann SPA 4 Famsa verwendet, mit einem deutlich schlechteren Ergebnis, obwohl die gesamte Verkehrsbelastung beider Objekte ähnlich ist. Möglicherweise liegen die Ursachen in einer unterschiedlichen Steifigkeit der Matrix, denn in Turtmann wurden – im Gegensatz zu Gurmels – Spurrinnen festgestellt. Oder es sind weitere Einflussfaktoren (Anzahl LKW, Klima, Kanalisierung des Verkehrs) die die Spurrinnenbildung beeinflusst haben.

Abb. 14 MPD versus Lärminderung

Lärminderung für Mischverkehr. Durchgehend ausgezogene Linien zeigen die Entwicklung in Richtung dichtere und glattere Oberfläche; gestrichelte Linien zeigen Fälle mit Kornausbruch



Die zweite Tendenz von Schäden ist beginnender Kornausbruch. Dabei nimmt die mittlere Profiltiefe zu. Von dieser Art Veränderung sind vor allem die PA Beläge und diejenigen mit Gummigranulat und Leca-Körner betroffen. Im Laufe der Zeit scheinen sich die Kornausbrüche zu stabilisieren und es folgen Veränderungen analog der ersten Tendenz (Abnahme der Profiltiefe). Ein Beispiel dafür, der Belag ACMR EOS Gummigranulat in Sargans, hat schon im ersten Jahr sowohl 8er-Korn- wie auch Granulat-Ausbruch erlitten. In einem solchen Fall verlaufen nacheinander Kornausbruch, Kriechen und Abrasion, so dass die Lärmzunahme dreierlei Ursachen aufweist. Auch die Belägen Colsoft in Les Evouettes und SPA 8 in Leuggern folgen denselben Schädigungsverlauf. Es werden zwar wenige Kornausbrüche beobachtet, was zu einer geringen Zunahme der mittleren Profiltiefe führt, anschliessend aber folgen beide Beläge dem generellen Trend des Kriechen und Abrasion.

Der MA 8 mit einer 3/6 Abstreuung in Leuggern wurde schon im neuen Zustand mit einer relativ hohen mittleren Profiltiefe konzipiert. Mit einem Sonderfall betreffend Messung 2008, bleibt die Oberflächenstruktur stabil, und so auch die akustischen Eigenschaften.

4.4.2 Gestaltfaktor und Wellenlänge bei Amax

Die weiteren zwei Makrotexturkennwerte – Gestaltfaktor g und Wellenlänge bei maximaler Rauigkeitstiefe $\lambda(A_{\max})$ – sind in der Tab. 5 zusammengefasst. Auf Grund einer nun fünfjährigen Erfahrung ist festzustellen, dass g und $\lambda(A_{\max})$ nur bedingt aussagekräftig sind. Die von Sandberg und Ejsmont^[6] im Jahr 2002 vorgeschlagenen Zielwerte (siehe Tab. 3), können auf Grund der vorliegenden Ergebnisse ohne Anpassungen nicht weiterverfolgt werden. Mögliche Anpassungen werden im Folgenden erläutert.

Der Zielwert $g > 60\%$ ist zu allgemein. Der Gestaltfaktor ist umso geringer, je kleiner das verwendete Grösstkorn ist. Der Mittelwert aller Werte pro Grösstkorn zeigt, dass für 4er Beläge $g = 58\%$ und für 8er Beläge $g = 78\%$ ist. Der bisherige, einheitliche Zielwert berücksichtigt diese grundlegende Abhängigkeit nicht; er führt somit möglicherweise zu irreführenden Beurteilungen. Der Zielwert sollte auf das Grösstkorn abgestimmt werden.

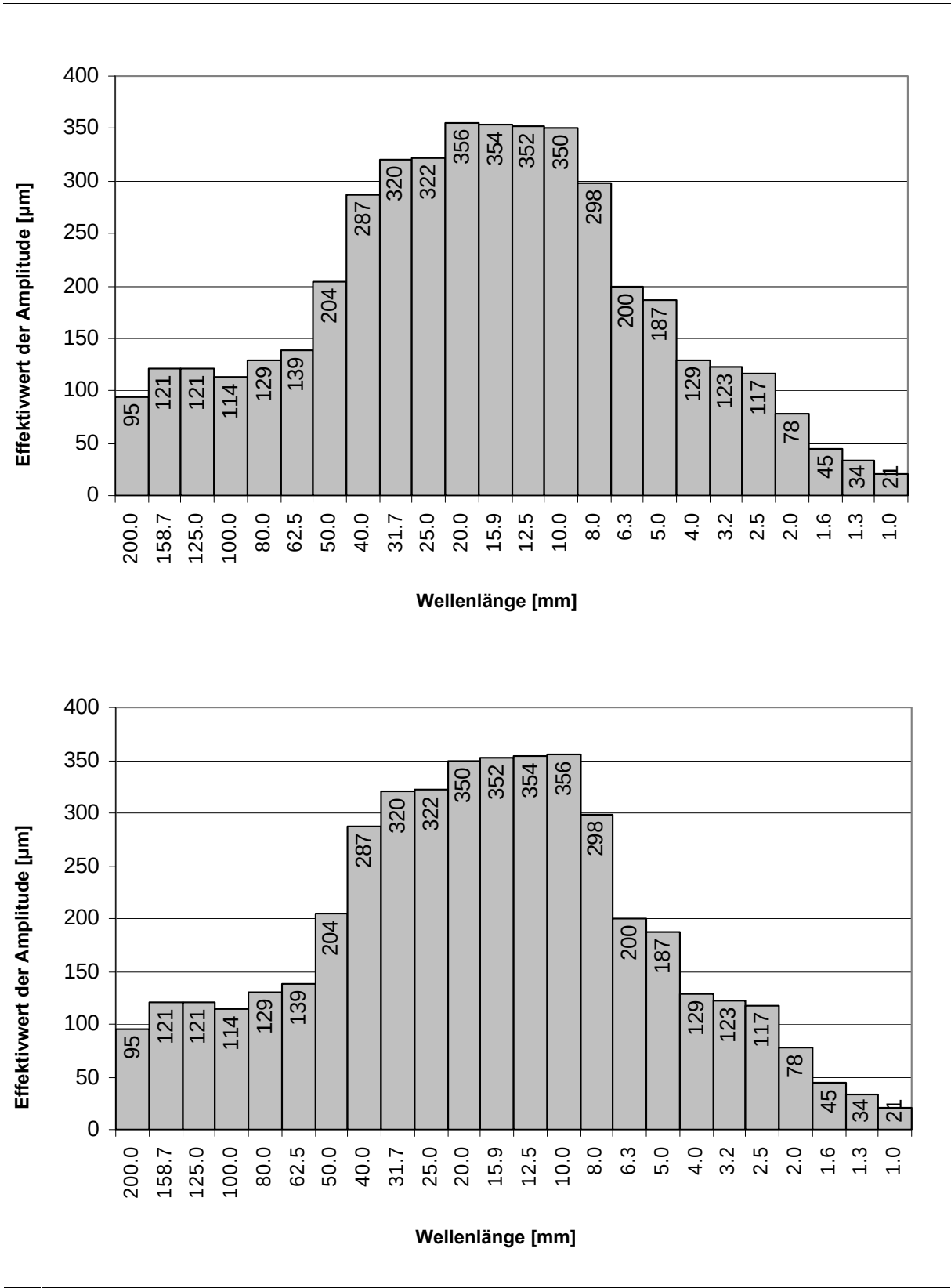
Die Zielvorstellung $\lambda(A_{\max}) \leq 12$ mm berücksichtigt nicht die Situation in denen das Spektrum nur sehr kleine Amplituden-Unterschiede zwischen benachbarten Wellenlängen aufweist. Wenn zum Beispiel (siehe Abb. 15) für $\lambda = 10, 12, 16$ und 20 mm die entsprechende Rauigkeitstiefen $350, 352, 354$ und 356 μm beträgt, ist mit $\lambda(A_{\max}) = 20$ mm die Zielvorstellung nicht erfüllt. Umgekehrt, wenn im selben Beispiel die entsprechende Rauigkeitstiefen $356, 354, 352$ und 350 μm beträgt, ist mit $\lambda(A_{\max}) = 10$ mm die Zielvorstellung erfüllt, und dies obwohl das Spektrum de facto identisch ist. Die Interpretation des Spektrums sollte mehrere Wellenlängen berücksichtigen. Zum Beispiel, könnten Summen von Amplituden A_λ gebildet, mit einerseits $\lambda = \{16, 20, 25, 32, 40\}$ und andererseits $\lambda = \{10, 8, 6, 5, 4\}$, und diese auf einer bestimmten Weise verglichen werden. Auf diese Art könnte die oben beschriebene Verzerrung umgangen werden. Ausserdem besteht die Möglichkeit, die Informationen aus dem Spektrum so auszuwerten, wie es während einer SPERoN Simulation gebräuchlich ist.

Tab. 5 Makrotexturkennwerte – Gestaltfaktor g

Entwicklung der Wellenlänge bei maximaler Rauigkeitstiefe und des Gestaltfaktors zwischen 2004 und 2009. Es wurde auf frühere Richtwerte gemäss Kap. 0 verzichtet. Der Grund dafür liegt in der Beobachtung, dass deren einfachen Definitionen der Vielfalt der Mischgutsorten nicht genügen und irreführende Interpretationen zulassen.

Teststrecke und Mischgutsorte		Wellenlänge bei max. Rauigkeitstiefe [mm]								Gestaltfaktor [%]							
		Herbst 2004	Frühling 2005	Herbst 2005	Herbst 2006	Herbst 2007	Herbst 2008	Herbst 2009		Herbst 2004	Frühling 2005	Herbst 2005	Herbst 2006	Herbst 2007	Herbst 2008	Herbst 2009	
Neue Testbeläge																	
Kreuzlingen	PA 4 auf PA 8	5	12	10	10	8	32	8		56	73	53	59	64	53	57	
Turtmann	SPA 4 Famsa	4	6	~	8	16	4	12		62	68	~	67	41	65	79	
Turtmann	ACMR 4 EOS Gummigr.	3	5	~	10	8	10	16		64	63	~	69	21	48	67	
	ACMR 4 EOS	3	5	~	12	8	12	12		82	67	~	48	67	43	69	
	ACMR 4 Famsa	3	8	~	6	5	20	20		72	54	~	44	50	41	58	
Sargans	ACMR 4 Gasperini	8	10	12	20	50	20	10		53	69	64	69	60	39	28	
	ACMR 8 EOS Gummigr.	10	16	12	20	20	32	12		92	54	79	73	74	60	42	
Zuchwil	ACMR 8 EOS	12	12	12	10	10	20	10		88	88	83	79	81	57	62	
Bestehende Beläge																	
Leuggern	PA 8	10	~	20	10	16	25	25		90	~	85	85	84	86	77	
Leuggern	SPA 8	12	~	12	10	16	20	20		89	~	82	87	78	67	58	
Leuggern	MA 8 2/4	25	~	6	25	20	20	25		85	~	62	35	61	61	37	
	MA 8 3/6	12	~	25	40	16	20	32		45	~	53	59	62	53	65	
Sargans	AC 11	3	20	16	~	16	20	20		85	75	76	~	71	54	73	
Sessa	AC 11 Leca Gasperini	12	12	~	10	10	20	10		82	76	~	69	68	61	31	
Bellinzona	AC 11 Leca Gasperini	12	12	~	32	16	40	25		91	74	~	75	80	71	70	
Gurmels	Wecophone 6 Famsa	8	12	~	10	12	10	12		70	85	~	88	81	79	86	
L. Evouettes	Colsoft 8	12	12	~	10	10	~	16		89	85	~	81	81	~	53	

Abb. 15 Spezialfall flaches Texturspektrum



4.5 SPERoN

4.5.1 Luftströmungswiderstand

Der Luftströmungswiderstand der untersuchten Testbeläge ist in Tab. 6 dargelegt.

Tab. 6 Spezifischer Luftströmungswiderstand

Der Luftströmungswiderstand ist ein SPERoN-Parameter und wird im Zusammenhang mit dem airpumping-Geräusch einberechnet.

Teststrecke und Mischgutsorte	Luftströmungswiderstand [Pa*s/m]
Kreuzlingen PA 4+ 8	8 577
Sargans ACMR 4 Ga	21 633
Sargans ACMR 8 EOS Gu	8 531
Sargans AC 11	29 156
Leuggern PA 8	1 833
Leuggern SPA 8	7 196
Sessa AC 11 Leca	25 790
Gurmels Wecophone 6	31 918

In der Regel sind Messungen des Strömungswiderstandes sehr empfindlich gegenüber Veränderungen der Belageigenschaften. In Abb. 16 werden der Luftströmungswiderstand und die Lärmreduktion (PW-Verkehr) einander gegenübergestellt. Erwartungsgemäss zeigen die leisesten Beläge den geringsten Strömungswiderstand; und umgekehrt. Die tiefen Strömungswiderstände der Beläge PA und SPA in Leuggern sind auf deren hohen Hohlraumgehalt (24 % und 13 %) sowie auf die geringe Verschmutzung (die signifikante Fahrgeschwindigkeit beträgt 80 km/h, sodass eine Selbstreinigung stattfindet) zurückzuführen.

Der mittlere Strömungswiderstand des PA 4+8 in Kreuzlingen steht auch mit seinem Hohlraumgehalt in Verbindung (27 %) aber die Lärmreduktion leidet stark unter dem schlechten Oberflächenzustand (Kornausbrüche).

Der Belag ACMR 8 EOS Gummigranulat in Sargans, mit einem Strömungswiderstand von 8531 Pa*s/m für eine Lärminderung von nur -0,3 dBA, folgt der allgemeinen Tendenz nicht. Möglicherweise haben in diesem Fall die Kornausbrüche die Messung verfälscht weil die Luft in der Kammer zwischen der Dichtung und der Belagsoberfläche ausweichen konnte.

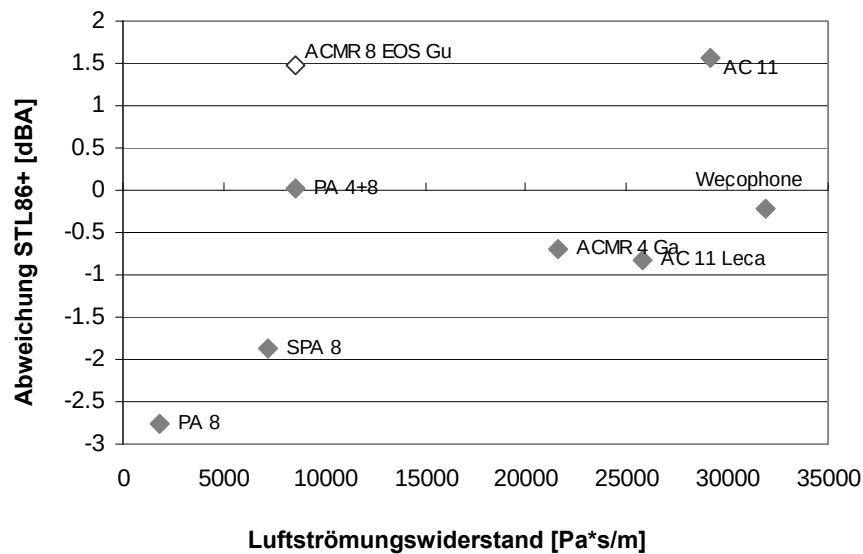
Die guten Lärmeigenschaften des ACMR 4 Gasperini in Sargans widerspiegeln sich im Strömungswiderstand. Dieses Ergebnis ist insofern konform, als der Hohlraumgehalt 16 % beträgt.

Der AC 11 Belag in Sessa mit porösem Leca besitzt einen etwas tieferen Strömungswiderstand als die beiden anderen dichten Belägen AC 11 in Sargans und Wecophone in Gurmels.

Um die Werte des Luftströmungswiderstandes zu relativieren, wurde auf einer geschliffenen Granitplatte gemessen; der Wert betrug 41000 Pa*s/m. Dieser Wert dürfte als oberster messbarer Wert betrachtet werden.

Abb. 16 Lärm versus Luftströmungswiderstand

Modellabweichung bei 100 % PW-Verkehr in Abhängigkeit des Luftströmungswiderstandes.



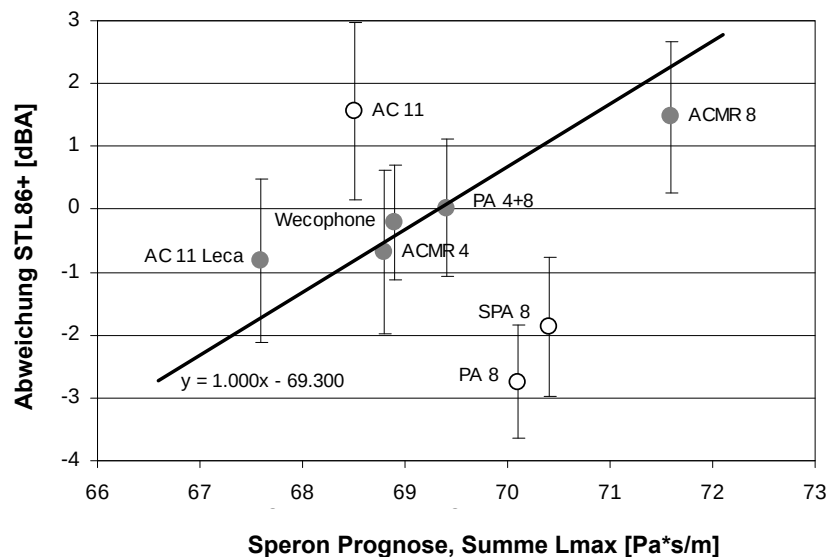
4.5.2 SPERoN Prognose

Aufgrund der Verkehrsmenge und der Verkehrsgeschwindigkeit wird angenommen, dass die Hohlräume der Beläge PA 8 und SPA 8 in Leuggern wenig verstopft sind. Um diese Hohlräume in der Schallausbreitung zu berücksichtigen, wurde dort das Modell mit einem frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrad vervollständigt.

Von den 8 berechneten SPERoN Prognosen können 5 als plausibel eingeschätzt werden. Für diese 5 ist in der Abb. 17 zwischen den SPB-Messungen und der Prognose eine korrekte relative Übereinstimmung zu beobachten, vorausgesetzt die Standard-abweichungen der Lärmmessungen werden berücksichtigt. Bei den drei weiteren Messstellen sind zwischen den Modell- und den Messergebnissen grössere Abweichungen entstanden, deren Ursachen nicht geklärt werden konnten.

Abb. 17 Lärm versus SPERoN Prognose

Modellabweichung bei 100 % PW-Verkehr in Abhängigkeit der SPERoN Prognose. Die Gerade durch die fünf plausiblen Prognosen entspricht der bestmöglichen Ausgleichsgerade mit Steigung = 1.



5 Folgerungen

5.1 Akustische Erkenntnisse

Bei den dichten und semidichten Belägen bestätigen die 2009 durchgeführten Messungen die Erkenntnisse aus den Vorjahren. Die meisten Beläge liegen nach 5 Jahren im Bereich der minimal geforderten Abweichung für lärmarme Beläge.

Die akustisch günstigsten Beläge sind weiterhin die Beläge mit einem 4er- bzw. 6er-Grösstkorn, gefolgt von jenen mit einem 8er-Grösstkorn.

Die akustische Belagsgüte nahm 2009 weiter ab. Der asymptotische Verlauf des akustischen Alterungsverhaltens bestätigt sich. Massgebend ist nicht das Belagsalter, sondern die Verkehrsbelastung. Harte Zuschlagstoffe (EOS, Famsa) haben einen günstigen Einfluss auf das Alterungsverhalten, weiche Zuschlagstoffe (Gummi) nicht.

Die CPX-Messungen 2009 zeigen, wie jene des Vorjahres, eine grössere Homogenität der feinkörnigen Beläge im Vergleich zu grobkörnigeren. Deutlich erkennbar sind auch die akustische Alterung seit 2008, sowie Sondereinflüsse (z. B. Unebenheiten, Belagsflicke, Teilersatz Belag).

Bei den PA-Belägen ergaben die Messungen 2009 ebenfalls eine weitere Abnahme der akustischen Belagsgüte gegenüber dem Vorjahr. Der PA-Belag in Kreuzlingen (4er-Deckschicht) hat seine überlegenen akustischen Anfangswerte eingebüsst und verhält sich seit 2008 gleich wie der akustisch günstigste dichte/semidichte 4er-Belag.

Die beiden akustischen Messverfahren SPB und CPX ergänzen sich in idealer Weise. Währenddem das SPB-Verfahren präzise Werte für einen diskreten Fahrbahnquerschnitt liefert und die Grundlage für den Vergleich mit dem Emissions-Modell STL86+ bildet, erlaubt die CPX-Methode, akustische Belagskennwerte über die ganze Länge einer Strecke zu erheben und deren Homogenität zu beurteilen.

5.2 Belagstechnische Kennwerte versus Akustik

Die belagstechnischen Parameter verändern sich mit den Jahren. Der Einfluss dieser Veränderungen (z. B. Kornausbruch, Verstopfung der Hohlräume, Änderungen der Oberflächentextur oder Oberflächengestalt) auf die Akustik ist im Einzelnen schwierig zu bestimmen. Die Effekte überlagern sich und können kontinuierliche oder sprunghafte Auswirkungen auf die gemessenen Lärmpegel und Frequenzverläufe haben.

Aussagen über die akustische Belagsgüte aufgrund von einzelnen Texturkennwerten sind besonders bei gebrauchten Belägen unsicher. Die aus früheren Arbeiten^[6] übernommenen Richtwerte wie Gestaltfaktor $g > 60\%$ und Wellenlänge mit maximaler Amplitude $< 12,5\text{ mm}$ haben sich nicht bewährt.

Aufgrund der Erkenntnisse empfiehlt es sich, spezifische Richtwerte für jede Belagssorte zu überprüfen.

Die Lärminderung der dichten und semi-dichten Beläge wird vor allem durch die abnehmende Profiltiefe beeinträchtigt. Das Phänomen ist in Abb. 14 erkennbar und ist auf eine thermomechanische Umverteilung der Matrix, einhergehend mit einer Abrasion des Splittes, zurückzuführen.

Die Kornausbrüche erhöhen den MPD-Wert und reduzieren dennoch die Lärminderung. Nach der Schädigung der Belagsoberfläche durch Kornausbrüche verläuft die Entwicklung der Lärminderung parallel zu denjenigen ohne Kornausbrüche.

Betrachtet man in der Beurteilung der Dauerhaftigkeit die effektive Belastung durch Verkehr anstelle des Belagsalters, so liegen nach 10 Millionen Überfahrten der Twinlayer PA 4+8 in Kreuzlingen und der Wecophone 6 in Gurmels an der Spitze. Sie sind deutlich leiser als der langfristige Zielwert von -1 dBA, wie er im Forschungsprojekt für lärmarme Beläge innerorts definiert ist.

Ein Vergleich der SPERoN-Prognosewerte mit den SPB-Messresultaten zeigt für 5 von 8 Belägen eine gute Übereinstimmung. Die heute zur Verfügung stehenden Ergebnisse berücksichtigen teilweise geschätzte Einflussgrössen (z. B. Absorption, mechanische Impedanz). Gelingt es, in der geplanten weiteren Entwicklung des Modells die Berücksichtigung von gemessenen Einflussgrössen einzubinden, könnten die SPERoN-Prognosen die Entwicklung und Optimierung von lärmarmen Belägen im Laborbereich massiv unterstützen.

5.3 Empfehlungen

Aus den gewonnenen Erkenntnissen behalten für die Wahl der Mischgutsorte leiser Beläge für den Innerortsbereich die Empfehlungen des Schlussberichtes 2007 weiterhin ihre Gültigkeit:

- **Normierte Lösung:**
ACMR 4 oder ACMR 8 gemäss SN 640 431-1b-NA
mit einem Hohlraumgehalt von 6...10 Vol.-%.
- **Nicht normierte Lösung:**
ACMR 4 oder ACMR 8
mit einem erhöhten Hohlraumgehalt von 10 ... 14 Vol.-%.

Anhang

A1 CPX-Verlaufsdigramme

Abb. 18 Kreuzlingen

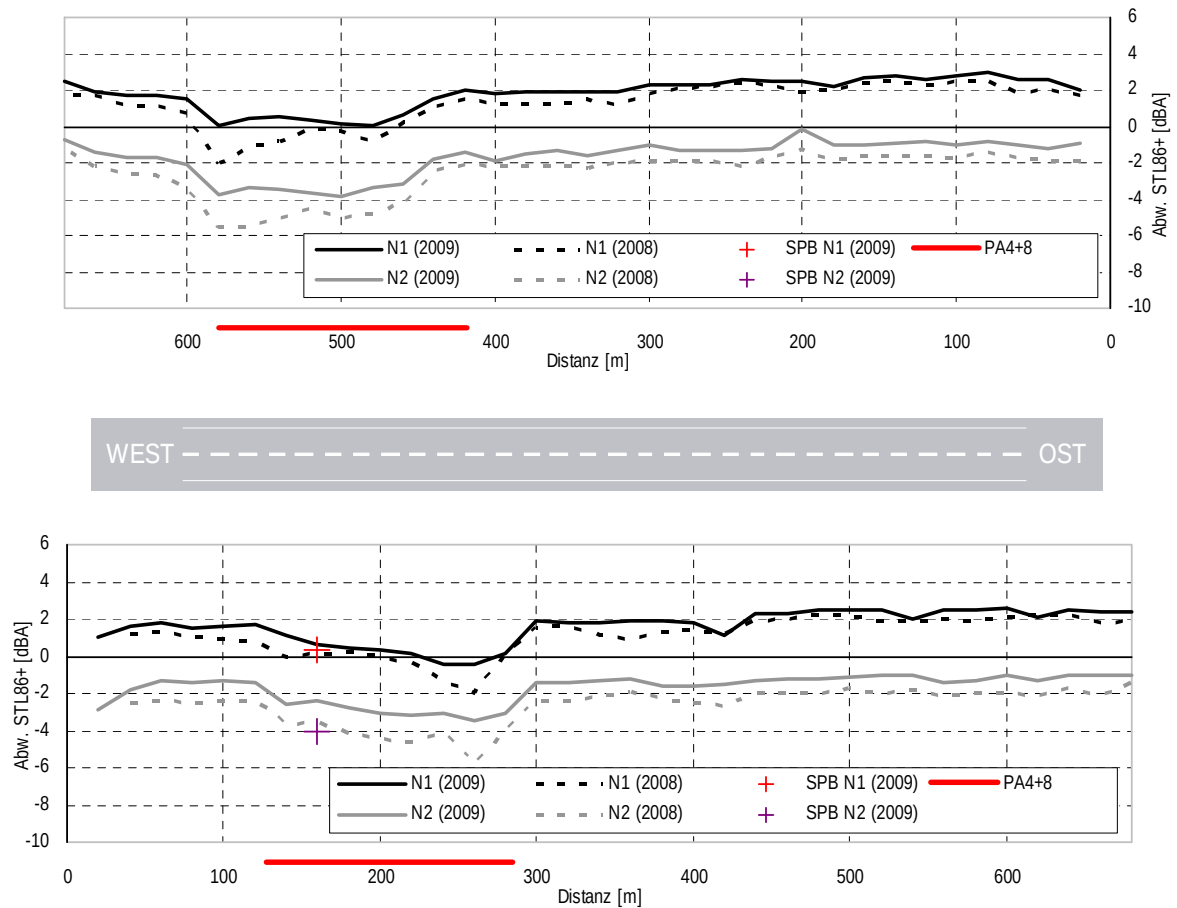


Abb. 19 Turtmann

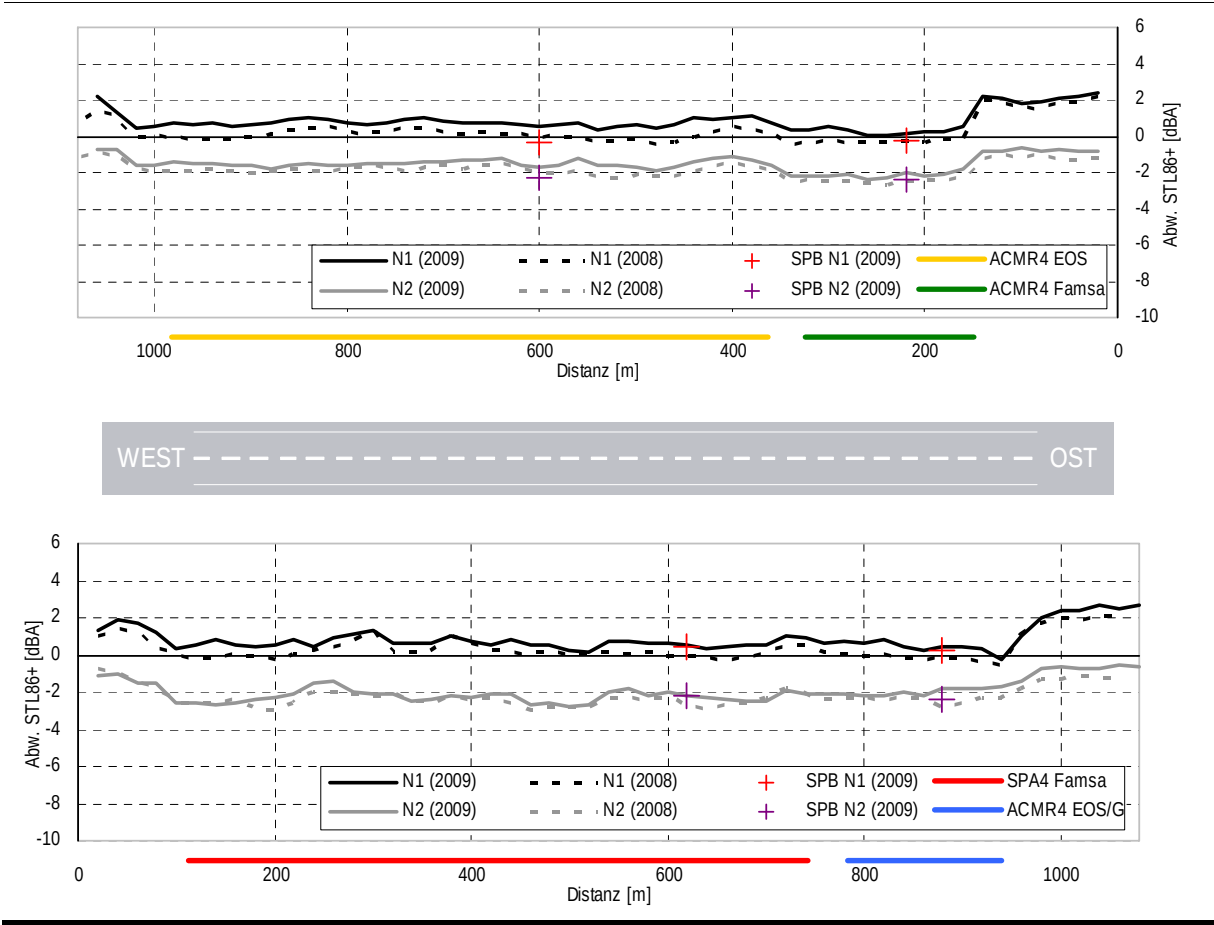


Abb. 20 Sargans

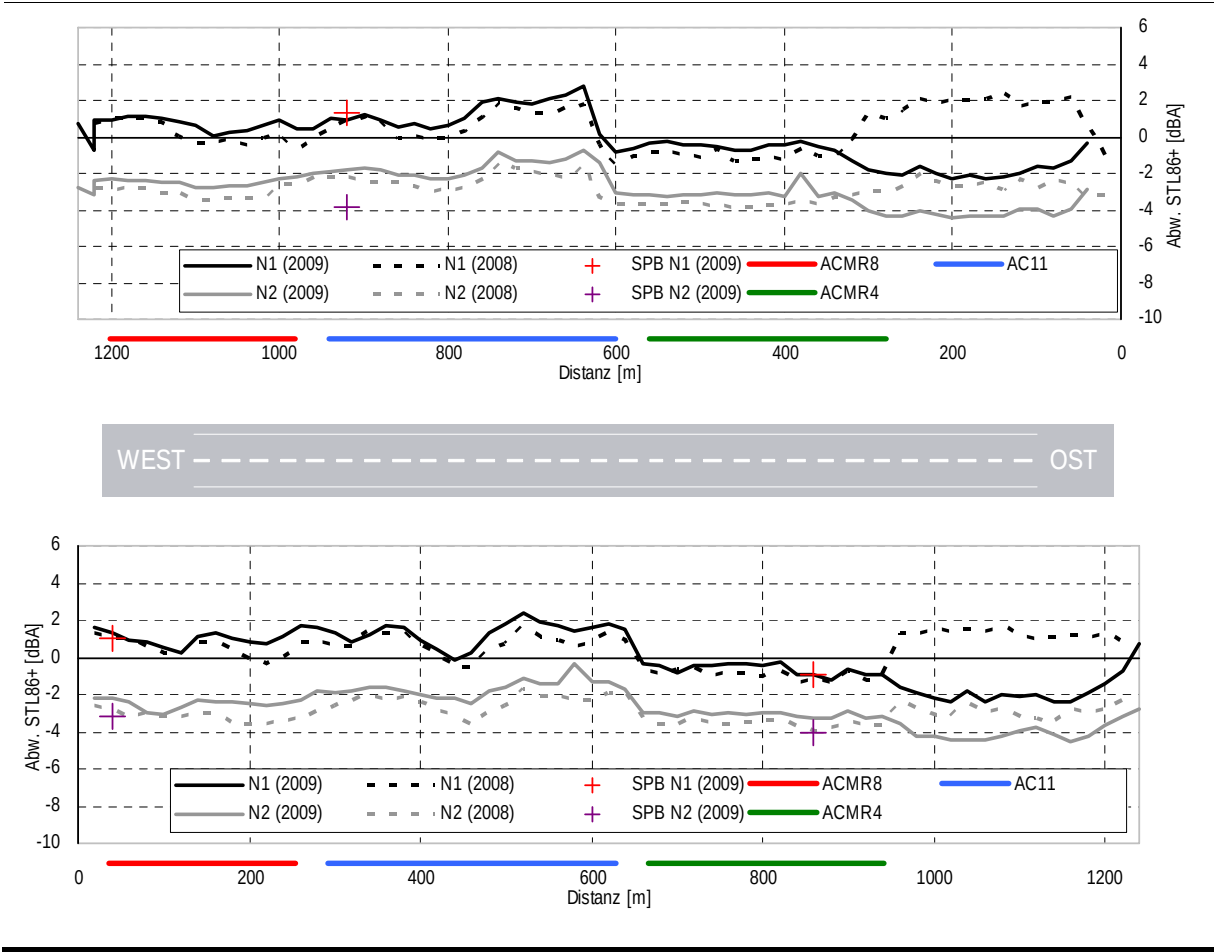


Abb. 21 Zuchwil

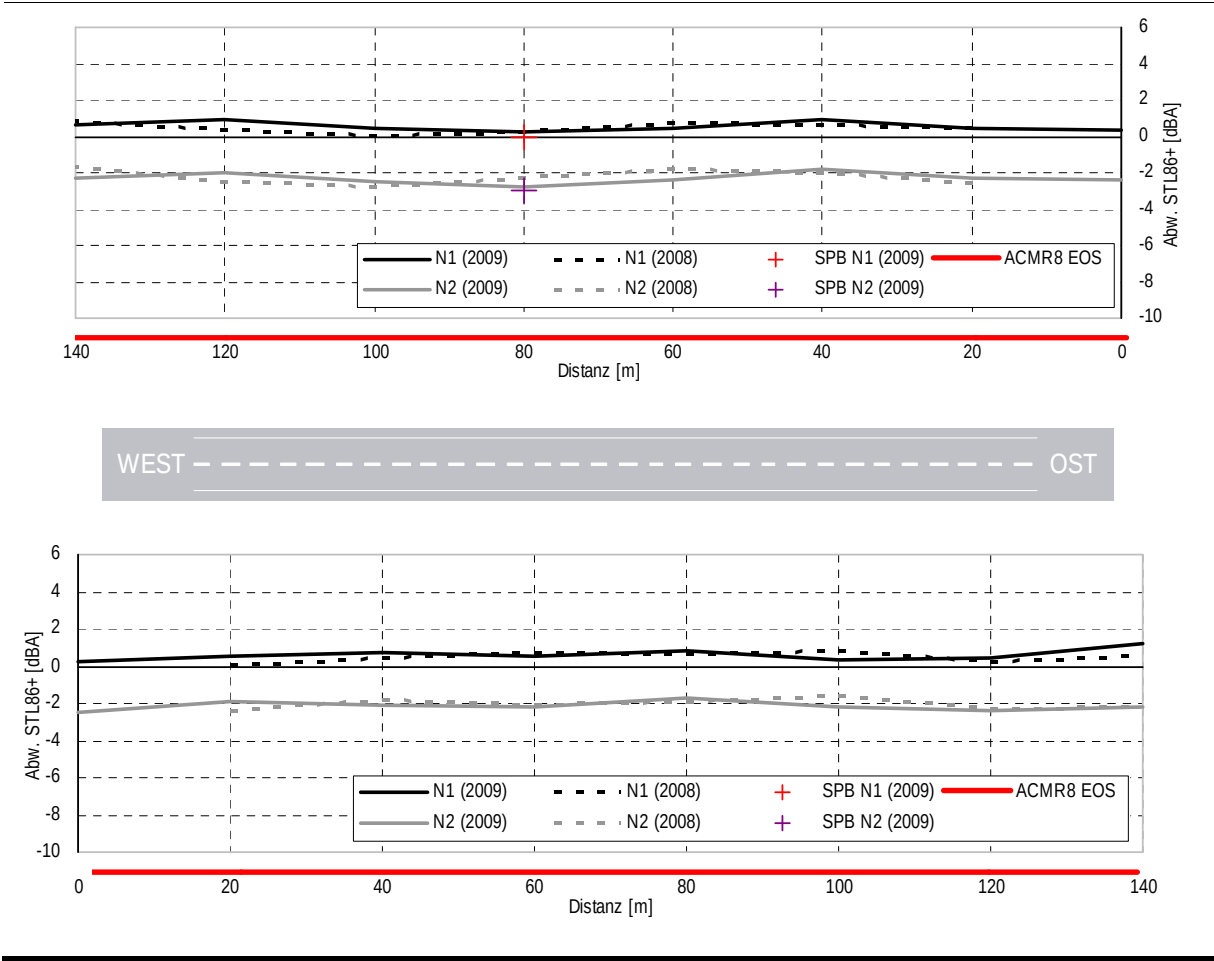


Abb. 22 Leuggern

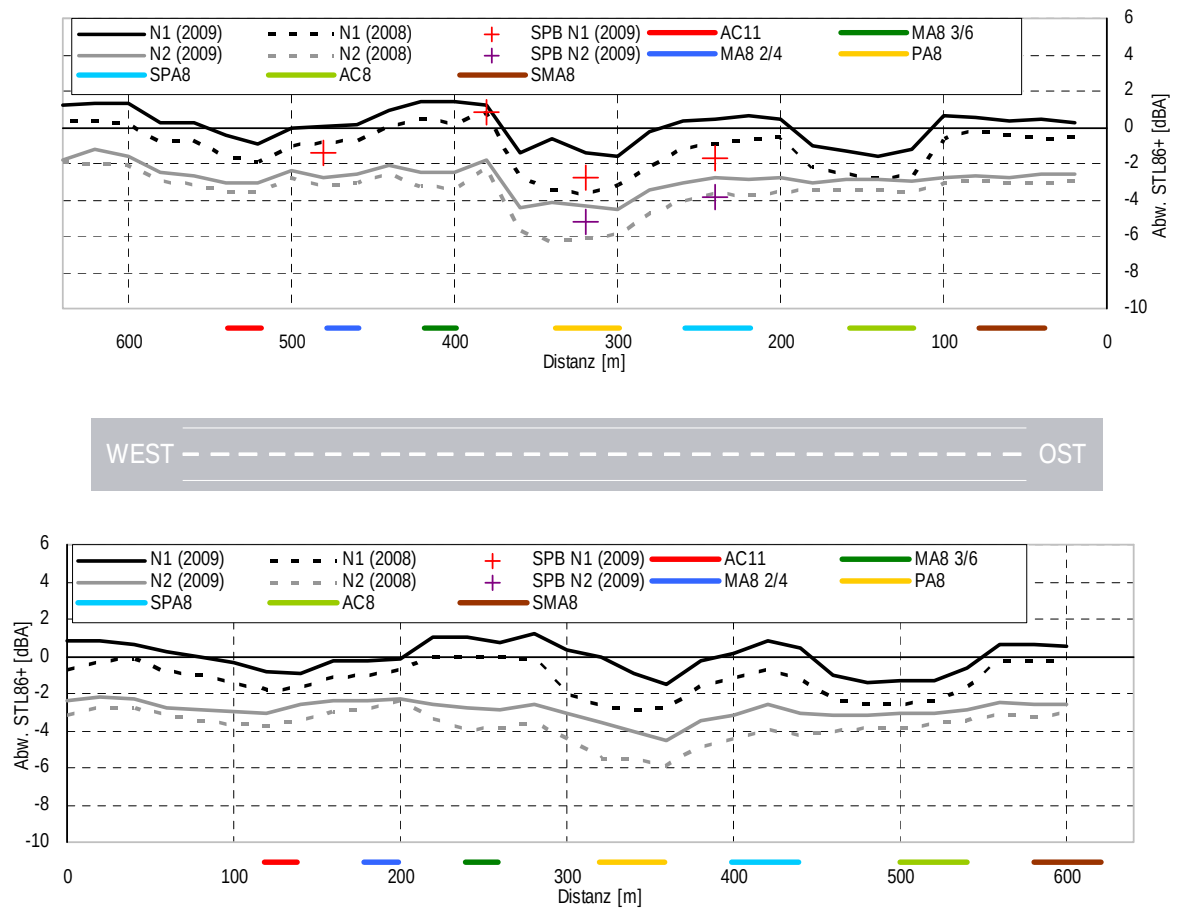


Abb. 23 Sessa

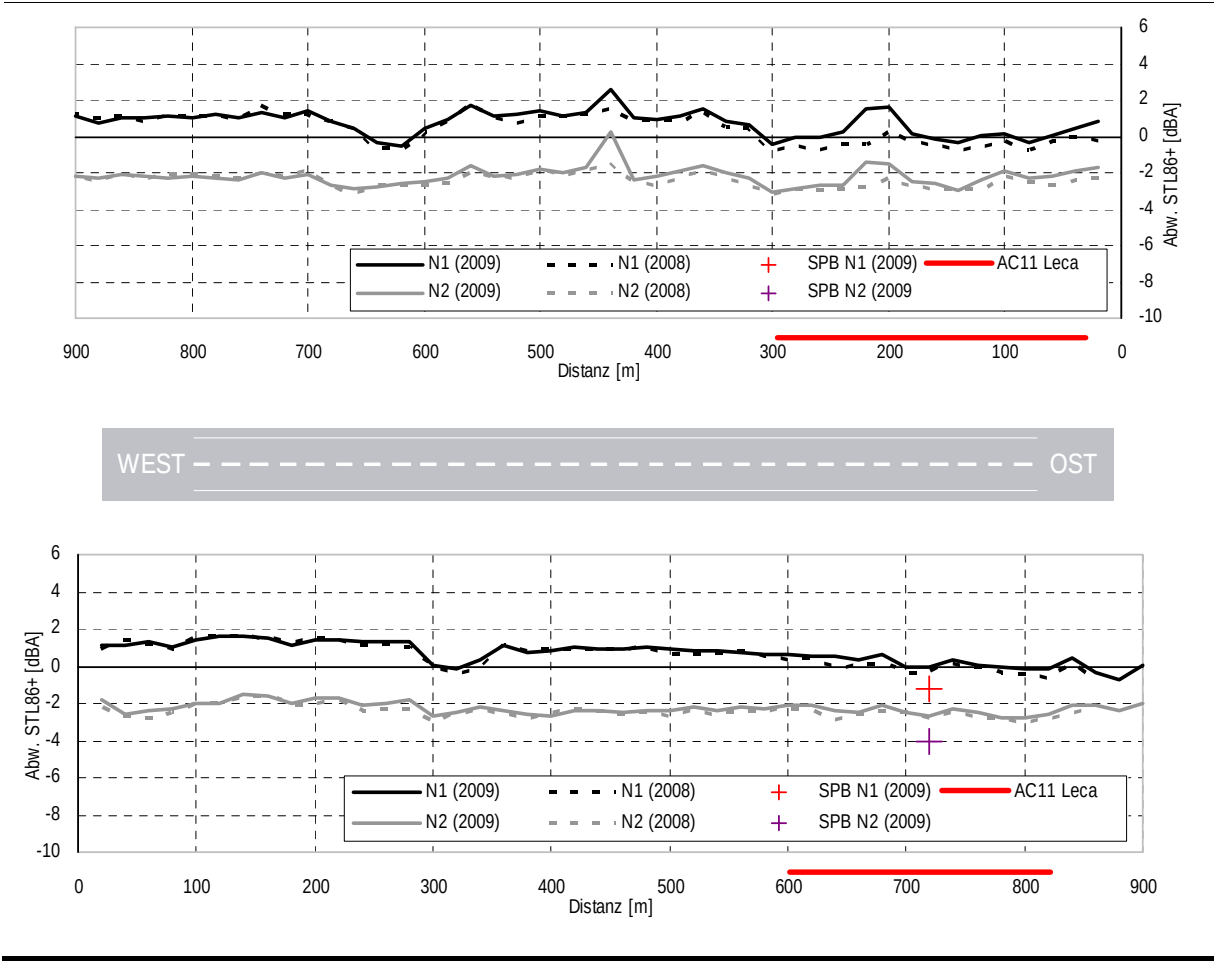


Abb. 24 Bellinzona

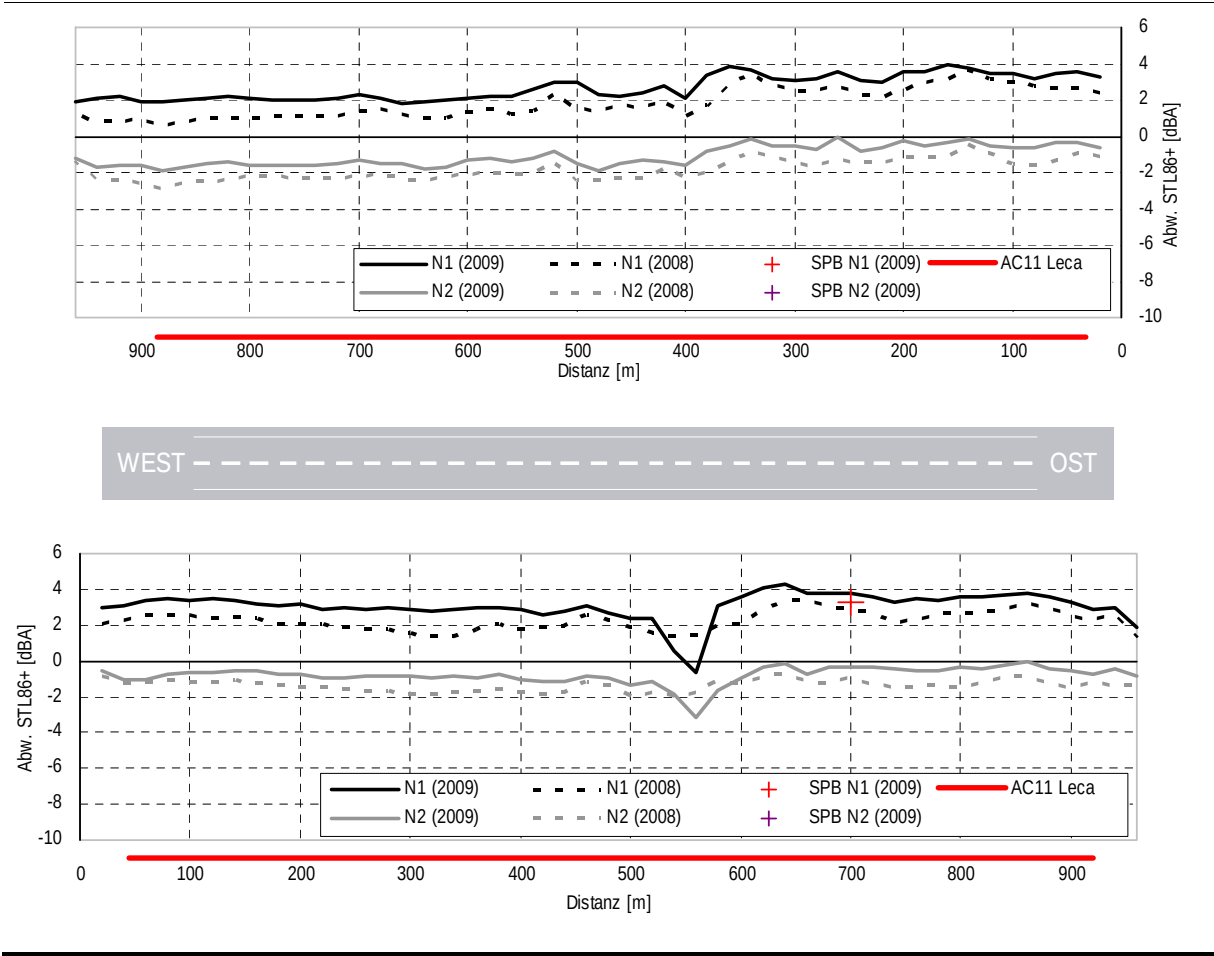


Abb. 25 Grossgurmels

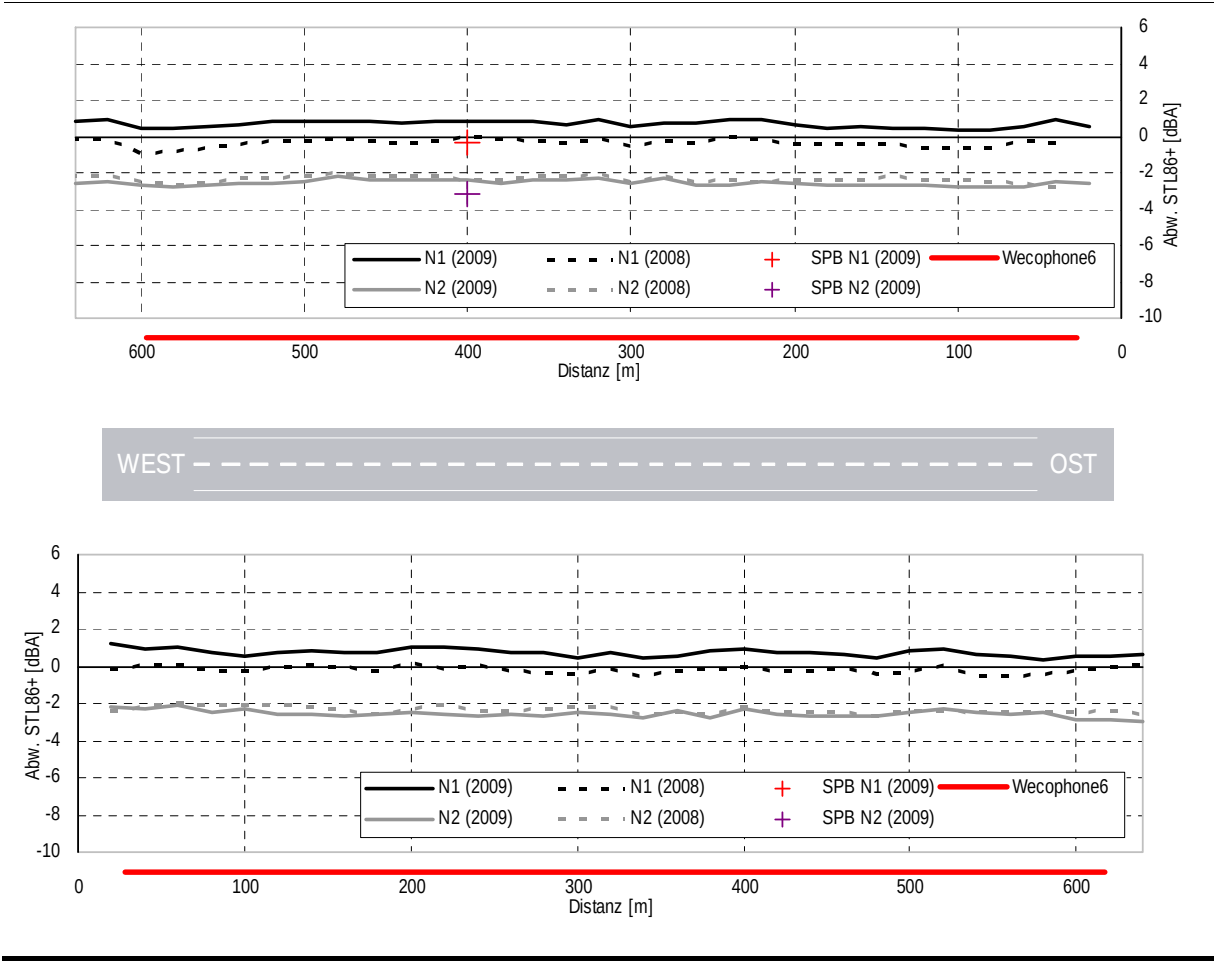
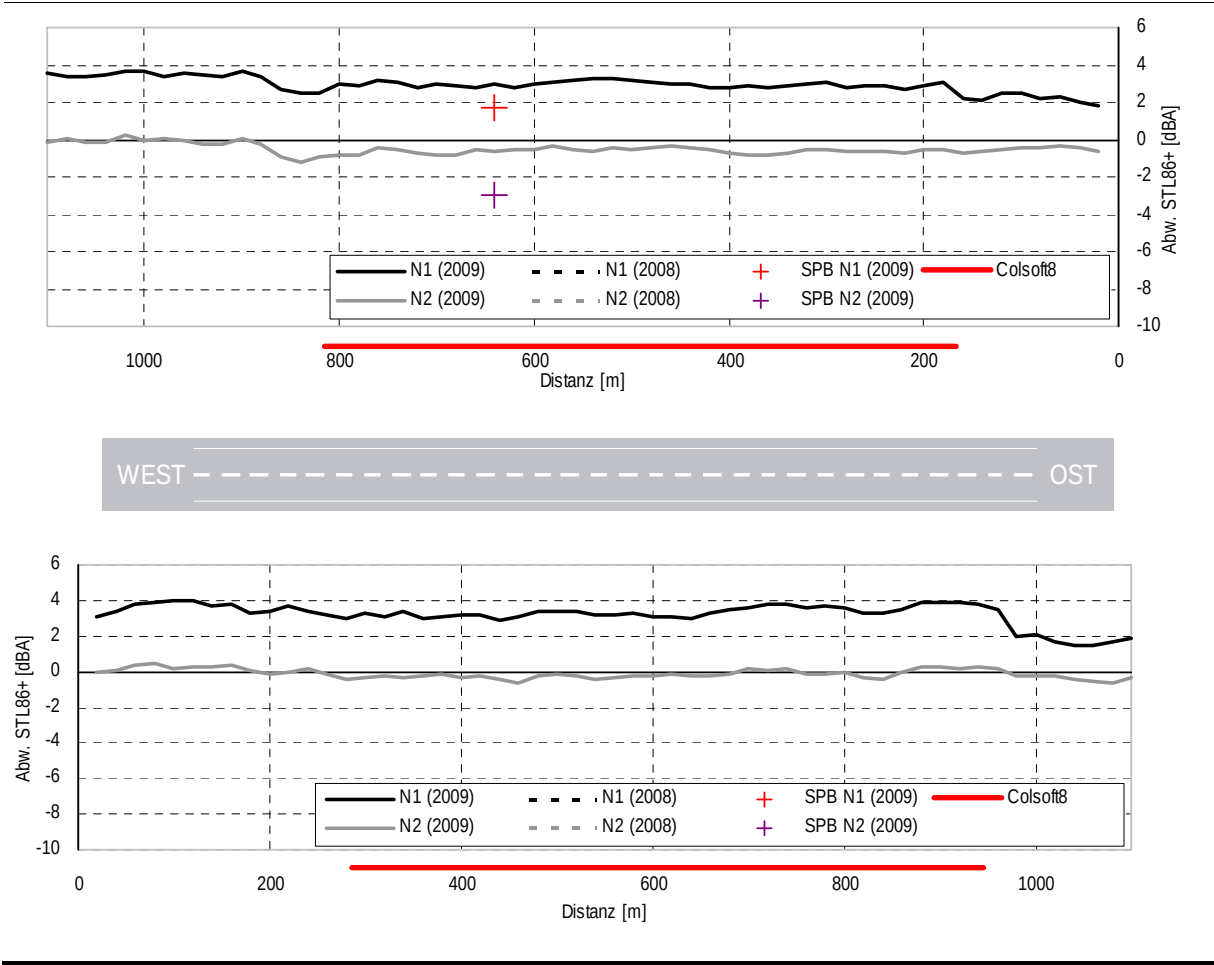


Abb. 26 Les Evouettes



A2 Situationsplan, Textur- und Wellenlängenspektren, Frequenzspektren Personenwagen, Belagsfotos

Abb. 27 Kreuzlingen TG / PA 4+8

Situationsplan der Pilotstrecke

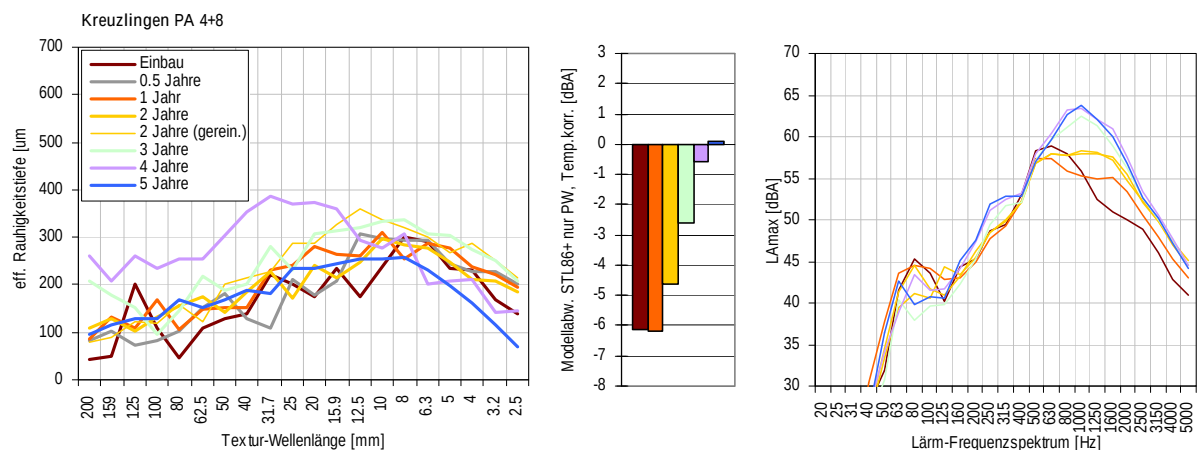


Einbaudatum
August 2004

Durchschnittlicher täglicher Verkehr
(DTV SN 640 005a)
11500

Koordinaten (Swisstopo)
X = 731385
Y = 278521

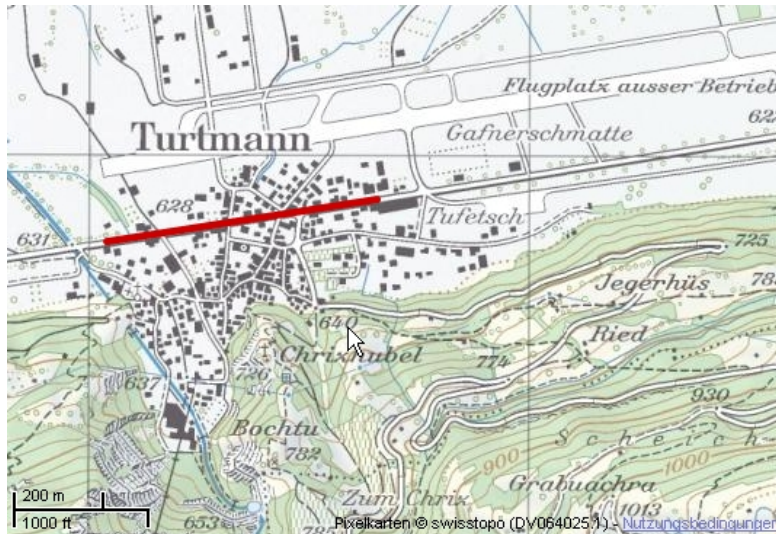
Lärmreduktion und Lärm-Frequenzspektrum in Abhängigkeit des Belagsalters



PA 4 (September 2009)

Abb. 28 Turtmann VS / SPA 4 Famsa

Situationsplan der Pilotstrecke



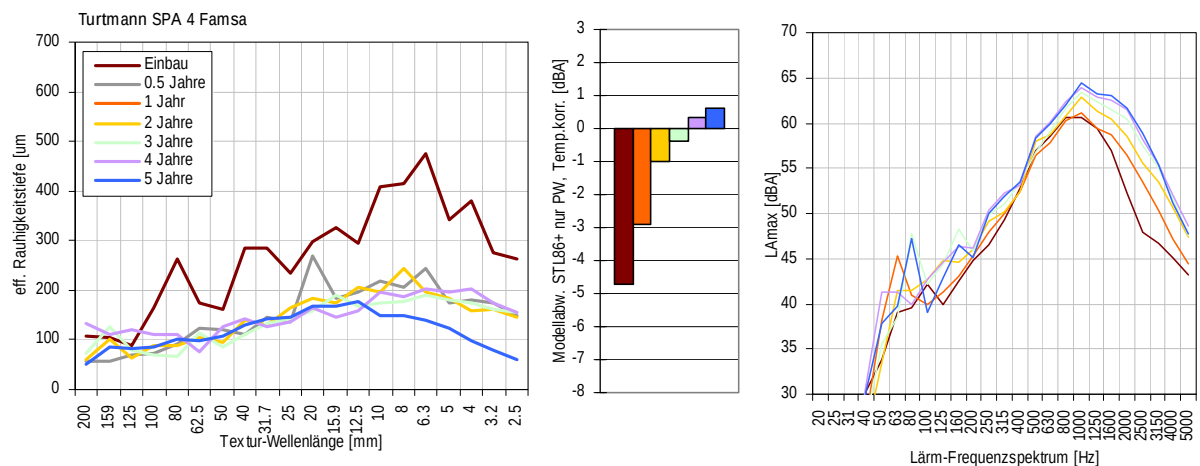
Einbaudatum
September 2004

Durchschnittlicher täglicher Verkehr
(DTV SN 640 005a)
14500

Koordinaten (Swisstopo)
X = 620030
Y = 127778

Fahrbahn
Richtung Brig

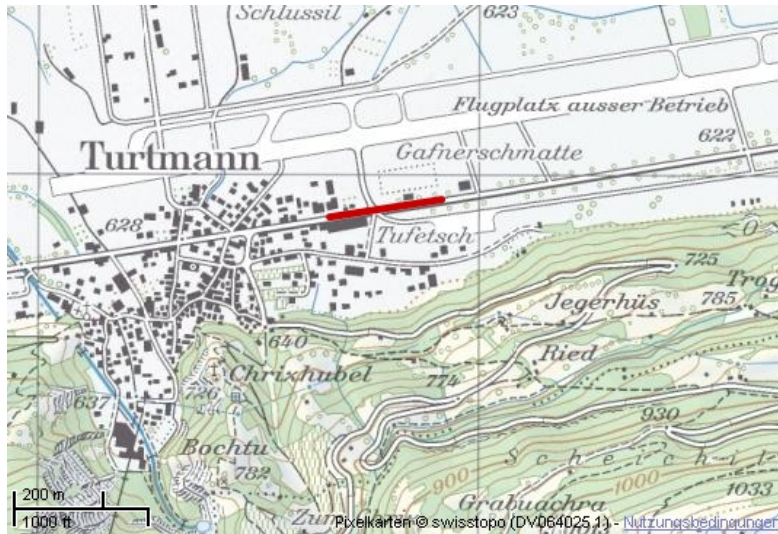
Lärmreduktion und Lärm-Frequenzspektrum in Abhängigkeit des Belagsalters



SPA 4 Famsa (September 2009)

Abb. 29 Turtmann VS / AC MR4 EOS Gummigranulat

Situationsplan der Pilotstrecke



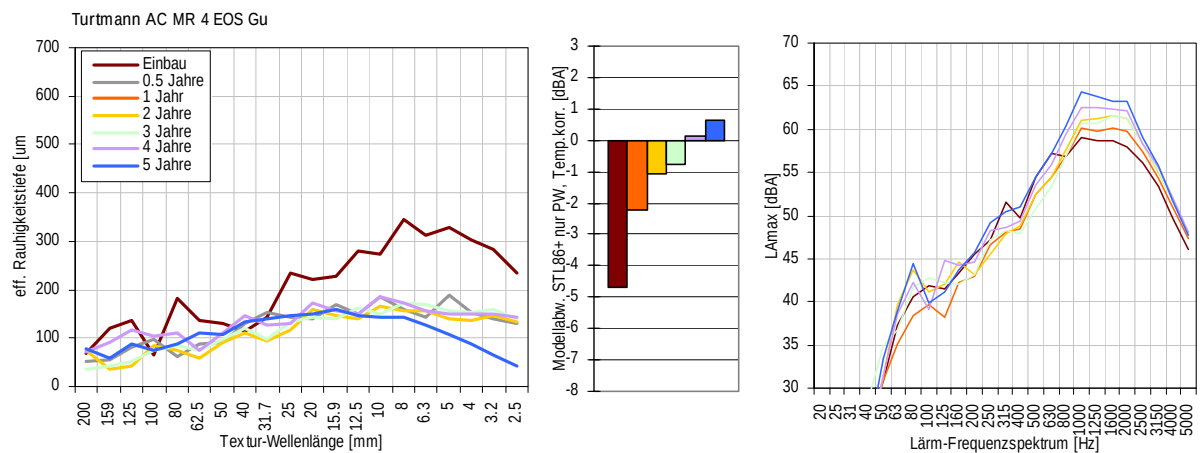
Einbaudatum
September 2004

Durchschnittlicher täglicher Verkehr
(DTV SN 640 005a)
14500

Koordinaten (Swisstopo)
X = 620650
Y = 127903

Fahrbahn
Richtung Brig

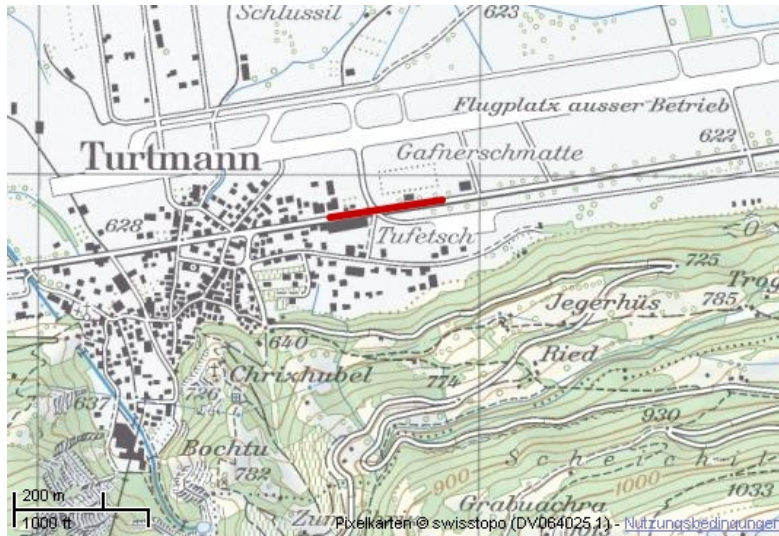
Texturspektrum, Lärmreduktion und Lärm-Frequenzspektrum in Abhängigkeit des Belagsalters



AC MR4 EOS Gummigranulat
(September 2009)

Abb. 30 Turtmann VS / AC MR4 EOS

Situationsplan der Pilotstrecke



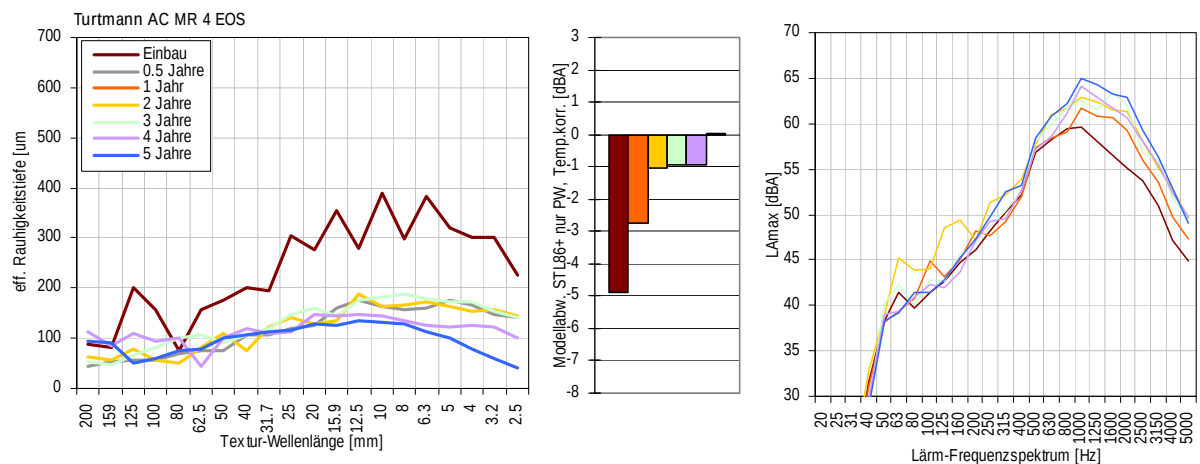
Einbaudatum
September 2004

Durchschnittlicher täglicher Verkehr
(DTV SN 640 005a)
14500

Koordinaten (Swisstopo)
X = 620907
Y = 127935

Fahrbahn
Richtung Sion

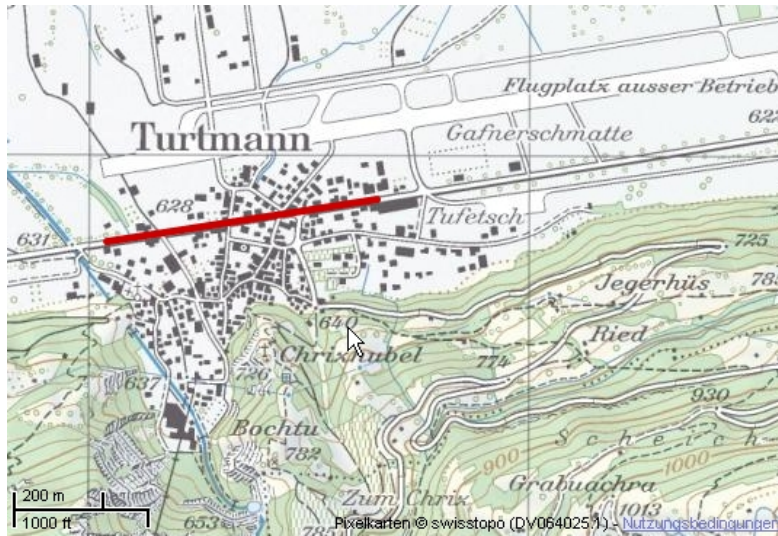
Texturspektrum, Lärmreduktion und Lärm-Frequenzspektrum in Abhängigkeit des Belagsalters



AC MR4 EOS (September 2009)

Abb. 31 Turtmann VS / AC MR4 Famsa

Situationsplan der Pilotstrecke



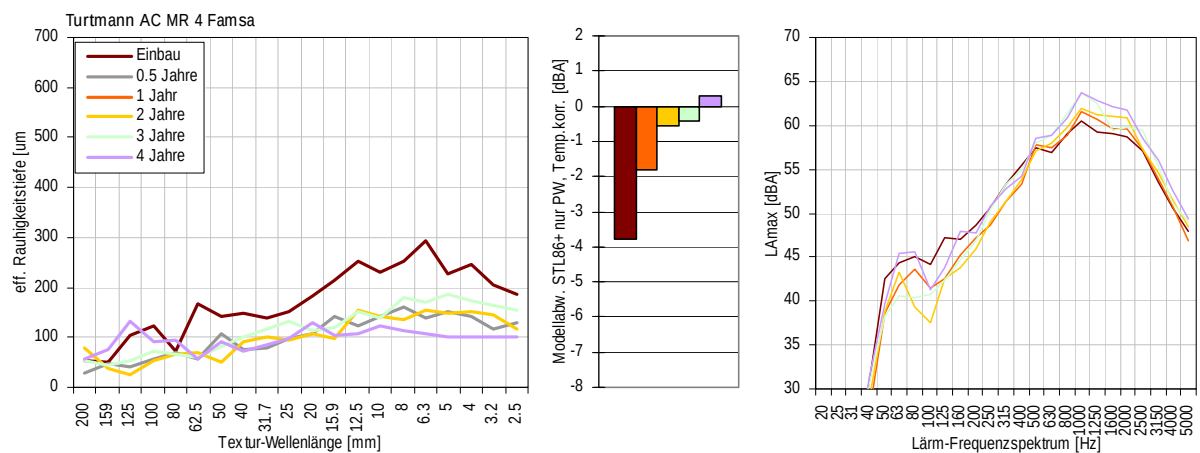
Einbaudatum
September 2004

Durchschnittlicher täglicher Verkehr
(DTV SN 640 005a)
14500

Koordinaten (Swisstopo)
X = 620650
Y = 127872

Fahrbahn
Richtung Sion

Texturspektrum, Lärmreduktion und Lärm-Frequenzspektrum in Abhängigkeit des Belagsalters



AC MR4 Famsa (September 2009)

Abb. 32 Sargans SG / AC MR4 Gasperini

Situationsplan der Pilotstrecke



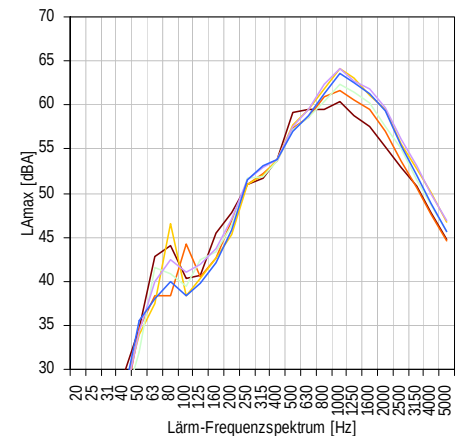
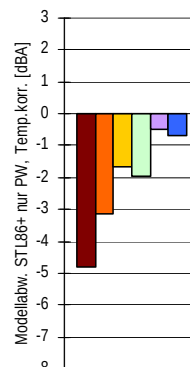
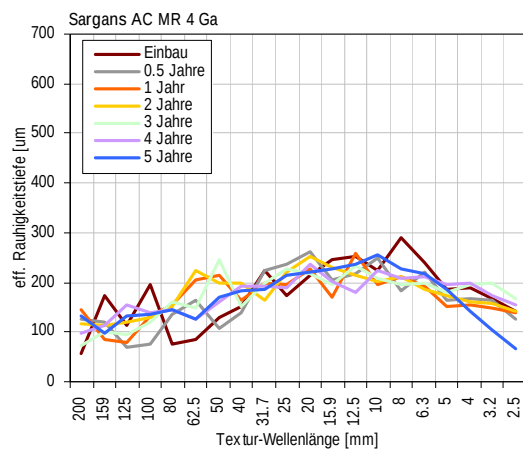
Einbaudatum
September 2004

Durchschnittlicher täglicher Verkehr
(DTV SN 640 005a)
6170

Koordinaten (Swisstopo)
X = 741490
Y = 212890

Fahrbahn
Richtung Sargans

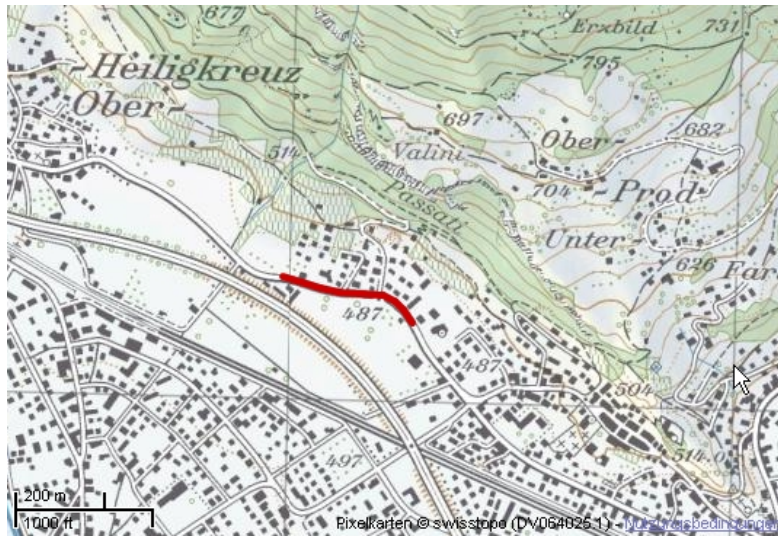
Texturspektrum, Lärmreduktion und Lärm-Frequenzspektrum in Abhängigkeit des Belagsalters



AC MR4 Gasperini (September 2009)

Abb. 33 Sargans SG / AC MR8 EOS Gummigranulat

Situationsplan der Pilotstrecke



Texturspektrum, Lärmreduktion und Lärm-Frequenzspektrum in Abhängigkeit des Belagsalters

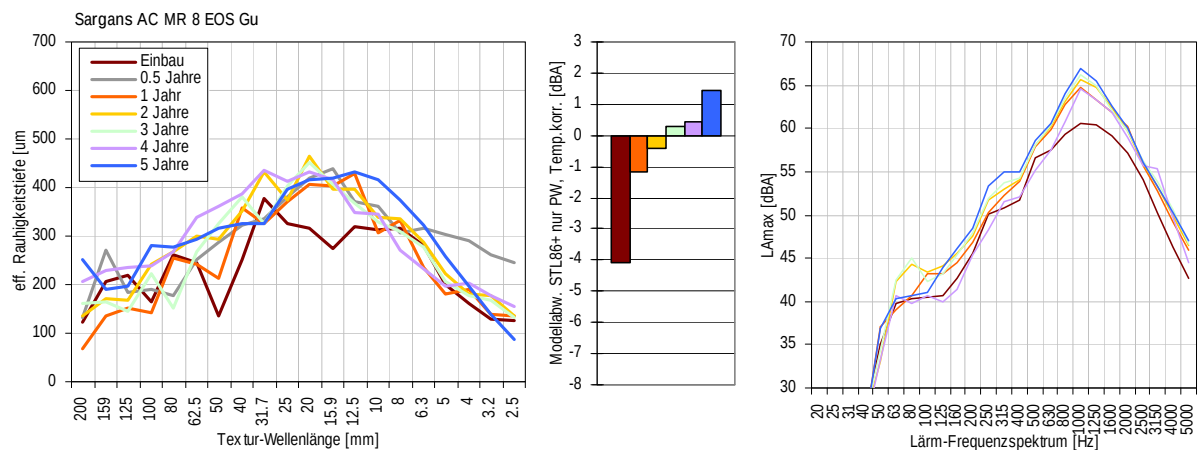


Abb. 34 Zuchwil SO / AC MR8 EOS

Situationsplan der Pilotstrecke

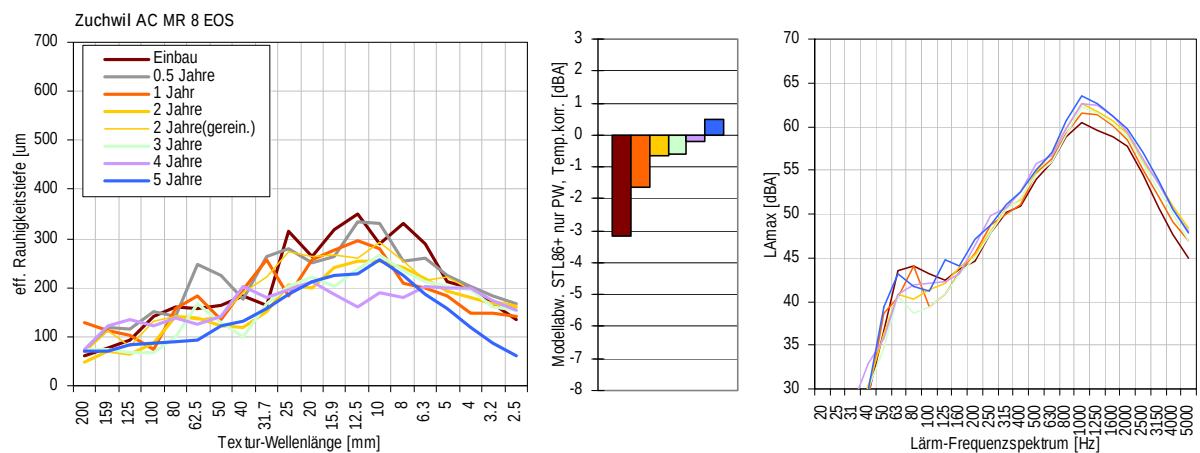


Einbaudatum
August 2004

Durchschnittlicher täglicher Verkehr
(DTV SN 640 005a)
8924

Koordinaten (Swisstopo)
X = 609091
Y = 228020

Texturspektrum, Lärmreduktion und Lärm-Frequenzspektrum in Abhängigkeit des Belagsalters



AC MR8 EOS (August 2009)

Abb. 35 Leuggern AG / PA 8

Situationsplan der Pilotstrecke



Einbaudatum
Mai 2004

Durchschnittlicher täglicher Verkehr
(DTV SN 640 005a)
2000

Koordinaten (Swisstopo)
X = 658979
Y = 269722

Texturspektrum, Lärmreduktion und Lärm-Frequenzspektrum in Abhängigkeit des Belagsalters

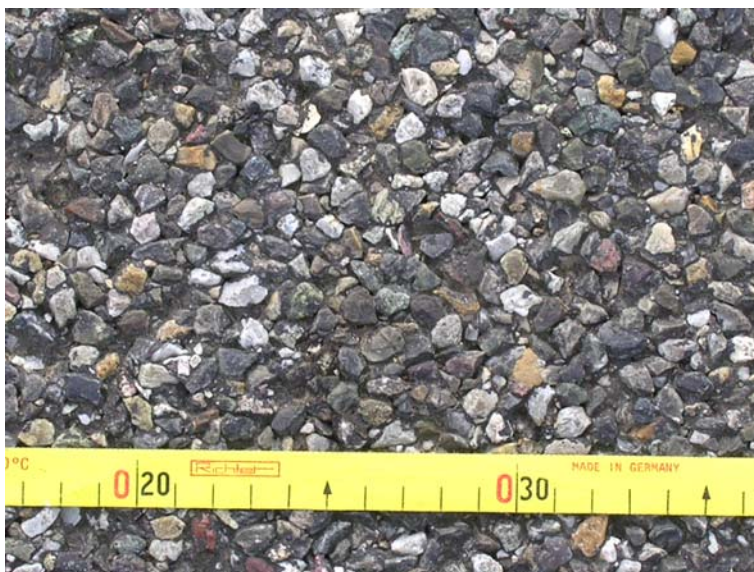
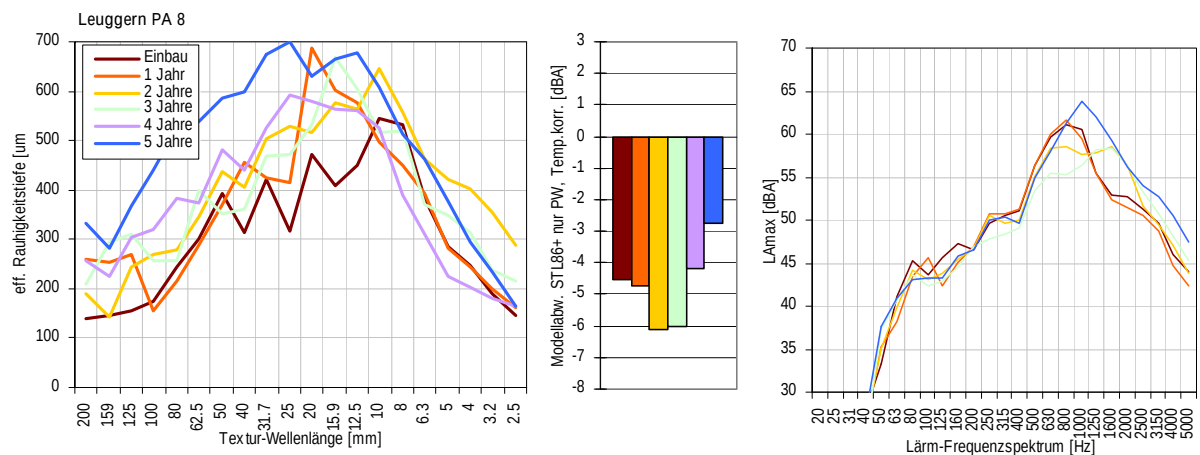


Foto PA 8 (September 2009)

Abb. 36 Leuggern AG / SPA 8

Situationsplan der Pilotstrecke



Einbaudatum
Mai 2004

Durchschnittlicher täglicher Verkehr
(DTV SN 640 005a)
2000

Koordinaten (Swisstopo)
X = 659063
Y = 269692

Texturspektrum, Lärmreduktion und Lärm-Frequenzspektrum in Abhängigkeit des Belagsalters

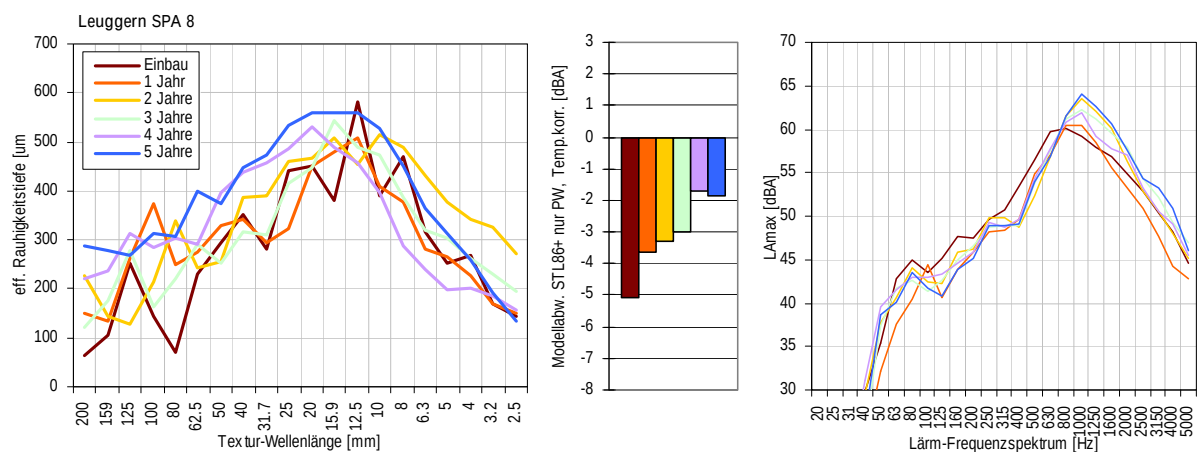
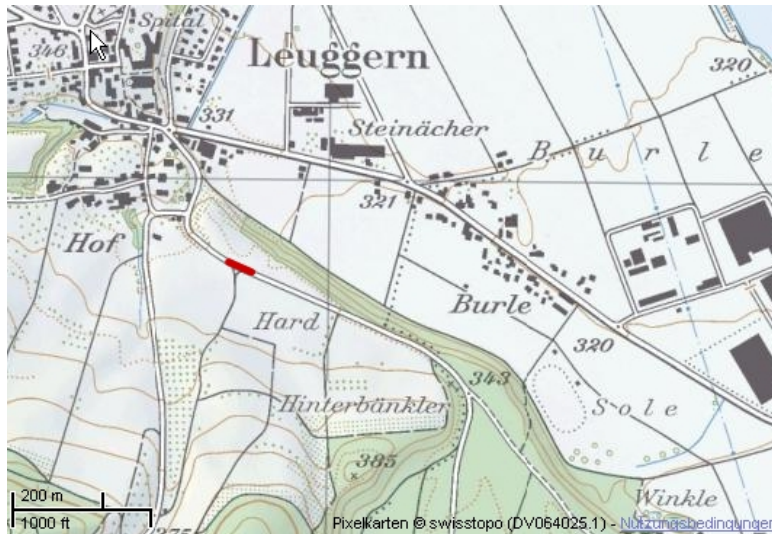


Foto SPA 8 (September 2009)

Abb. 37 Leuggern AG / MA 8 Abstreuerung 2/4

Situationsplan der Pilotstrecke



Einbaudatum
Mai 2004

Durchschnittlicher täglicher Verkehr
(DTV SN 640 005a)
2000

Koordinaten (Swisstopo)
X = 658832
Y = 269783

Texturspektrum, Lärmreduktion und Lärm-Frequenzspektrum in Abhängigkeit des Belagsalters

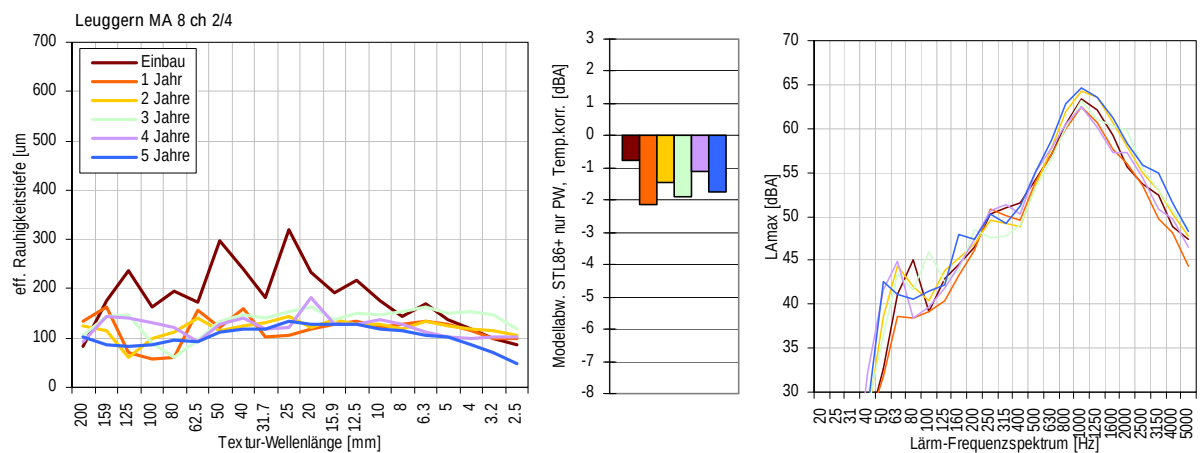


Foto MA 8 Abstreuerung 2/4
(September 2009)

Abb. 38 Leuggern AG / MA 8 Abstreueung 3/6

Situationsplan der Pilotstrecke



Einbaudatum
Mai 2004

Durchschnittlicher täglicher Verkehr
(DTV SN 640 005a)
2000

Koordinaten (Swisstopo)
X = 658874
Y = 269752

Texturspektrum, Lärmreduktion und Lärm-Frequenzspektrum in Abhängigkeit des Belagsalters

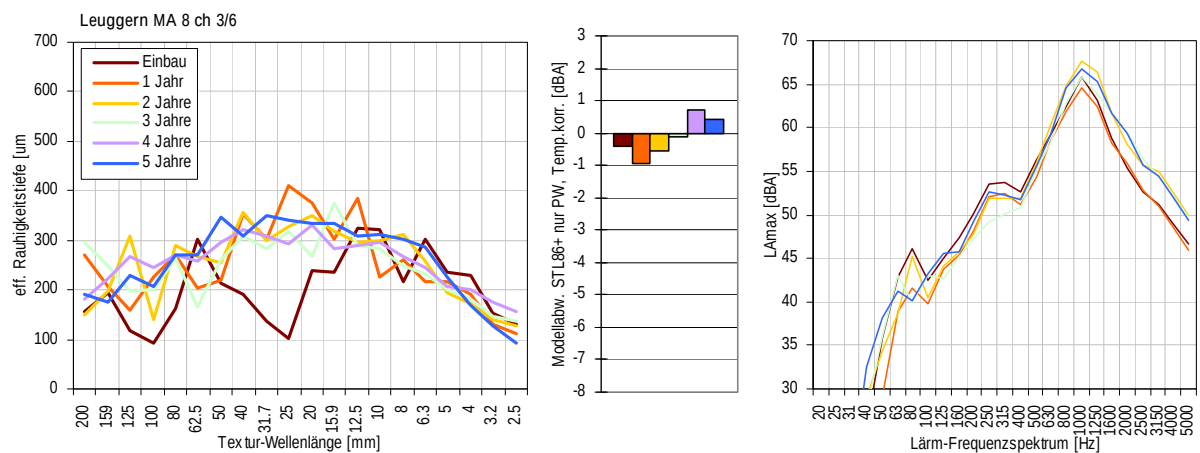
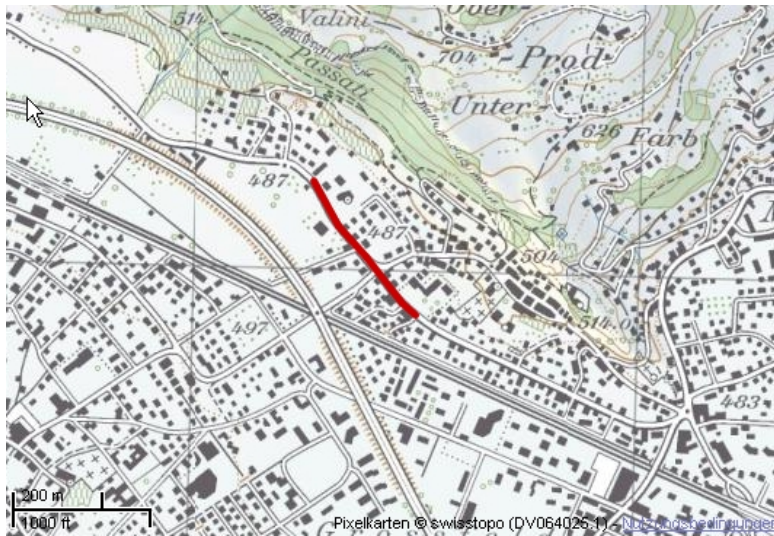


Foto MA 8 Abstreueung 3/6
(September 2009)

Abb. 39 Sargans SG / AC 11

Situationsplan der Pilotstrecke



Einbaudatum
September 2004

Durchschnittlicher täglicher Verkehr
(DTV SN 640 005a)
6170

Koordinaten (Swisstopo)
X = 751490
Y = 212890

Texturspektrum, Lärmreduktion und Lärm-Frequenzspektrum in Abhängigkeit des Belagsalters

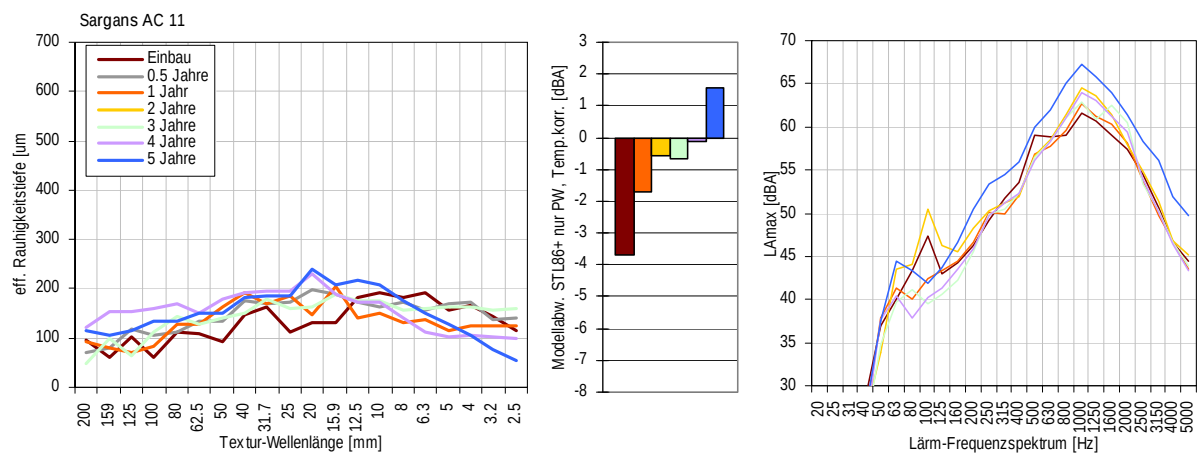


Foto AC 11 (September 2009)

Abb. 40 Sessa TI / AC 11 Leca

Situationsplan der Pilotstrecke

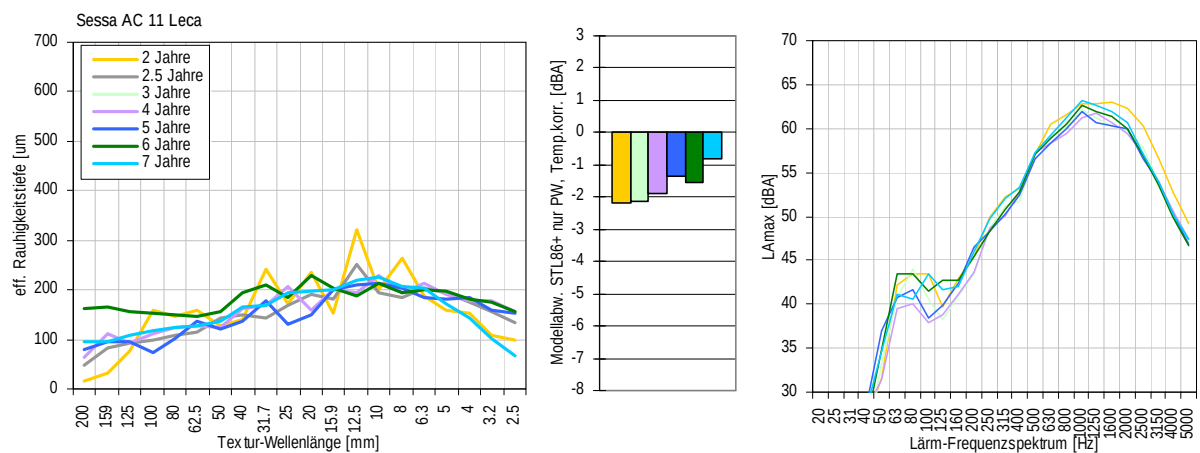


Einbaujahr
2002

Durchschnittlicher täglicher Verkehr
(DTV SN 640 005a)
1086

Koordinaten (Swisstopo)
X = 706433
Y = 95329

Texturspektrum, Lärmreduktion und Lärm-Frequenzspektrum in Abhängigkeit des Belagsalters



AC 11 Leca (September 2009)

Abb. 41 Bellinzona TI / AC 11 Leca

Situationsplan der Pilotstrecke

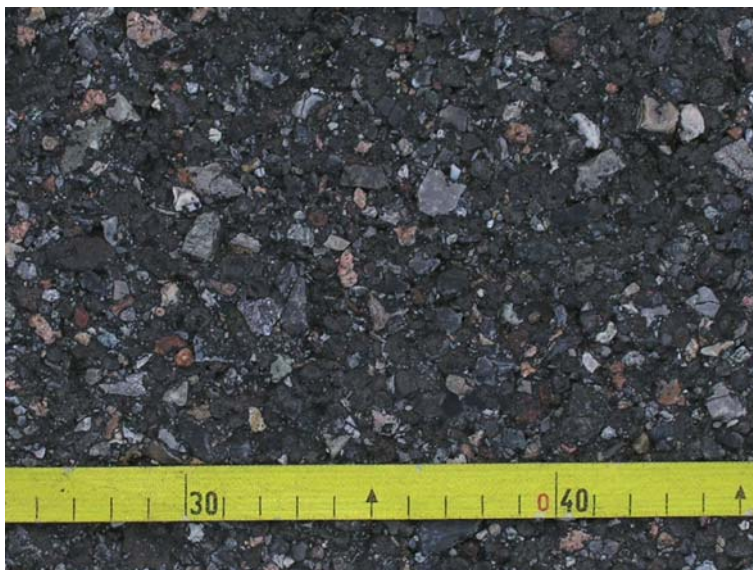
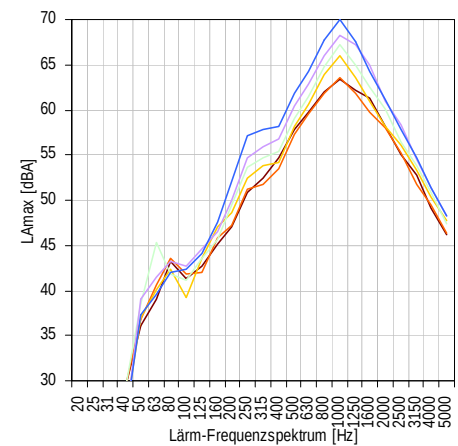
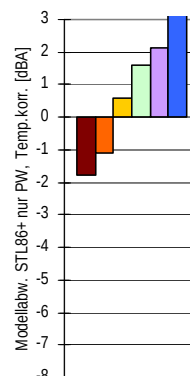
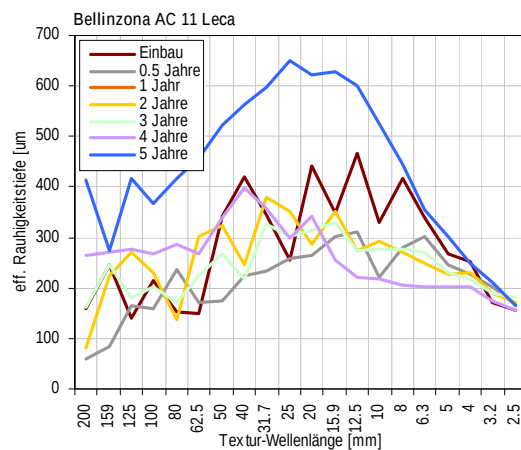


Einbaudatum
Juli 2004

Durchschnittlicher täglicher Verkehr
(DTV SN 640 005a)
19800

Koordinaten (Swisstopo)
X = 723187
Y = 118100

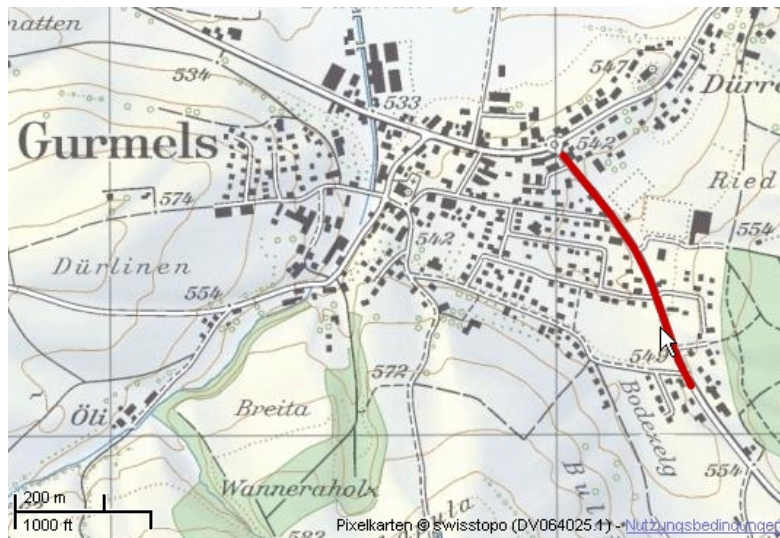
Texturspektrum, Lärmreduktion und Lärm-Frequenzspektrum in Abhängigkeit des Belagsalters



AC 11 Leca (September 2009)

Abb. 42 Gurmels FR / Wecophone© 6

Situationsplan der Pilotstrecke



Einbaudatum
Juni 2003

Durchschnittlicher täglicher Verkehr
(DTV SN 640 005a)
10400

Koordinaten (Swisstopo)
X = 580000
Y = 193600

Texturspektrum, Lärmreduktion und Lärm-Frequenzspektrum in Abhängigkeit des Belagsalters

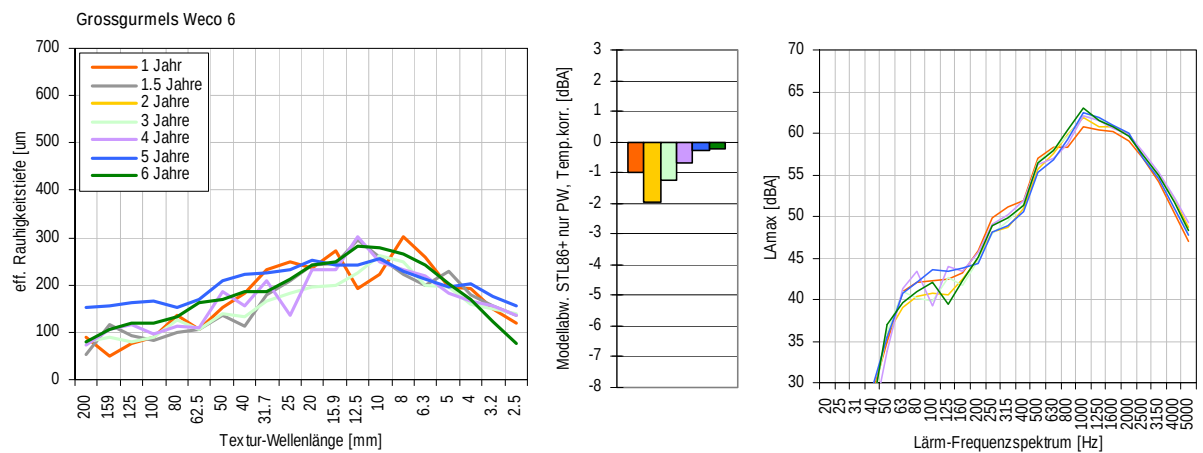


Foto Wecophone 6 (September 2009)

Literatur

- [1] ISO 13473-4, 2008: Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen – Teil 4: Spektralanalyse von Oberflächenprofilen.
- [2] ISO 13473-1, 1997: Caractérisation de la texture d'un revêtement de chaussée à partir de relevés de profils de la surface – Partie 1: Détermination de la profondeur moyenne de profil.
- [3] ISO 9053, 1991: Acoustique – Matériaux pour applications acoustiques – Détermination de la résistance à l'écoulement de l'air
- [4] DIN EN 29053, 1993: Akustik – Materialien für akustische Anwendungen – Bestimmung des Strömungswiderstandes.
- [5] www.speron.net
- [6] Sandberg, Ejsmont 2002: Tyre/Road Noise Reference Book, Ed. Informex, Sweden.
- [7] Männel M. 2008: Prüfung akustisch relevanter Parameter im Labor und in-situ, 4. Informationstage, Geräuschmindernde Fahrbahnbeläge in der Praxis, Gelsenkirchen.
- [8] www.bafu.admin.ch/publikationen/00015/