

# Lärmarme Beläge – Erhalten was man bestellt!

Emanuel Hammer<sup>1</sup>, Hanspeter Gloor<sup>2</sup> und Erik Bühlmann<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Grolimund + Partner AG, 3006 Bern, E-Mail: erik.buehlmann@grolimund-partner.ch*

<sup>2</sup> *Departement Bau Verkehr und Umwelt des Kantons Aargau, Abteilung Tiefbau, 5001 Aarau, E-Mail: hanspeter.gloor@ag.ch*

## Einleitung

Lärmarme Beläge werden häufig als Lärmschutzmassnahme in Erwägung gezogen. Um die Lärmpegel unterhalb zulässiger Grenzwerte bringen zu können, müssen durch die lärmarmen Beläge gewisse akustische Leistungen garantiert werden können. Dies kann entweder mittels akustischer Zertifizierung von Unternehmerprodukten oder der Normierung von lärmarmen Rezepturen erfolgen. In der Schweiz wurde deshalb eine Norm für die Herstellung von lärmarmen semidichten Asphalten SDA erarbeitet. Obwohl diese den erfolgreichen Einbau von lärmarmen Belägen garantieren soll, variiert deren akustische Wirkung in der Praxis stark. Diese Studie hat zum Ziel die physischen Parameter statistisch zu bestimmen, um die akustische Leistung in Zukunft besser sicherstellen zu können. Dabei wurde ein Datensatz von Mischgut- und Bohrkernuntersuchungen sowie weiteren bautechnischen Abklärungen zusammen mit Rollgeräuschmessungen CPX auf fast 130 bereits realisierten Belägen analysiert. Die Studie präsentiert wichtige physische Parameter und deren Optima-Werte, welche für eine normbezogene akustische Spezifizierung von lärmarmen Belägen entscheidend sind um deren langanhaltende Wirkung zu garantieren. Somit wird dem Lärmvollzug ein Hilfsmittel zur Verfügung gestellt, welches die Bestellung eines lärmarmen Belages unter Gewährleistung der Wirkung erlaubt.

## Methoden

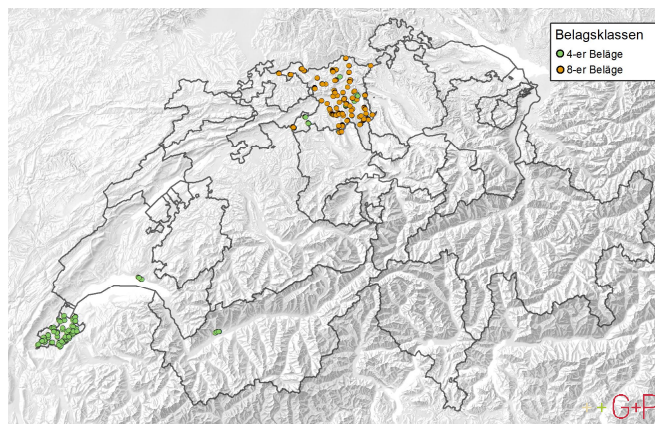
### Datengrundlage

Mit dem Ziel für die Studie eine möglichst breite Datengrundlage zu schaffen, wurden sowohl nach der Schweizer Norm (SNR 640 436, 2015) eingebaute SDA-Beläge sowie Eigenprodukte von Baufirmen (Firmenlösungen) in die Studie aufgenommen. Die Firmenlösungen sind den SDA-Belägen bezüglich Rezeptur und Bauweise meist sehr ähnlich und entsprechen oft sogar vollumfänglich den Anforderungen der Norm. Als einschränkende Kriterien für die Aufnahme von Belägen in die Studie galten einerseits die Verfügbarkeit von kleinräumig lokalisierbaren technischen Untersuchungen der Deckschicht (Mischgutuntersuchungen und georeferenzierte Bohrkernuntersuchungen) sowie das Vorhandensein einer mehrjährigen akustischen Messreihe mit der CPX-Anhängermethode (siehe Abbildung 1), welche die flächendeckenden akustischen Eigenschaften ganzer Strassenabschnitte erfasst.



**Abbildung 1:** Close-Proximity (CPX) Messanhänger von Grolimund + Partner AG nach Norm ISO/FDIS 119-2:2016

Der Fokus der Studie liegt auf sämtlichen Rezepturen im semidichten Bereich mit Grösstkorn 4 mm (4-er Beläge) und 8 mm (8-er Beläge). Abbildung 2 zeigt die geographische Verteilung der in diesem Projekt analysierten 4-er und 8-er Beläge. Zu sämtlichen Belägen liegen mindestens eine Bohrkern- und eine Mischgutuntersuchung vor, welche kleinräumig mit den akustischen Daten der CPX-Messungen zusammengeführt wurden.



**Abbildung 2:** Geographische Lage der in diesem Projekt untersuchte 4-er Beläge (in grün) und 8-er Beläge (in rot)

Die Studie umfasst Daten von 65 4-er Beläge à 223 Bohrkern und 61 8-er Beläge à 259 Bohrkern. Da die meisten Beläge als Lärmschutzmassnahme auf stark lärmbelasteten Streckenabschnitten eingesetzt wurden, sind diese allesamt relativ hohen Verkehrsbelastungen ausgesetzt.

Die Liste aller in das Projekt eingegangener physischer Parameter der Bohrkern-, Mischgutuntersuchung und Erstprüfungen sind in Tabelle 1 aufgelistet.

**Tabelle 1:** Analyisierte physische Parameter

Einbauparameter	Mischgutparameter	Materialparameter
Hohlraumgehalt (BK)	Ausfüllungsgrad	Wasserempfindlichkeit
Rohdichte (BK)	Bindemittelanteil	Bindemittelart
Schichtdicke	Fließwert	Füllertyp
Verdichtungsgrad	Stabilität	Gesteinsherkunft
Luftfeuchte	Hohlraumgehalt (MPK)	
Windgeschwindigkeit	Raumdichte (MPK)	
Lufttemperatur	Rohdichte (Mischgut)	
Steigung	Analysesieb 0.063 mm	
Bauunternehmung	Analysesieb 0.5 mm	
	Analysesieb 2 mm	
	Analysesieb 4 mm	
	Analysesieb 8 mm	
	Temperatur Mischgut	
	Module de Richeesse	
	Fahrzeit	
	Mischwerk	

### Ermitteln der relevanten Parameter für die Akustik

Um die für die akustische Leistung der Beläge (Daten aus den CPX-Messungen) entscheidenden Parameter zu identifizieren, wurden multivariate lineare Regressionsmodelle (*stepwise forward*) für 4-er und 8-er Beläge jeweils im Neuzustand, 1 Jahr nach Einbau, 3 Jahre nach Einbau als auch 5 Jahre nach Einbau aufgestellt. Dabei wurden die vorselektionierten physischen Parameter als Input für das Modell genommen. Die akustische Leistung wurde somit als abhängige Variable und die physischen Parameter als unabhängige Variablen ins Modell aufgenommen. Für die definitive Analyse diente der Belagsgütwert für Personenwagen (Abw. SMA 11 Belag für Reifen P1, CPX) 3 Jahre nach Einbau als abhängige akustische Variable. Dieser Datensatz bildet einen guten Kompromiss, da er einerseits auf einem möglichst späten Zustand beruht und damit die Dauerhaftigkeit der akustischen Leistung berücksichtigt und andererseits aus einer genügend grossen Stichprobe für die Datenanalyse besteht.

### Ermitteln der akustisch optimalen Wertebereiche

Die für die akustische Leistung als entscheidend bezeichneten Parameter werden weiter bezüglich akustisch optimaler Wertebereiche untersucht. Dabei geht es darum, für die entscheidenden Parameter diejenigen Werteregionen zu ermitteln, die eine dauerhafte akustische Leistung gewährleisten.

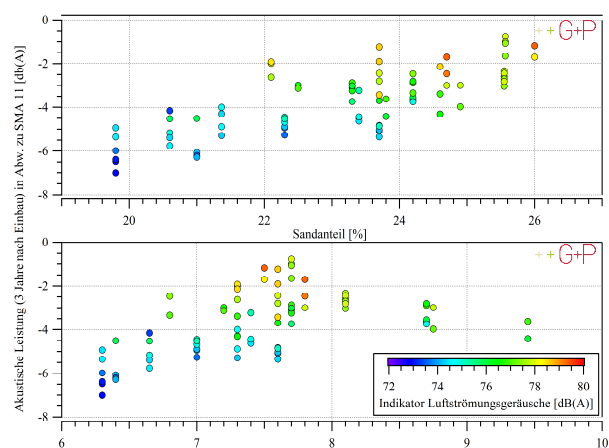
Um die ermittelten optimalen Wertebereiche der entscheidenden Parameter zu überprüfen und präzisieren, wurde ein Kontrolldatensatz mit unabhängigen Daten beigezogen. Dazu wurden Lufttopfmessungen sowie das Terzband der 2'000 Hz Frequenz der Reifen-Fahrbahn-Geräusche aus den CPX-Messungen (Indikator Luftströmungsgeräusche) verwendet um die akustische Wirkung von bisher nicht für die Analysen verwendeten Beläge betreffend Luftströmungsgeräusche zu charakterisieren und damit indirekt auf die von der Oberfläche zugänglichen Hohlräume schliessen zu können. Dieser Sachverhalt wird in [3] detailliert beschrieben.

## Resultate & Diskussion

### Akustische Wirkung von semidichten Asphalten

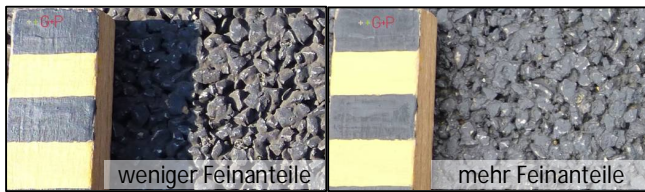
Um die Ursache für die grosse akustische Variabilität der Wirksamkeit von lärmarmen Belägen über ihre Lebensdauer

zu bestimmen, wurde der Zusammenhang zwischen den verfügbaren physischen Parameter und der Akustik mittels multivariater statistischen Analysen ermittelt. Daraus resultierte über verschiedene Belagsalter und beide Belagskategorien (4-er und 8-er Beläge) für die beiden Analysensiebe 0.063 mm und 2 mm konsistent ein signifikanter Zusammenhang. Um diesen Zusammenhang zu verstehen und die akustisch optimalen Wertebereiche zu ermitteln sind in Abbildung 3 die akustische Leistung als Funktion der beiden Analysensiebe 0.063 mm (Fülleranteil; unten) und 2 mm (Sandanteil; oben) dargestellt. Die Farbcodierung in Abbildung 3 zeigt die CPX-Rollgeräusch Pegel der Terzbandmittenfrequenz als Indikator für Luftströmungsgeräusche.



**Abbildung 3:** Zusammenhang der akustischen Leistung von lärmarmen Belägen 3 Jahre nach Einbau (in Abweichung eines konventionelles Strassenbelages (AC 11 o.ä.) mit dem Füller- (unten) und Sandanteil (oben) im Mischgut. Die Färbung weist auf den Indikator der Luftströmungsgeräusche hin.

Es bildet sich die Tendenz, dass mit zunehmendem Füller- und insbesondere Sandanteil die akustische Leistung der Beläge abnimmt (d.h. die Beläge werden lauter). Zudem zeigt die Farbcodierung, dass akustisch gute Beläge tiefere Luftströmungsgeräusche aufweisen. Daraus lässt sich ableiten, dass akustisch gute Beläge auf konsistente Art und Weise grössere Anteile von der Oberfläche zugängliche Hohlräume aufweisen, wodurch die Luftströmungsgeräusche reduziert werden. Der zugängliche Hohlraumgehalt scheint somit einen wesentlichen Einfluss auf eine langfristig gute akustische Wirkung von 4-er als auch 8-er Beläge zu haben. Ähnliche Resultate wurden auch in der Studie [4] präsentiert, allerdings für poröse Asphalte (PA) anhand von Bohrkernanalysen mittels Computertomographie und Schallabsorptionsmessungen. Übersteigen der Füller- bzw. der Sandanteil einen gewissen Wert, nehmen die Luftströmungsgeräusche zu und damit die akustische Leistung 3 Jahre nach Einbau ab. Es kann davon ausgegangen werden, dass dieses Phänomen auf ein Verkleben der von der Oberfläche zugänglichen Hohlräume durch Füller und Sand zurückzuführen ist. Abbildung 4 veranschaulicht dies für semidichte Asphalte anhand von zwei unterschiedlichen 4-er Belägen mit ähnlichem Hohlraumgehalt aber unterschiedlichem Fülleranteil.



**Abbildung 4:** Zwei unterschiedliche 4-er Beläge mit ähnlichem Hohlraumgehalt am Marshall mit 11.9 % (links) und 11.5 % (rechts) und am Bohrkern 12.5 % (links) und 13 % (rechts) und unterschiedlichen Feinanteilen.

Die leichte Zunahme der akustischen Leistung zusammen mit der Zunahme des Indikators für Luftströmungsgeräusche bei Fülleranteil > 8.5 % zeigt, dass offenbar für das Erreichen der akustischen Leistung ein Zusammenspiel von Füller- und Sandanteil entscheidend ist. Entsprechend dürfen der Füller- sowie Sandanteil nicht als alleinstehende Parameter im bivariaten Raum betrachtet werden.

### Zusammenhang Fülleranteil-Sandanteil-Akustik

Wie im vorangegangenen Kapitel aufgezeigt, ist der von der Oberfläche zugängliche Hohlraum der semidichten Asphalte (4-er und 8-er Beläge) relevant für eine gute akustische Wirkung dieser Beläge. Zugängliche Hohlräume reduzieren die Luftströmungsgeräusche und sind eine Voraussetzung für die schallabsorbierende Wirkung eines Belages. Nun soll das Zusammenspiel der als relevant für den zugänglichen Hohlraum ermittelten Parameter Fülleranteil, Sandanteil und Akustik detaillierter betrachtet werden um die Wechselwirkung der Parameter untereinander besser verstehen zu können.

Es ist davon auszugehen, dass die beiden akustisch entscheidenden Parameter Füller- und Sandanteil die Akustik bzw. von der Oberfläche zugänglichen Hohlräume nicht im selben Ausmass beeinflussen. Um die relative Wichtigkeit dieser Parameter zu bestimmen, wurden trivariate lineare Regressionsmodelle zwischen dem Füller- und Sandanteil und den massgebenden akustischen Grössen, wie die akustische Leistung, Indikator Luftströmungsgeräusche und den Luftströmungswiderstand erstellt. Für die 4-er Beläge resultierte eine relative Gewichtung der Wichtigkeit von Fülleranteil zu Sandanteil (ohne Füller) bei fast allen akustischen Grössen von 3:1 (siehe Tabelle 2). Dies bedeutet, dass der Einfluss des Fülleranteils auf die Akustik im Vergleich zum Sandanteil dreimal so stark ausfällt.

**Tabelle 2:** Gewichtung Fülleranteil und Sandanteil für Zusammenspiel Fülleranteil-Sandanteil-Akustik

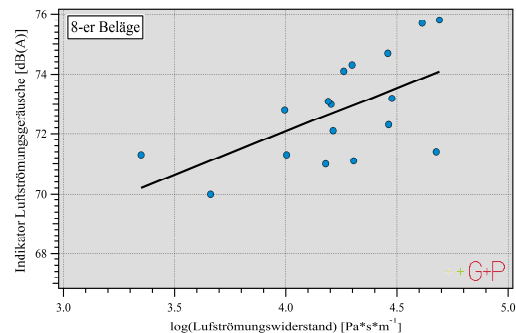
	Gewichtung	
	4-er	8-er
Anteil Füller	3	2
Anteil Sand (ohne Füller)	1	1

Bei 8-er Belägen beträgt die relative Wichtigkeit von Fülleranteil zu Sandanteil (ohne Füller) 2:1 bei fast allen akustischen Grössen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass der Fülleranteil bei 8-er Belägen einen doppelt so starken Einfluss auf die Akustik und die von der Oberfläche zugänglichen Hohlräume hat.

### Akustischer Grenzbereich für zugängliche Hohlräume

Nun gilt es den akustischen Grenzbereich zwischen semidicht und akustisch dichten Rezepturen zu bestimmen. In diesem Bereich ist in der Regel ein wesentlicher Unterschied bezüglich der akustischen Leistung zu verzeichnen. Damit die Hohlräume im Belag wirksam sind müssen sie von der Oberfläche her zugänglich sein. Der Grenzbereich ist in der vorliegenden Studie so definiert, dass im entsprechenden Belag gerade noch ein Minimum an von Oberfläche zugänglichen und damit akustisch wirksamen Hohlräumen vorhanden ist. Wird dieser Grenzbereich überschritten, kann der Belag zwar noch wesentliche Hohlraumgehalte aufweisen, die Hohlräume sind jedoch von der Oberfläche abgeschlossen bzw. verklebt. Der Belag ausserhalb des Grenzbereiches verhält sich entsprechend akustisch wie ein dichter Belag und die akustische Wirkung bleibt faktisch auf Effekte der Oberflächentextur beschränkt.

Unter Beziehung eines Kontrolldatensatzes bestehend aus Daten von Rollgeräuschmessungen CPX, Luftströmungswiderstandsmessungen und Indikatorwerte Luftströmungsgeräusche (aus CPX-Messungen) konnte aus dem Zusammenhang zwischen Luftströmung und der Akustik (siehe Abbildung 5), ein akustischer Grenzwert für semidichte (von der Oberfläche zugängliche Hohlräume) und akustisch dichte (von der Oberfläche keine zugänglichen Hohlräume) 4-er und 8-er Beläge ermittelt werden.



**Abbildung 5:** Indikator Luftströmungsgeräusche (aus Rollgeräuschmessungen CPX) als Funktion des Luftströmungswiderstandes (aus Lufttopfmessungen) für 8-er Beläge

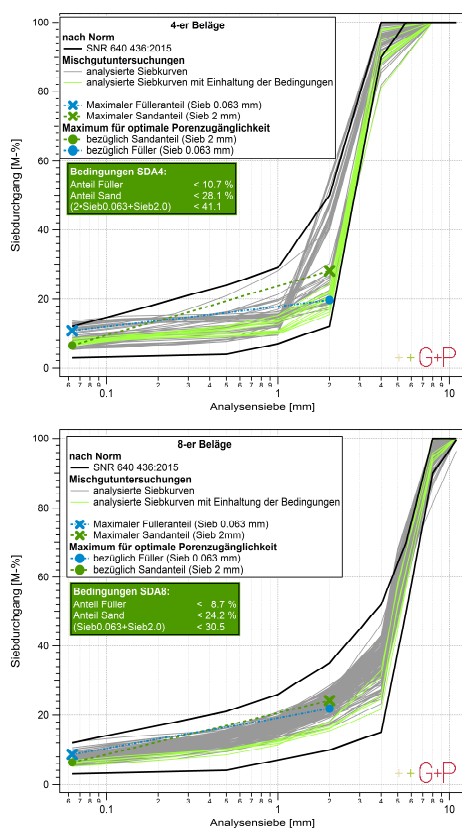
Mit den Erkenntnissen bezüglich der ermittelten akustischen Grenzwerte des Indikators Luftströmungsgeräusche und dem Zusammenspiel von Füller- und Sandanteil aus Tabelle 2 wird ein Akustik-Faktor definiert, welcher die akustischen und technischen Eigenschaften zusammenbringen soll. Für 4-er Beläge wird dieser Akustik-Faktor  $F_{4-er}$  wie folgt bestimmt:

$$F_{4-er} = 3 \cdot S_{0.063mm} + 1 \cdot (S_{2.0mm} - S_{0.063mm}) \quad [-] \quad (1)$$

Für 8-er Beläge wird der Akustik-Faktor  $F_{8-er}$  wie folgt bestimmt:

$$F_{8-er} = 2 \cdot S_{0.063mm} + 1 \cdot (S_{2.0mm} - S_{0.063mm}) \quad [-] \quad (2)$$

In Abbildung 6 sind die maximalen Anteile an Füller und Sand eingezeichnet, welche eingehalten werden sollten um langfristig gute akustische Belagsgütwerte für 4-er und 8-er Beläge zu erreichen. Diese Werte sind zudem an die in der grünen Box der Abbildung 6 gelisteten Bedingungen an die  $F_{4\text{-er}}$  und  $F_{8\text{-er}}$  geknüpft. Dies bedeutet, dass wenn das Maximum an Fülleranteil gewählt wird, nicht mehr das Maximum vom Sandanteil genommen werden kann und umgekehrt, da der Akustik Faktor eingehalten werden muss. Somit können unter Einhaltung der drei Bedingungen für semidichte Asphalte zugängliche und somit akustisch wirksame Hohlräume gewährleistet werden.



**Abbildung 6:** Alle analysierten Siebkurven von 4-er (oben) und 8-er Belägen (unten) mit dem Minimum und Maximum vorgegebenen Grenzwert der Norm SNR 640 436:2015. In grün und blau sind die maximalen Werte für Füller- (Siebdurchgang bei Analysensieb 0.063 mm) und Sandanteil (Siebdurchgang bei Analysensieb 2.0 mm) unter der Bedingung, dass  $F_{4\text{-er}} < 41.1$  bzw.  $F_{8\text{-er}} < 30.5$ . In grün sind diejenigen Siebkurven dargestellt, welche die Bedingungen erfüllen.

## Schlussfolgerungen

**Zugängliche Hohlräume notwendig.** Aus den Analysen dieses Forschungsprojekts ist auf konsistente Weise hervorgegangen, dass die Beläge mit guter akustischer Leistung allesamt durch tiefe Luftströmungsgeräusche und somit durch von der Oberfläche zugängliche Hohlräume charakterisiert sind. Diese Erkenntnis ist insofern von Bedeutung, da sich die Auswertungen nicht etwa auf den Neuzustand, sondern auf den Zustand 3 Jahre nach Einbau beziehen. Wird davon ausgegangen, dass semidichte Asphalte, die bei hohen Verkehrslasten 3 Jahre nach Einbau intakte Eigenschaften aufweisen sich nicht plötzlich verändern, kann entsprechend gefolgert werden, dass

akustisch dauerhafte Beläge folgendes gemeinsam haben: Von der Oberfläche zugängliche Hohlräume, die für tiefe Luftströmungsgeräusche und einem gewissen Mass an Schallabsorption sorgen.

**Bei semidichten Asphalten sind Füller- und Sandanteil die entscheidenden Parameter.** Bei porösen Asphalten kann die für die Akustik massgebende Hohlraumstruktur direkt über den Hohlraumgehalt am Mischgut gesteuert werden. Bei semidichten Asphalten ist die akustische Wirkungsweise komplizierter und die Steuerung über den Hohlraumgehalt alleine nicht ausreichend. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, dass die von der Oberfläche zugänglichen Hohlräume im Wesentlichen von den Füller- und Sandanteilen der Rezeptur abhängen. Werden diese Hohlräume durch Füller- und Sandanteile verklebt, kann der Belag noch immer wesentliche Hohlraumgehalte aufweisen, die allerdings nicht von der Oberfläche zugänglich und damit nicht akustisch wirksam sind.

**Der akustische Grenzbereich zwischen semidicht und dicht nicht überschreiten.** Es gilt zu gewährleisten, dass der akustische Grenzbereich zwischen semidichten und dichten Rezepturen nicht überschritten wird und die Zugänglichkeit und der Verbindungsgrad der Hohlräume nicht aufgrund zu hoher Füller- und Sandanteile durch Verklebung eingeschränkt werden oder ganz verloren gehen. Die vorgeschlagenen akustischen Ausführungsbestimmungen stellen einen wesentlichen Schritt dar, im Bestreben mit semidichten Asphalten den Hohlraumgehalt unter der Gewährleistung der akustischen Leistung zu minimieren und damit eine möglichst grosse Dauerhaftigkeit von lärmarmen Belägen zu erreichen.

## Literatur

- [1] "VSS 640436 - Semidichtes Mischgut und Deckschichten." 2015.
- [2] ISO/CD 11819-2, "Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 2: The close-proximity method." 2000.
- [3] E. Bühlmann and T. Ziegler, "Interpreting measured acoustic performance on Swiss low-noise road surfaces using a tyre / road interaction model," pp. 1–6, 2012.
- [4] B. Peeters, M. Hirschberg, and A. Kuijpers, "Influence of Pore Structure on Sound Absorption in Porous Road Surfaces," in *Proc. DAGA*, 2016, pp. 1054–1057.
- [5] R. Gubler, Y. Liu, D. Anderson, and M. Partl, "Investigation of the system filler and asphalt binders by rheological means," *J. Assoc. Asph. Paving Technol.*, vol. 68, pp. 284–302, 1999.
- [6] W. Stahel, *Statistische Datenanalyse*. Vieweg+Teubner Verlag, 2002.

## Danksagung

Wir bedanken uns bei Dr. Jacques Perret und Dr. Nicolas Bueche von Nibuxs sàrl für die wertvollen Diskussionen und Mithilfe bei der Datenanalyse und Interpretation der Resultate. Weiter möchten wir uns bei der Begleitkommission bedanken, welche uns während des gesamten Projektes mit wertvollen Inputs unterstützte. Dem Bundesamt für Umwelt und Kanton Aargau danken wir für die finanzielle Unterstützung des Projektes.

GROLIMUND + PARTNER AG  
UMWELTTECHNIK + BAUPHYSIK + INFORMATIK  
BERN + AARAU + ZÜRICH + DEITINGEN + NEUCHÂTEL



N!buxs



DAGA 2017

## Lärmarme Beläge - Erhalten was man bestellt

Emanuel Hammer<sup>1</sup>, Hanspeter Gloor<sup>2</sup> und Erik Bühlmann<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grolimund + Partner AG, Bern, Schweiz

<sup>2</sup>Tiefbauamt Kanton Aargau, Aarau, Schweiz

08.03.2017

Unterstützt von:



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

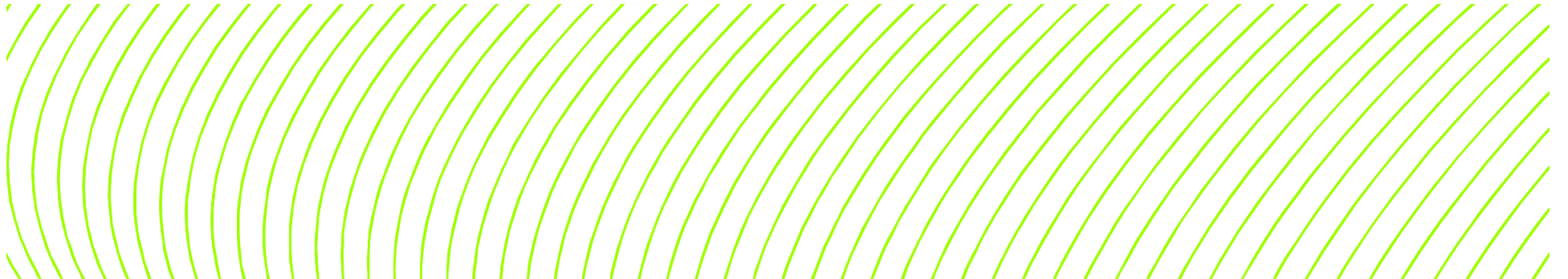
Bundesamt für Umwelt BAFU

## INHALT

- **Projektfokus/-ziele**
- **Methoden**
- **Resultate**
- **Schlussfolgerungen**



## Projektfokus

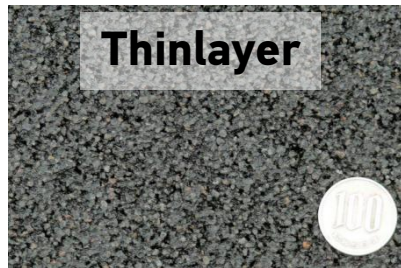


PROJEKTFOKUS | METHODEN | ERGEBNISSE | SCHLUSSFOLGERUNGEN

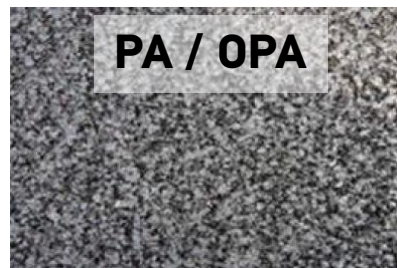
## Lärmarme Strassenbeläge

Ziel: dauerhafte und möglichst hohe Lärmreduktion  
auf stark lärmbelasteten Strassenabschnitten

### Poröse Asphalte



nur  
innerorts



nur Geschwindig-  
keiten  $\geq 80$  km/h

### Semidichte Asphalte



### Texturoptimierung



alle Strassentypen

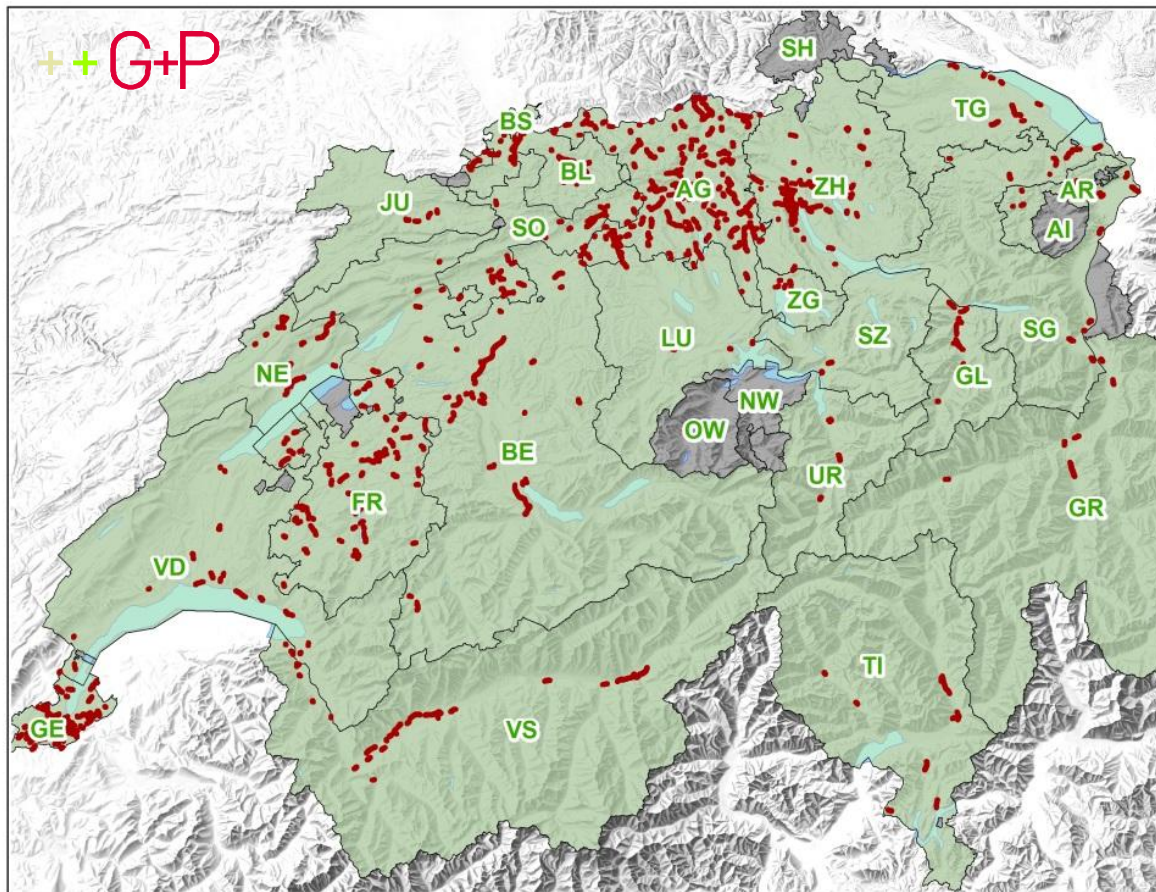
Lärmreduktion

KOMPROMISS

Lebensdauer



## Semidichte Asphalte als Lärmschutzmassnahme

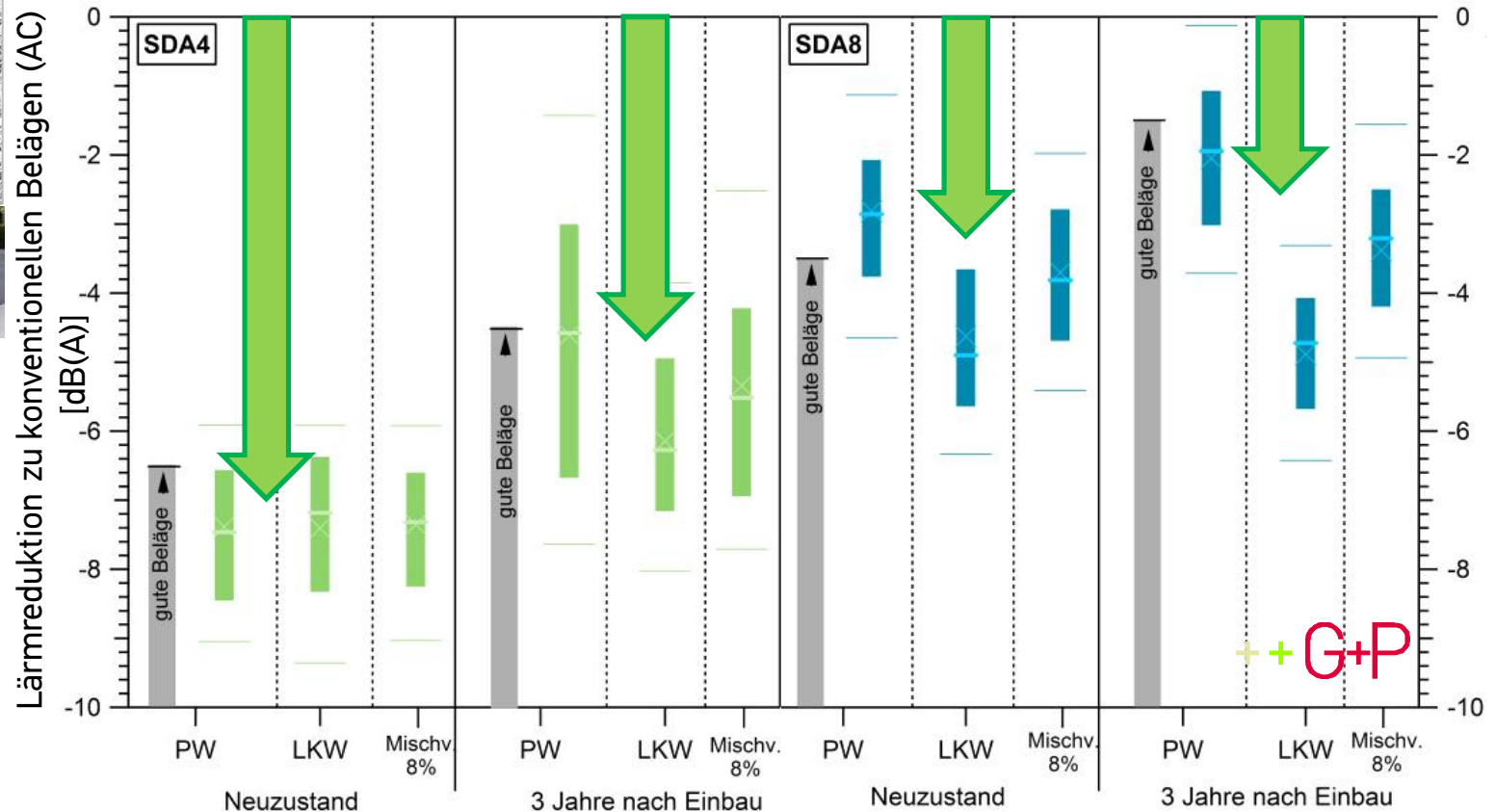
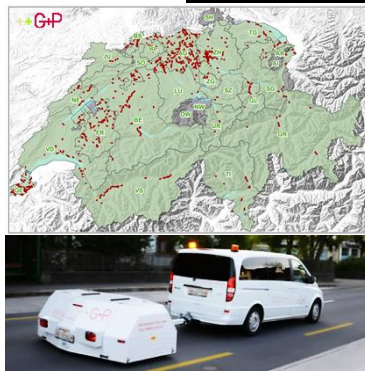


Normiert in: SNR 640436

→SDA für semidichte Asphalte

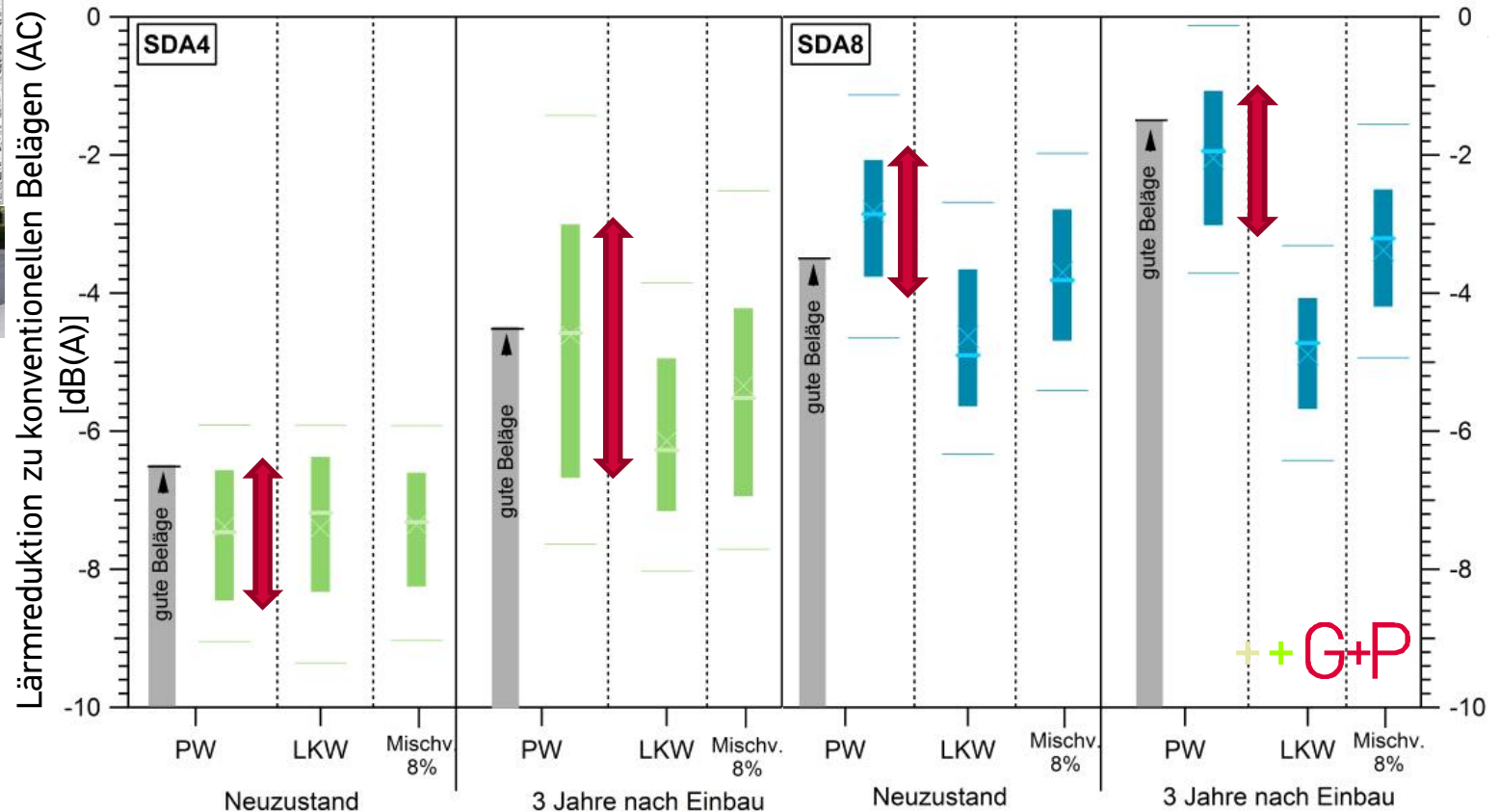
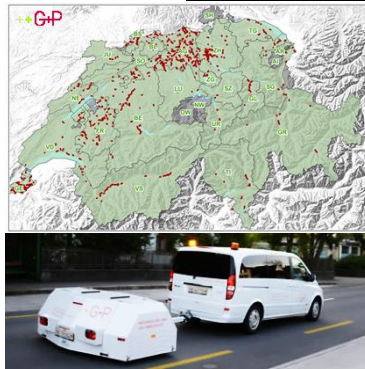
- Grösstkorn: 8 mm, 4 mm
- Hohlraumgehaltklassen:
  - 12%
  - 16%
  - (20%)
- Praxiseinbau durch Nationales Forschungspaket initiiert (2011-2016)
- seither auf ca. 400 Strecken semidichte Asphalte als Lärmschutzmassnahme realisiert

## Semidichte Asphalte (SDA) in der Schweiz



→ Gute Erfahrungen mit SDA, wesentlich Lärmreduktionen auch n. 3 Jahren

## Semidichte Asphalte (SDA) in der Schweiz



→ Aber akustische Wirkung variiert um 2 bis 3 dB → Problem für Lärmschutz

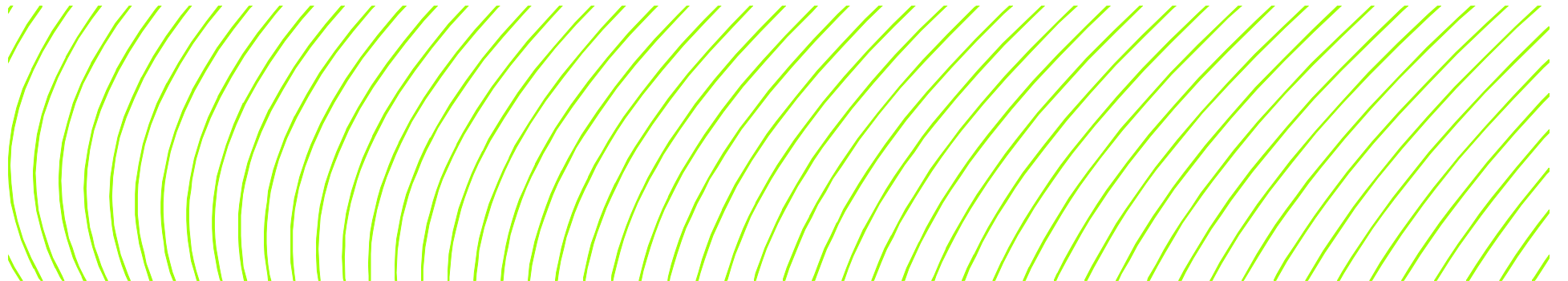
PROJEKTFOKUS | METHODEN | ERGEBNISSE | SCHLUSSFOLGERUNGEN

## Projektziel

- **Minimieren der akustischen Variabilität** von semi-dichten Belägen bei gleichzeitiger Minimierung des Hohlraumgehaltes
  - Ausarbeiten von Ausführungsbestimmungen Akustik zur existierenden Norm zur **Sicherstellung der akustischen Leistung**
  - Einbezug bautechnischer Anforderungen und Realisierbarkeit in der Praxis



## Methodik



## Methodisches Vorgehen

**Fokus:** Schweizweit realisierte semidichte Asphalte

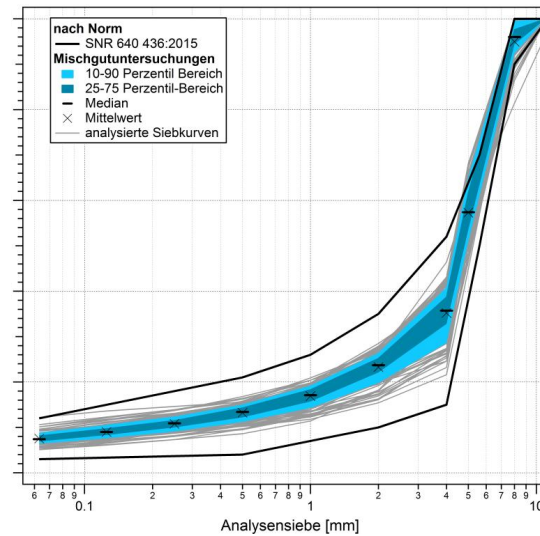
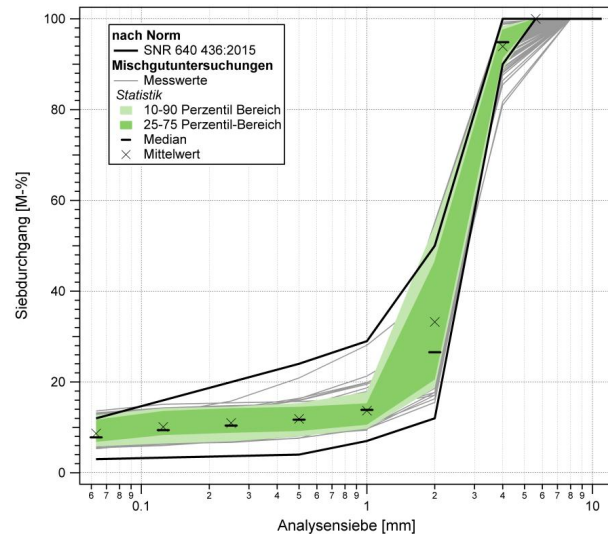
**Arbeitsschritte:**

- 1) **Identifizieren der akustisch entscheidenden Parameter**  
→ *Multivariate statistische Analysen* physische Parameter - Akustik
- 2) **Ermitteln akustisch optimaler Wertebereiche**  
→ *Detailanalyse* der entscheidenden Parameter (inkl. Analyse der Interdependenz)
- 3) **Zusammenhang entscheidender Parameter mit Akustik**
- 4) **Ermitteln des akustischen Grenzbereiches semi-dicht – dicht**  
→ *Einbezug unabhängiger Datensatzes* akustischer Wirkungsanalysen
- 5) **Aufstellen akustische Ausführungsbestimmungen SDA**

## Datengrundlage

### Hauptdatensatz (Kantone: AG, GE, VD, VS)

- Mischgutuntersuchungen, Erstprüfungen (wo vorhanden)



- Bohrkernuntersuchungen

4-er: 68 Bohrkern

8-er: 158 Bohrkern



Akustische CPX Messungen in mehreren Zuständen

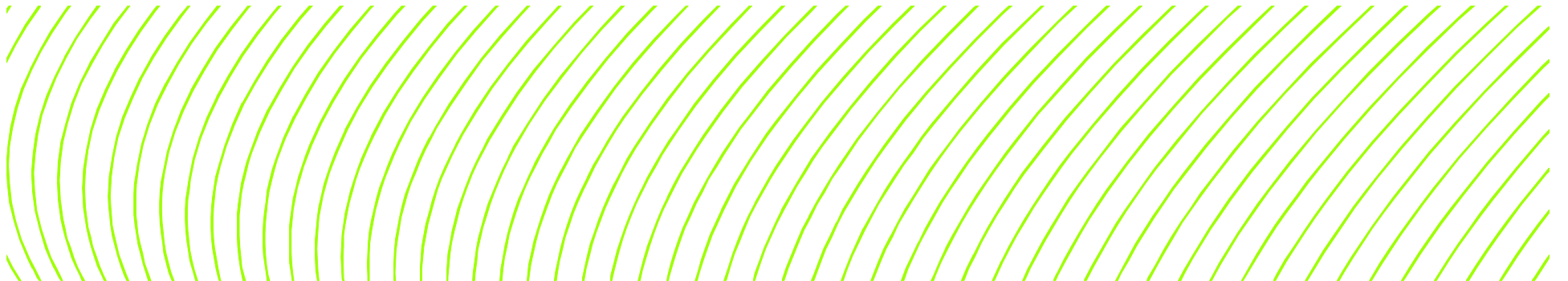
### Kontrolldatensatz (Kt AG, TP3)

- akustische Wirkungsanalysen
- Lufttopf-Messungen
- CPX Indikator 2000 Hz





## Ergebnisse





## Akustisch entscheidende Parameter

Einbauparameter	Mischgutparameter	Materialparameter
<b>Hohlraumgehalt (BK) <sup>4,8</sup></b>	<b>Ausfüllungsgrad <sup>8</sup></b>	Wasserempfindlichkeit
Rohdichte (BK)	Bindemittelanteil	Bindemittelart
<b>Schichtdicke <sup>4</sup></b>	<b>Fließwert <sup>8</sup></b>	Füllertyp
Verdichtungsgrad	<b>Hohlraumgehalt (MPK) <sup>8</sup></b>	Gesteinsherkunft
Luftfeuchte	<b>Raumdichte (MPK) <sup>4,8</sup></b>	
<b>Windgeschwindigkeit <sup>8</sup></b>	Rohdichte (Mischgut)	
<b>Lufttemperatur <sup>8</sup></b>	<b>Sieb 0.063 mm / Füller <sup>4,8</sup></b>	
Steigung	Sieb 0.5 mm	
Bauunternehmung	<b>Sieb 2 mm <sup>8, 4 (n1Jahr)</sup></b>	
	Sieb 4 mm	
	Sieb 8 mm	
	<b>Temperatur Mischgut <sup>8</sup></b>	
	<b>Fahrzeit <sup>4,8</sup></b>	
	Mischgutzentrale	

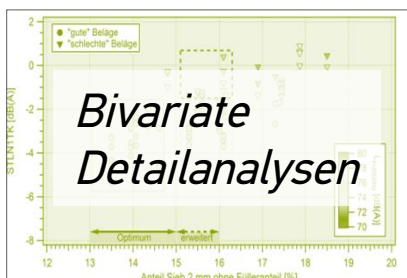
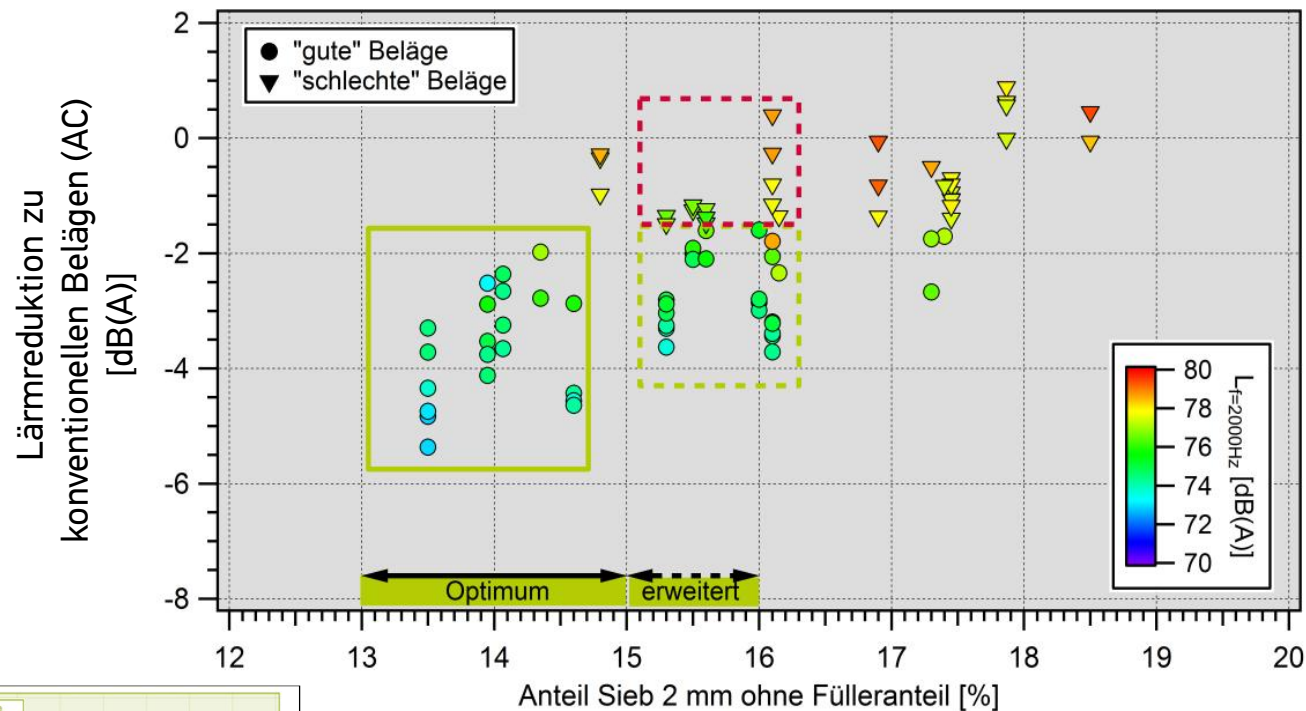
```

R111
R112
R113
R114
R115
R116
R117
R118
R119
R120
R121
R122
R123
R124
R125
R126
R127
R128
R129
R130
R131
R132
R133
R134
R135
R136
R137
R138
R139
R140
R141
R142
R143
R144
R145
R146
R147
R148
R149
R150
R151
R152
R153
R154
R155
R156
R157
R158
R159
R160
R161
R162
R163
R164
R165
R166
R167
R168
R169
R170
R171
R172
R173
R174
R175
R176
R177
R178
R179
R180
R181
R182
R183
R184
R185
R186
R187
R188
R189
R190
R191
R192
R193
R194
R195
R196
R197
R198
R199
R200
R201
R202
R203
R204
R205
R206
R207
R208
R209
R210
R211
R212
R213
R214
R215
R216
R217
R218
R219
R220
R221
R222
R223
R224
R225
R226
R227
R228
R229
R230
R231
R232
R233
R234
R235
R236
R237
R238
R239
R240
R241
R242
R243
R244
R245
R246
R247
R248
R249
R250
R251
R252
R253
R254
R255
R256
R257
R258
R259
R260
R261
R262
R263
R264
R265
R266
R267
R268
R269
R270
R271
R272
R273
R274
R275
R276
R277
R278
R279
R280
R281
R282
R283
R284
R285
R286
R287
R288
R289
R290
R291
R292
R293
R294
R295
R296
R297
R298
R299
R300
R301
R302
R303
R304
R305
R306
R307
R308
R309
R310
R311
R312
R313
R314
R315
R316
R317
R318
R319
R320
R321
R322
R323
R324
R325
R326
R327
R328
R329
R330
R331
R332
R333
R334
R335
R336
R337
R338
R339
R340
R341
R342
R343
R344
R345
R346
R347
R348
R349
R350
R351
R352
R353
R354
R355
R356
R357
R358
R359
R360
R361
R362
R363
R364
R365
R366
R367
R368
R369
R370
R371
R372
R373
R374
R375
R376
R377
R378
R379
R380
R381
R382
R383
R384
R385
R386
R387
R388
R389
R390
R391
R392
R393
R394
R395
R396
R397
R398
R399
R400
R401
R402
R403
R404
R405
R406
R407
R408
R409
R410
R411
R412
R413
R414
R415
R416
R417
R418
R419
R420
R421
R422
R423
R424
R425
R426
R427
R428
R429
R430
R431
R432
R433
R434
R435
R436
R437
R438
R439
R440
R441
R442
R443
R444
R445
R446
R447
R448
R449
R450
R451
R452
R453
R454
R455
R456
R457
R458
R459
R460
R461
R462
R463
R464
R465
R466
R467
R468
R469
R470
R471
R472
R473
R474
R475
R476
R477
R478
R479
R480
R481
R482
R483
R484
R485
R486
R487
R488
R489
R490
R491
R492
R493
R494
R495
R496
R497
R498
R499
R500
R501
R502
R503
R504
R505
R506
R507
R508
R509
R510
R511
R512
R513
R514
R515
R516
R517
R518
R519
R520
R521
R522
R523
R524
R525
R526
R527
R528
R529
R530
R531
R532
R533
R534
R535
R536
R537
R538
R539
R540
R541
R542
R543
R544
R545
R546
R547
R548
R549
R550
R551
R552
R553
R554
R555
R556
R557
R558
R559
R560
R561
R562
R563
R564
R565
R566
R567
R568
R569
R570
R571
R572
R573
R574
R575
R576
R577
R578
R579
R580
R581
R582
R583
R584
R585
R586
R587
R588
R589
R590
R591
R592
R593
R594
R595
R596
R597
R598
R599
R600
R601
R602
R603
R604
R605
R606
R607
R608
R609
R610
R611
R612
R613
R614
R615
R616
R617
R618
R619
R620
R621
R622
R623
R624
R625
R626
R627
R628
R629
R630
R631
R632
R633
R634
R635
R636
R637
R638
R639
R640
R641
R642
R643
R644
R645
R646
R647
R648
R649
R650
R651
R652
R653
R654
R655
R656
R657
R658
R659
R660
R661
R662
R663
R664
R665
R666
R667
R668
R669
R670
R671
R672
R673
R674
R675
R676
R677
R678
R679
R680
R681
R682
R683
R684
R685
R686
R687
R688
R689
R690
R691
R692
R693
R694
R695
R696
R697
R698
R699
R700
R701
R702
R703
R704
R705
R706
R707
R708
R709
R710
R711
R712
R713
R714
R715
R716
R717
R718
R719
R720
R721
R722
R723
R724
R725
R726
R727
R728
R729
R730
R731
R732
R733
R734
R735
R736
R737
R738
R739
R740
R741
R742
R743
R744
R745
R746
R747
R748
R749
R750
R751
R752
R753
R754
R755
R756
R757
R758
R759
R760
R761
R762
R763
R764
R765
R766
R767
R768
R769
R770
R771
R772
R773
R774
R775
R776
R777
R778
R779
R780
R781
R782
R783
R784
R785
R786
R787
R788
R789
R790
R791
R792
R793
R794
R795
R796
R797
R798
R799
R800
R801
R802
R803
R804
R805
R806
R807
R808
R809
R810
R811
R812
R813
R814
R815
R816
R817
R818
R819
R820
R821
R822
R823
R824
R825
R826
R827
R828
R829
R830
R831
R832
R833
R834
R835
R836
R837
R838
R839
R840
R841
R842
R843
R844
R845
R846
R847
R848
R849
R850
R851
R852
R853
R854
R855
R856
R857
R858
R859
R860
R861
R862
R863
R864
R865
R866
R867
R868
R869
R870
R871
R872
R873
R874
R875
R876
R877
R878
R879
R880
R881
R882
R883
R884
R885
R886
R887
R888
R889
R890
R891
R892
R893
R894
R895
R896
R897
R898
R899
R900
R901
R902
R903
R904
R905
R906
R907
R908
R909
R910
R911
R912
R913
R914
R915
R916
R917
R918
R919
R920
R921
R922
R923
R924
R925
R926
R927
R928
R929
R930
R931
R932
R933
R934
R935
R936
R937
R938
R939
R940
R941
R942
R943
R944
R945
R946
R947
R948
R949
R950
R951
R952
R953
R954
R955
R956
R957
R958
R959
R960
R961
R962
R963
R964
R965
R966
R967
R968
R969
R970
R971
R972
R973
R974
R975
R976
R977
R978
R979
R980
R981
R982
R983
R984
R985
R986
R987
R988
R989
R990
R991
R992
R993
R994
R995
R996
R997
R998
R999
R1000

```

**Multivariate  
statistische  
Analysen**

## Akustisch optimale Wertebereiche – Analysebeispiel



→ Gute Beläge konsistent stark durch gute Entlüftung geprägt!

**Achtung: Bivariate Betrachtung!!!**

→ **Optimum** unter Berücksichtigung anderer Faktoren **ausdehnen**

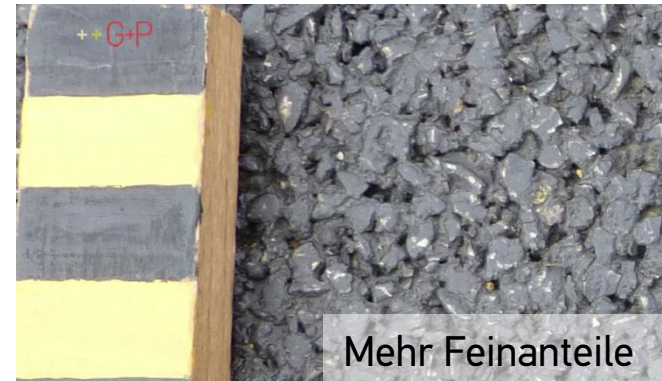
## Zusammenhang Füller-Sand-Akustik - Beispiel

Villnachern, Hauptstrasse, SDA 4-12 (2015)



HR MPK 11.9%, HR BK 12.5%

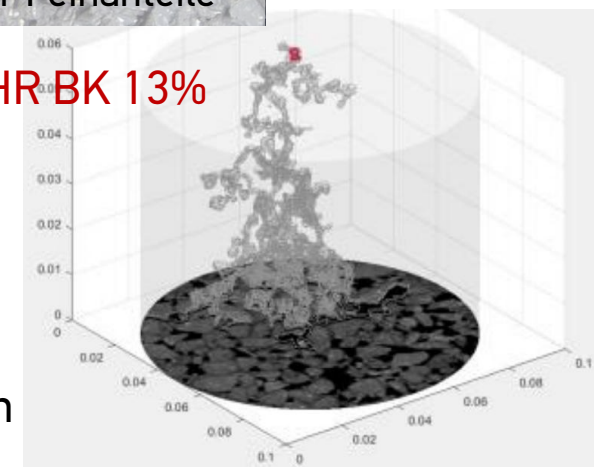
Möhlín, Landstrasse, SDA 4-12 (2015)



HR MPK 11.5%, HR BK 13%

→ **Hohlraumgehalt** im semi-dichten Bereich **nur sekundär**

→ **Füller und Sand** können Zugang zu Hohlräumen blockieren



Quelle: Peeters et al., 2016

## Akustischer Grenzbereich semi-dicht – dicht

- **Wo liegt der Bereich, wo Hohlräume gerade von der Oberfläche zugänglich sind?**

### Kontrolldatensatz

4-er Beläge:

- 31 Wirkungsanalysen
- 47 Rollgeräuschspektren

8-er Beläge:

- 13 Wirkungsanalysen
- 88 Rollgeräuschspektren

### 1. Berechnen des Akustik-Faktors

Akustik-Faktor =

3 x Füller

+

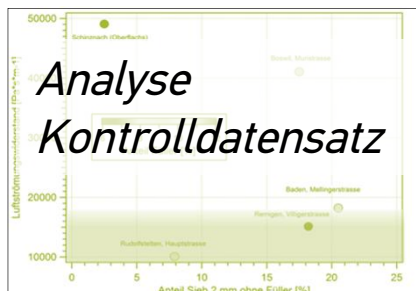
1 x Sand

Akustik-Faktor =

2 x Füller

+

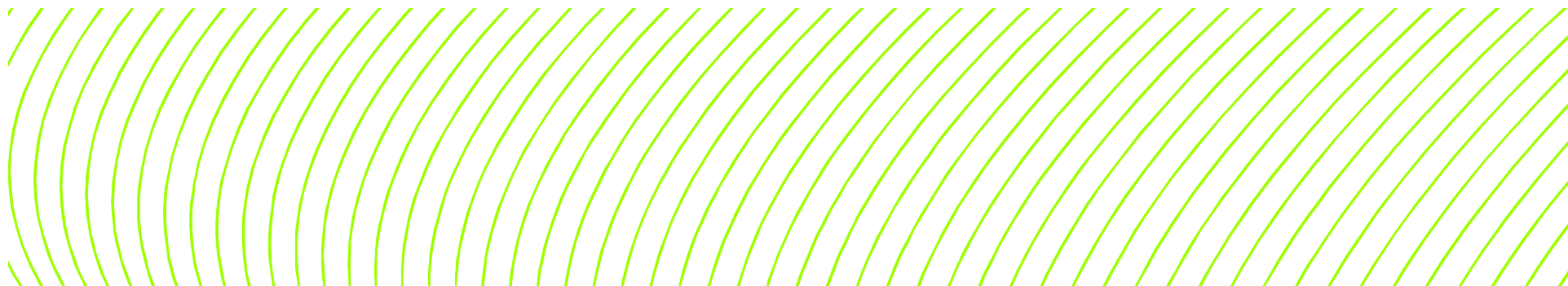
1 x Sand



### 2. Ermitteln des akustischen Grenzbereiches semi-dicht – dicht



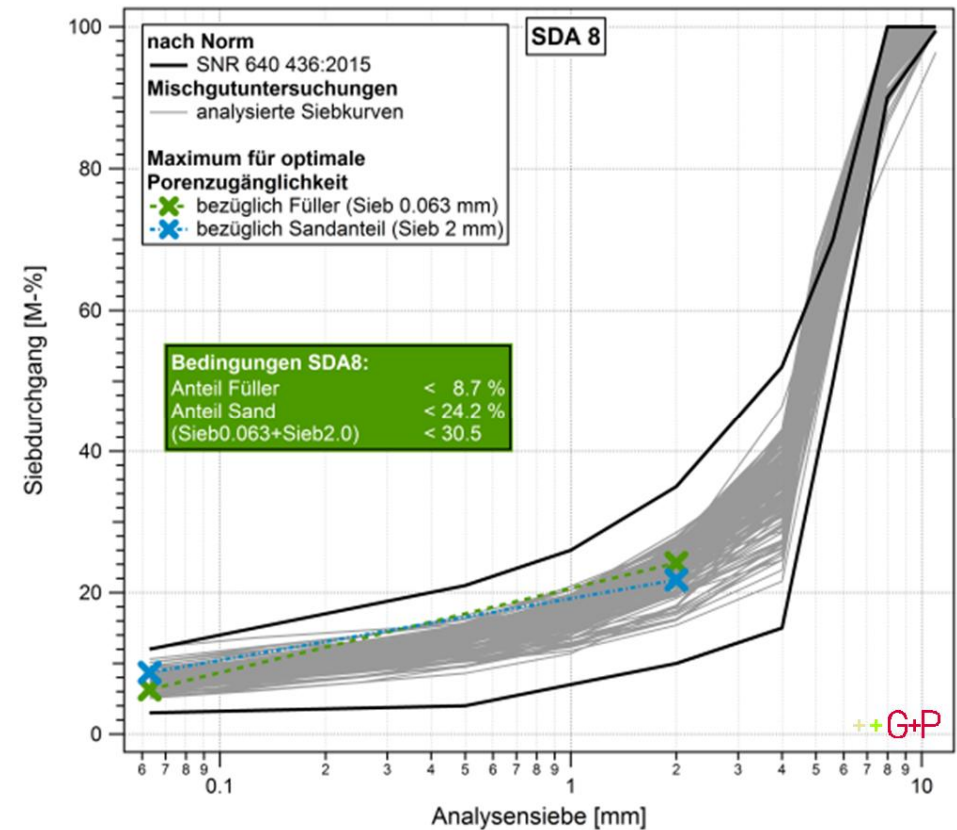
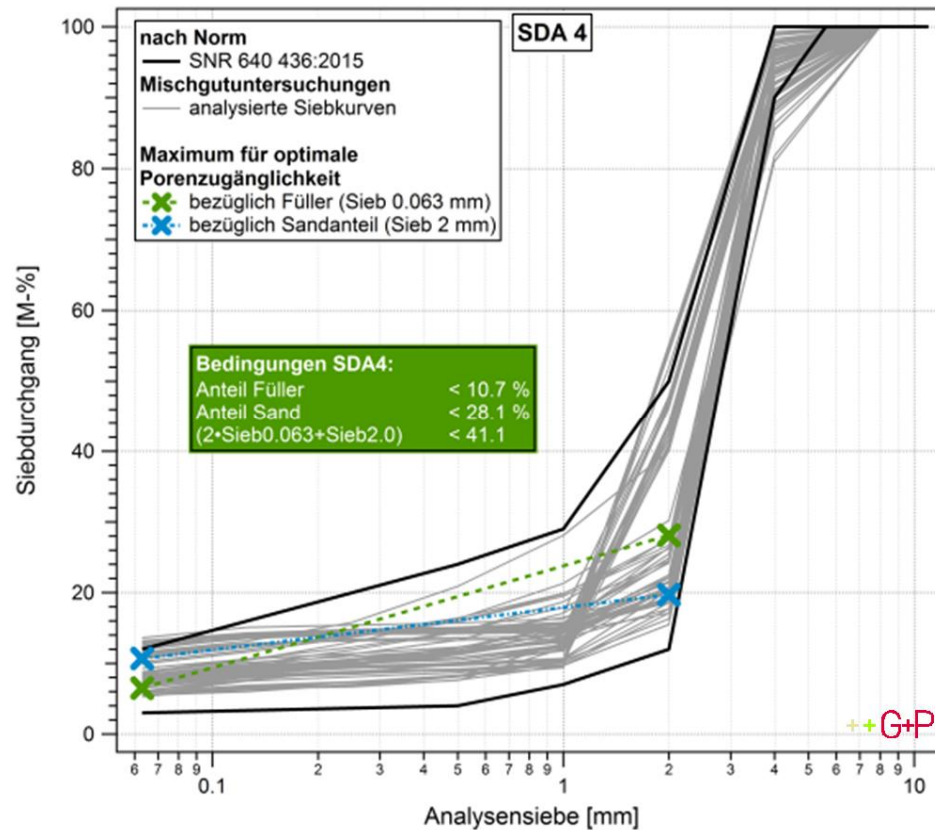
## Schlussfolgerungen



## Synthese

- ✓ Akustisch «gute» Beläge nach 3 Jahren weisen allesamt **zugängliche Hohlräume** auf
- ✓ Akustisch entscheidende Parameter: **Füller- & Sandanteil**
- ✓ Füller beeinflusst Akustik doppelt/dreifach so stark wie Sand
- ✓ Akustischer Grenzbereich semi-dicht – dicht konnte näher bestimmt werden
- ✓ Auch wir Lärmschützer werden die **dauerhafte akustische Leistung erhalten, wenn wir...**

## ...SDA mit akustischen Ausführungsbestimmungen bestellen!



Minimale  
Hohlraumgehalte

MPK: ~12%  
BK: ~10-16%

~13%  
~12-16%