



Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP 2: Labortechnische Bestimmung der Dauerhaftigkeit lärmarmen Beläge

**Paquet de recherche : Revêtements de routes peu-bruyants
à l'intérieur des localités
EP2 : Détermination de la durabilité des couches d'enrobé
phono-absorbant en laboratoire**

**Research package: Low noise road surfaces in urban
situations
EP2: Laboratory assessment of the durability of low noise
pavements**

**IMP Bautest AG
Christian Angst, Dr. sc. techn., dipl. Ing. ETH
Philip Bürgisser, Dr. rer. nat., dipl. Erdw.**

**Müller-BBM AG Schweiz
Thomas Beckenbauer, Dr.-Ing.**

**Forschungsprojekt ASTRA 2010/011 auf Antrag des Bundesamtes für
Strassen (ASTRA)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP 2: Labortechnische Bestimmung der Dauerhaftigkeit lärmarmer Beläge

**Revêtements de routes peu-bruyants à l'intérieur des
localités
EP2 : Détermination de la durabilité des couches d'enrobé
phono-absorbant en laboratoire**

**Research package: Low noise road surfaces in urban
situations
EP2: Laboratory assessment of the durability of low noise
pavements**

**IMP Bautest AG
Christian Angst, Dr. sc. techn., dipl. Ing. ETH
Philip Bürgisser, Dr. rer. nat., dipl. Erwd.**

**Müller-BBM AG Schweiz
Thomas Beckenbauer, Dr.-Ing.**

**Forschungsprojekt ASTRA 2010/011 auf Antrag des Bundesamtes für
Strassen (ASTRA)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Christian Angst, Dr. sc. techn., dipl. Ing. ETH

Projektteam

Philip Bürgisser, Dr. rer. nat., dipl. Erdw.

Thomas Beckenbauer, Dr.-Ing.

Begleitkommission

Präsident

Luzia Seiler

Mitglieder

Sabine Würmli

Hans-Peter Beyeler

Sophie Hoehn

André Magnin

Oliver Jacobi

Benedikt Eberle

Cyril Durussel

Hanspeter Gloor

Nicolas Gouneaud

Martin Bürgi (bis 2014)

Dejan Lukic

Yves Pillonel

KO-Finanzierung des Forschungsprojekts

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Antragsteller

Bundesamt für Strassen (ASTRA)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	9
Summary	11
1 Einleitung	13
1.1 Ausgangslage	13
1.2 Ziele des Forschungsprojektes	14
1.3 Organisation und Beteiligte	16
1.4 Grundidee IMPACT	17
1.4.1 Verkehrsüberrollungen	17
1.4.2 Bestimmung des Rollgeräusches im Labor	19
2 IMPACT Maschinen I und II	21
2.1 Erste Erfahrungen mit dem IMPACT I	21
2.2 Funktionsweise IMPACT II	23
2.2.1 Parameterstudien	24
2.2.2 Folgerungen	32
3 IMPACT III	35
3.1 Konzept und Funktionsweise	35
3.2 Zusammenfassung der Geräteentwicklung	36
3.3 Festlegung des Prüfreifens	37
3.3.1 Reifendimension	37
3.3.2 Reifenprofil	39
3.3.3 Herstellung der Prüfreifen	39
3.3.4 Bezeichnung der hergestellten Prüfreifen	41
3.4 Parameterstudie	42
3.4.1 Auflast	42
3.4.2 Reifendruck	43
3.4.3 Schlupf	43
3.4.4 Temperatur	44
3.4.5 Reifenprofil	45
3.4.6 Festlegung der Versuchsparameter	46
3.5 Herstellung und Verdichtung der Probeplatten	46
3.5.1 Festlegung des Standardverfahrens	46
3.5.2 Validierung der Probeplatten	46
4 Bestimmung des Rollgeräusches im Labor	49
5 Validierung des Prognoseverfahrens	51
5.1 Wahl der Deckschichten	51
5.2 Messprogramm	52
5.3 Ergebnisse	52
5.3.1 Luftströmungswiderstand	52
5.3.2 Schallabsorption	55
5.3.3 Texturwerte	55
5.3.4 Visuelle Aufnahme der Probeplatten	61
5.3.5 SPERoN-Modellierung	65
5.4 Zusammenfassung der Validierung	67
5.4.1 Herstellung der Platten	67
5.4.2 Akustische Dauerhaftigkeit	67

6	Folgerung und Ausblick.....	69
6.1	Folgerungen.....	69
6.2	Ausblick.....	70
	Anhänge.....	71
	Glossar.....	75
	Literaturverzeichnis.....	77
	Projektabschluss	79
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	83

Zusammenfassung

Lärmindernde Beläge, welche nach dem Einbau sehr wirksam sind, verlieren leider oft innert weniger Jahre ihre akustischen Eigenschaften. Diese Erkenntnis aus früheren nationalen wie auch internationalen Forschungsarbeiten führte zur Fokussierung der weiteren Forschung auf das Thema der Dauerhaftigkeit der lärmarmen Beläge. Dabei sind sowohl die mechanische wie auch die akustische Dauerhaftigkeit von grosser Bedeutung. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich ausschliesslich mit der akustischen Dauerhaftigkeit.

Als Ursache für den Verlust der akustischen Eigenschaften werden Veränderungen in der Poren- und Oberflächentextur gesehen. Um Strassenoberflächen mit möglichst dauerhaften, akustischen Eigenschaften zu erstellen, ist eine gezielte Optimierung der Mischgut-Rezeptur unumgänglich. Eine solche Optimierung ist auf eine fein modulierbare Laborprüfung angewiesen, mit welcher die akustische Dauerhaftigkeit untersucht werden kann. Eine dafür geeignete Prüfmethode ist zum heutigen Zeitpunkt nicht vorhanden. Das vorliegende Forschungsprojekt soll eine bereits im Prototyp entwickelte Prüfmaschine IMPACT anwenden und die Prüfparameter optimieren. Gelingt es, dank dieser neuen Methode, relevante Aussagen zur akustischen Dauerhaftigkeit eines Belages zu ermitteln, so kann die Entwicklung lärmarmen Strassenbeläge wesentlich beschleunigt werden. Da der Einbau von Erprobungsstrecken sehr aufwändig und kostspielig ist, bietet eine Laboruntersuchung im Zeitraffer grosse Vorteile.

Die Ziele der Arbeit wurden im Rahmen der Ausschreibung wie folgt festgelegt:

- Festlegung der Prüfparameter für die labortechnische Beanspruchung von Platten
- Um das Langzeitverhalten im Zeitraffer zu simulieren, ist die Oberflächenstruktur derart zu beanspruchen, dass weder Spurrinnen noch Abdrücke der Reifen-Profilklötze erzeugt werden. Die Oberfläche des Prüfkörpers soll im Labor praxisnah und vollflächig beansprucht werden, um die gleichen Mechanismen der Veränderungen der Oberfläche nachzubilden, wie sie in der Praxis entstehen.
- Verwendung üblicher oder neuer Laborprüfverfahren. Die Prüfmethode soll mit Mischgutmengen durchführbar sein, welche im Labor mit üblichen Mischern hergestellt werden können. Übliche Labormischer sind in der Lage Chargen von ca. 50 bis 80 kg zu mischen. Für grössere Mengen sind spezielle Mischer erforderlich. Die Verdichtung soll gemäss SN 670 433 mit einer Stahl-Glattmantelwalze erfolgen. Für die eigentliche mechanische Beanspruchung gibt es keine geeigneten Prüfgeräte auf dem Markt.
- Validierung
Die Prüfmethode wird anhand der Begleitung und des Monitorings von Pilotstrecken validiert. Ebenfalls werden Platten aus dem EP1 sowie Prüfkörper (Belagsausschnitte) untersucht, welche aus den Pilotstrecken ausgebaut wurden.

Im Verlauf der Arbeiten musste erkannt werden, dass der zu Beginn eingesetzte Prototyp der Prüfmaschine IMPACT II (**I**nvestigation **M**achine for **P**avement **AC**oustic **T**ic Durability) wesentliche, konstruktive Mängel aufwies, welche dazu führten eine komplett neue Prüfmaschine (IMPACT III) zu bauen. Dies brachte zeitliche Verzögerungen mit geringen Mehrkosten für das Projekt, denn die eigentliche Entwicklung der Prüfmaschine war nicht Gegenstand der Zielsetzung und wurde von IMP finanziert. Erfreulich ist, dass mit dem IMPACT III nun ein Gerät zur Verfügung steht, mit welchem die wesentlichen Parameter nachvollziehbar und präzise variiert werden können. Das Gerät hat in mehreren Mio. Überrollungen seine Zuverlässigkeit und Funktionstauglichkeit unter Beweis gestellt.

Dem verwendeten Prüfreifen kommt eine zentrale Bedeutung zu. Dieser soll nicht nur ein optimales Profil aufweisen, welches zu einer gleichmässigen und vollflächigen Beanspruchung der Prüfkörper-Oberfläche führt, sondern er soll auch dauerhaft verfügbar sein. Es konnte eine Lösung mit einem Reifenhersteller gefunden werden, mit welcher ein geeignetes Reifenprofil in der erforderlichen Dimension in gleichbleibender Gummimischung zur Verfügung steht.

Das in der Reifen-Fahrbahn-Kontaktfläche entstehende Rollgeräusch lässt sich im Labor nicht direkt messen, da die Antriebsmotoren zu laut sind. Eine Abkapselung des Reifens würde konstruktive Massnahmen erfordern, welche die Ausmasse der Prüfmaschine extrem anwachsen liesse. Dies würde zu einer Rundlauf-Anlage mit einem Durchmesser von mehreren Metern führen. Aus diesem Grunde stützt sich die IMPACT-Methode auf die rechnerische Bestimmung der Rollgeräusche, welche aufgrund von physikalischen Messungen an der Belagsoberfläche erfolgt. Zur Berechnung des Rollgeräusches wurde die Software SPERoN [26] ausgewählt. Abklärungen vor Beginn des Forschungsprojektes zeigten, dass eine Anwendung der SPERoN-Software im Labor möglich ist

SPERoN (Statistical Physical Explanation of Rolling Noise) ist ein mathematisches Simulationsmodell, welches aus Kennwerte der Oberfläche (Textur, Luftströmungswiderstand, akustische Adsorption und mechanische Impedanz) die akustischen Eigenschaften eines Decksbelages berechnen kann. Dabei greift das Programm auf eine Datenbank mit ca. 30 verschiedenen Reifen, welche bezüglich ihrer dreidimensionalen Profilgeometrie und ihrer struktur-dynamischen Eigenschaften vermessen wurden. So werden im SPERoN-Simulationsmodell nicht nur die Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche berücksichtigt, sondern auch die unterschiedlichen Reifen und deren Reaktion auf Unterschiede der Fahrbahnoberfläche. Die bisherigen Anwendungen des Modells basierte auf in situ-Messungen, die für die Anwendung im Labor erforderlichen Anpassungen wurden im Rahmen eines anderen Forschungsprojektes (EP 4) durchgeführt.

Die durchgeführte Parameterstudie umfasste die folgenden Prüfparameter: Reifeninnendruck, Auflast, Reifenprofil, Schlupf und Prüftemperatur. Es wurden zwei Mischgutsorten SDA 4 C und SDA 8B untersucht. Die Veränderungen der Textur der Oberfläche wurden durch Messungen des Luftströmungswiderstandes, der Textur und der akustischen Absorption festgehalten. Dabei wurden im Labor mittels Walz-Segmentverdichter hergestellte Probekörper verwendet

Sowohl die einzelnen Parameter Luftströmungswiderstand und Texturtiefe wie auch die mittels SPERoN berechneten Schallpegel verändern sich in Abhängigkeit der Anzahl Überrollungen in ähnlicher Art und Weise, wie dies in der Praxis beobachtet wurde. Die Entwicklung des Rollgeräusches ist bei der Probeplatte mit dem gröberen Mischgut (SDA 8) deutlich erkennbar, bei der Probeplatte mit dem feinkörnigeren Mischgut (SDA 4) liegt die Zunahme des Schallpegels innerhalb der Messgenauigkeit.

Bei der Beanspruchung von Asphalt-Platten im IMPACT ist grundsätzlich die gleiche Entwicklung der akustischen Eigenschaften wie in der Praxis zu beobachten. Allerdings entsprechen die erzielten akustischen Veränderungen nicht den ursprünglichen Erwartungen, zudem war eine sehr hohe Anzahl Belastungszyklen erforderlich.

Mit dem IMPACT III steht nun ein neues Gerät zur Verfügung, mit welchem die wesentlichen Parameter präzise variiert werden können; es hat in mehreren Millionen Überrollungen seine Zuverlässigkeit unter Beweis gestellt. Der erzielte Zeitraffer-Effekt ist allerdings noch zu bescheiden und sollte durch weitere Abklärungen unter Berücksichtigung weiterer Alterungsvorgänge (Bewitterung, Temperaturzyklen, UV-Strahlung etc) verbessert werden.

Résumé

Les enrobés phono-absorbants, très efficaces directement après leur pose, perdent malheureusement souvent leurs propriétés acoustiques en quelques années seulement. Fort de ce constat issu de travaux de recherche précédents au niveau national et international, l'attention du présent projet de recherche a été mis sur la durabilité des enrobés phono-absorbants. Dans ce contexte, la durabilité mécanique aussi bien que la durabilité acoustique sont d'une importance cruciale. La présente partie de la recherche ne concerne que la durabilité acoustique des enrobés.

On considère des modifications de la texture des vides et de la surface des enrobés comme étant à l'origine de la dégradation des propriétés phono-absorbantes. Afin d'améliorer la durabilité des propriétés acoustiques des surfaces des routes, une optimisation spécifique de la recette des enrobés est indispensable. Une telle optimisation nécessite des essais en laboratoire finement modulables et qui permettent d'évaluer la durabilité des enrobés. Pour ceci, actuellement, aucune méthode adéquate n'existe encore. L'objectif du présent projet de recherche est l'utilisation d'un prototype de l'appareil « IMPACT » et d'en optimiser les paramètres d'essai. Si cette nouvelle méthode d'essai permettait une évaluation pertinente sur la durabilité acoustique d'un enrobé, elle permettrait d'accélérer considérablement le développement des enrobés phono-absorbants. Considérant les efforts et les coûts nécessaires pour la pose d'une planche d'essai en grandeur nature, un essai laboratoire accéléré a des avantages incontestables.

L'appel d'offre pour le présent travail de recherche a défini les objectifs suivants :

- Déterminer les paramètres d'essai pour la sollicitation de plaques d'essai en laboratoire
- Afin de simuler en accéléré le comportement de la surface à long terme, elles doivent être soumises à une sollicitation mécanique sans former d'ornières ni de traces de profil de pneu. La surface de l'éprouvette doit être soumise en laboratoire à une sollicitation proche de la réalité et se faire en pleine surface afin de reproduire les mêmes mécanismes qui modifient la texture de la surface dans le monde réel.
- Utilisation de méthodes laboratoire usuelles ou nouvelles. La méthode d'essai doit être applicable avec des quantités de matériaux qu'on peut fabriquer en laboratoire avec un malaxeur standard. Les malaxeurs standards de laboratoire permettent de fabriquer des gâchées d'enrobé de 50 à 80kg. Pour des gâchées plus importantes, des malaxeurs spéciaux sont nécessaires. Le compactage de l'enrobé doit se faire à l'aide d'un rouleau en acier selon SN 670 433. Pour la sollicitation mécanique proprement dite, aucun appareillage n'existe sur le marché.
- Validation
La méthode d'essai est validée à l'aide du suivi et du monitoring de planches d'essai. De même, des plaques fabriquées pour le projet EP1, ainsi que des plaques prélevées dans les planches d'essais seront analysées.

Au cours de l'avancement des travaux de recherche il s'est avéré, que l'appareil utilisé au début, le prototype IMPACT II (Investigation Machine for Pavement **AC**ousti**Tic** Durability), présentait des défauts de construction importants. Le développement d'un tout nouvel appareil (IMPACT III) a été nécessaire. Cette adaptation a provoqué un certain retard du projet ainsi que des coûts supplémentaires mineurs. En effet, le développement de l'appareil d'essai ne faisait pas partie du projet de recherche et a été financé par IMP. Il est d'autant plus réjouissant, qu'avec l'IMPACT III, on dispose aujourd'hui d'un appareil permettant de valider les paramètres les plus importants d'une

manière répétable et précise. L'appareil a démontré sa fiabilité et sa fonctionnalité pendant plusieurs millions de passages de roue.

Les caractéristiques du type de pneu utilisé sont cruciales. Il doit avoir non seulement un profil optimal, permettant une sollicitation régulière et sur toute la surface de l'éprouvette, mais il doit être également disponible sur le long terme. Une solution a été trouvée avec un fournisseur, garantissant un profil et des dimensions de pneu appropriés, le tout avec un mélange de gommages constant.

En laboratoire, à cause du bruit des moteurs, le bruit de roulement du pneu ne peut pas être mesuré directement à l'interface de la roue et la surface de la chaussée. Une isolation acoustique de la roue nécessiterait de telles mesures, que les dimensions de l'appareillage seraient démesurées. En effet, une installation circulaire avec un diamètre de roulement de plusieurs mètres serait nécessaire. Pour cette raison, la méthode IMPACT utilise un modèle mathématique pour calculer le bruit de roulement en se basant sur des mesures physiques de la surface de la chaussée. Le bruit de roulement est calculé à l'aide du logiciel SPERoN [26]. Une vérification de l'aptitude avant le début du projet de recherche a confirmé la faisabilité de l'application du logiciel SPERoN en laboratoire.

SPERoN (Statistical Physical Explanation of Rolling Noise) est un modèle de simulation mathématique qui permet de calculer les propriétés acoustiques d'une couche de roulement sur la base de mesures des propriétés de surface (texture, résistance à la perméabilité à l'air, absorption acoustique, impédance mécanique). Le logiciel comprend une base de données avec env. 30 différents types de pneu, regroupant les informations concernant leur géométrie de profil en 3 dimensions et leurs caractéristiques structure-dynamiques. Ainsi, le logiciel SPERoN ne prend pas seulement en compte les propriétés de la surface de la couche de roulement, mais également les différents types de pneu et leur comportement en cas de modification des surfaces de chaussée. Jusqu'à présent, l'application du modèle SPERoN se basait sur des mesures in situ. Les adaptations nécessaires pour une utilisation en laboratoire ont été développées dans le projet de recherche EP4.

L'étude des paramètres effectuée comprend les paramètres d'essai les suivants : la pression du pneu, la charge, le profil, le glissement et la température à l'essai. Deux sortes d'enrobés SDA 4C et SDA 8B ont été analysées. L'évolution de la texture de la surface a été analysée par la mesure de la résistance à la perméabilité à l'air, de la texture et de l'absorption acoustique. Les éprouvettes utilisées pour l'étude ont été fabriquées en laboratoire à l'aide de compacteur de plaque.

Les paramètres individuels, tels que la résistance à la perméabilité à l'air et la profondeur de texture, mais également le niveau acoustique calculé par SPERoN, évoluent en fonction du nombre de passages de roue d'une manière similaire aux observations faites dans la réalité. L'évolution du bruit de roulement est clairement observée dans le cas de l'enrobé à grains grossiers (SDA 8), tandis que pour l'enrobé à grains fins (SDA 4), l'augmentation du niveau de bruit reste dans l'ordre de la précision de la méthode.

Dans l'ensemble, on observe la même évolution des propriétés acoustiques lors de la sollicitation des éprouvettes en enrobé à l'aide de l'appareil IMPACT que dans la réalité. Pourtant, l'évolution observée ne correspond pas aux attentes initiales, de plus, un très grand nombre de passages de roue a été nécessaire.

Le nouvel appareil IMPACT III permet de varier avec précision les différents paramètres les plus importants ; il a prouvé sa fiabilité lors de plusieurs millions de cycles de passage de roue. Néanmoins, l'effet d'évolution accéléré étant encore trop faible, des investigations complémentaires seront nécessaires pour l'améliorer, notamment en tenant compte d'autres paramètres de vieillissement (conditions météorologiques, cycles de température, rayonnement UV, etc.).

Summary

Low noise pavements exhibit a very good acoustic performance immediately after their construction, however their acoustic durability is limited to just a few years. Based on the findings of international and national research, further research work has been focused on studying the durability of low noise pavements. The acoustic durability of low noise pavements and the mechanical long-term properties are of major importance. This report solely addresses acoustic durability.

The loss of acoustic qualities can be explained by changes in the pore and surface structures. For the construction of road surfaces with preferable durable acoustic properties, a specific optimisation of the asphalt mix design is essential. Such optimisation depends on a finely modulated laboratory test in which acoustic durability can be examined. A suitable test method does not exist at present. This project will use the already developed prototype of the testing machine IMPACT for the optimisation of the testing parameters. If using this method relevant conclusions can be drawn on the acoustic durability of a pavement it will be possible to speed up the development of low noise pavements significantly. Laying test tracks to study the long-term development of acoustic properties is very time intensive and costly. A speeded up laboratory investigation method would therefore offer many advantages.

The aims of this research project were defined in the framework of the tender as follows:

- Definition of test parameters for loading plates in the lab
- For simulating the long-term behavior in fast motion the surface structure is to be loaded in such a way that neither rutting nor tread block marks are generated. The whole surface of the test specimen should be loaded uniformly and as realistically as possible to simulate the same surface change mechanisms as those that occur in the real world
- Use of conventional or new laboratory test methods. The test method should be carried out with quantities of mix which can be prepared in the laboratory using conventional mixers. With common laboratory mixers it is possible to produce a batch of about 50 to 80 kg. For larger quantities, special mixers are required. Compaction should take place with a steel roller compactor in compliance with SN 670 433. For generating the actual mechanical load there is no suitable test equipment available on the market
- Validation: The testing method is validated by monitoring the pilot tracks. In addition to this, plates from EP1 as well as test plates extracted from the pilot tracks are examined and compared.

During the course of the work it turned out that the IMPACT II prototype (**I**nvestigation **M**achine for **P**avement **A**cous**T**ic Durability) had substantial technical deficiencies. Therefore a completely new test machine - IMPACT III - was built. This new construction led to a delay in the project but caused only minor additional costs as the development of the testing machine was not part of the project and was financed by IMP. A positive result of the new IMPACT III development is that a testing machine is now available that enables a reproducible and precise adjustment of the main parameters. The machine proved its functionality and reliability in several million roll overs.

The properties of the test tyre are most important for the success of the project. The tyre should not only feature an ideal tread pattern for distributing the load over the entire surface of the test specimens, it should also be available on a permanent basis. In cooperation with a tyre manufacturer a test tyre was produced with a special tread pattern featuring the required dimensions and constant rubber properties.

It is not possible to directly measure the noise generated from the interaction between tyre and road surface, as the drive motors are too loud. An encapsulation of the tyre would require structural measures that would increase the dimensions of the testing machine significantly. The encapsulation would lead to a circular test track with a diameter of several metres. The IMPACT method therefore relies on calculations of the physical properties to determine the noise of the tyre on the pavement surface. The software used to calculate the tyre noise was the SPERoN [26]. Evaluations performed prior to the study showed that the SPERoN software can be applied in a laboratory environment.

With the mathematical simulation program SPERoN (Statistical Physical Explanation of Rolling Noise) it is possible to calculate the acoustic properties of a wearing course using the surface parameters (texture, air flow resistance, acoustic absorption and mechanical impedance). In doing so, the program draws information from a database where the mechanical properties such as structural dynamics and three-dimensional profile geometry of 30 different car tyres have been measured. Thus in the SPERoN simulation model not only different asphalt surface properties are considered but also the different tyres and how they react to differences in the pavement surface. Until now the applications of the model were based on in situ measurements, the necessary adjustments for use in the laboratory were carried out in a different research project EP4.

The parameter study considered the following test parameters: tyre pressure, load, tread pattern, wheel spin and test temperature. Two mix types SDA 4 C and SDA 8 B were used for the test trail. The changes in the texture of the surface were determined by measuring air flow resistance, texture and acoustic absorption. Test specimen plates produced in the laboratory using roller sector compactor were used for this purpose.

The individual parameters for air flow resistance and texture depth as well as the noise levels calculated by SPERoN change as a function of the number of roll overs in the same way as observed in reality. The increase in rolling noise is clearly detectable on the test plate with the coarser graded mixture (SDA 8), on the test plate with the finer graded mixture (SDA 4) the increase in the noise level is within the measurement tolerance.

The same development in the acoustic properties of the asphalt plates of IMPACT III is observed as in real life experiments. However, the observed acoustic changes are not those initially expected. Moreover, it was also necessary to carry out a very large number of load cycles.

IMPACT III provides a new piece of equipment with which it is possible to accurately adjust the main parameters. It has proved its worth as a reliable tool during several million roll overs. The achieved fast-motion effect is however still not sufficient and needs to be further optimised by taking additional aging mechanisms into account (weathering conditions, temperature cycles, , UV-irradiation etc.)

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Das 1983 in Kraft gesetzte Umweltschutzgesetz USG [1] wird auf der Basis der Lärmschutzverordnung [2] umgesetzt. In dieser Lärmschutzverordnung LSV wurden bereits 1986 Termine festgelegt, bis wann die Strasseneigentümer (Bund, Kantone, Gemeinde) die Vorgaben des USG realisiert haben sollten. In der Revision des LSV 2004 wurden die Termine neu definiert und somit die Frist zur Umsetzung verlängert.

Parallel dazu wurden in Forschungsarbeiten die bestehenden Möglichkeiten zur Bekämpfung des Strassenlärms europaweit erfasst und kommentiert [3]. Es zeigte sich rasch, dass lärmarme Beläge LAB die wirksamste Massnahme darstellen, denn Lärmschutzwände lassen sich innerorts häufig nicht realisieren und Lärmschutz-Fenster haben eine beschränkte Wirkung.

Neben der Initiative einiger Bauunternehmungen und einzelner Bauherren wurde 2004 ein erstes Forschungspaket gestartet [4,5]. Dabei wurden Teststrecken mit unterschiedlichen Mischgutsorten in der ganzen Schweiz eingebaut und untersucht.

Über 6 Jahre erfolgten Lärmmessungen sowie Messungen der Oberflächeneigenschaften, um die Entwicklung der Lärmreduktion zu beobachten und allenfalls zu erklären.

Aus den vorausgegangenen Forschungen und Literatur-Studien ergaben sich folgende Zwischenergebnisse:

Semidichte Beläge:

Dichte Asphaltmischungen haben zwar eine lange Nutzungsdauer, sind jedoch akustisch wenig leistungsfähig. Offenporige Asphalte hingegen sind (zumindest in den ersten Jahren) akustisch sehr wirksam, weisen jedoch oft infolge von Kornausbrüchen eine verkürzte Nutzungsdauer. Dieser Zusammenhang ist in der Abb.1 dargelegt. Im Sinne eines Kompromisses zwischen akustischer Leistung und Dauerhaftigkeit sollte der Fokus der weiteren Entwicklungen bei „semi-dichten“ Asphalten liegen.

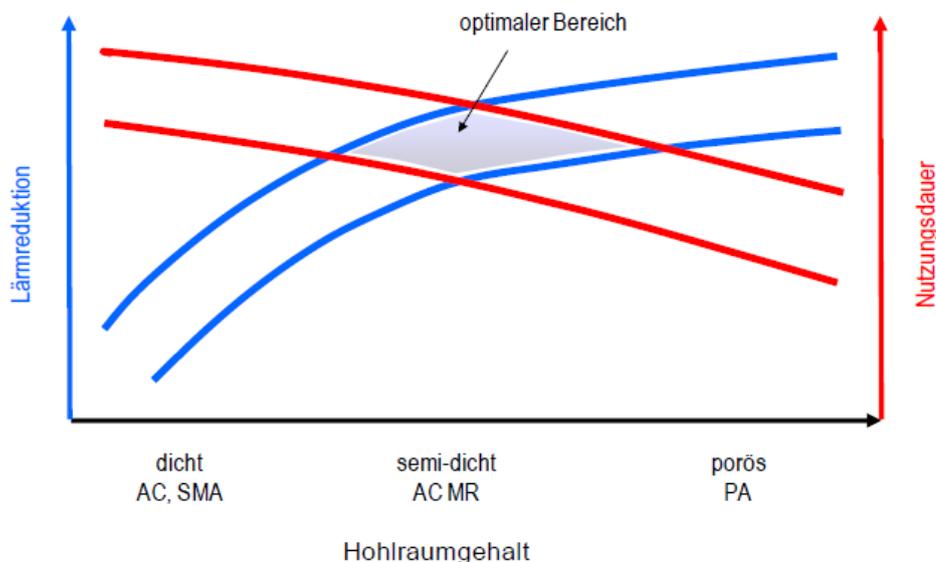


Abb.1 Zusammenhang zwischen Hohlraumgehalt und akustische Leistung bzw. Dauerhaftigkeit (aus [5])

Dauerhaftigkeit:

In [5] wurde – übereinstimmend mit ausländischen Erfahrungen – festgestellt, dass die Lärmreduktion im Verlaufe der Zeit mehr oder weniger rasch abnimmt. Ein weiterer Schwerpunkt der Forschung wurde auf die Dauerhaftigkeit der lärmarmen Deckschichten, sowohl mechanisch wie auch akustisch gelegt.

1.2 Ziele des Forschungsprojektes

Im Jahr 2003 wurden vom ASTRA zwei Forschungsprojekte zum Thema „Lärmarme Beläge in Niedergeschwindigkeitsbereich“ initiiert. Darin wurden lärmarme Beläge anhand von ausgewählten bestehenden Strecken und neu eingebauten Teststrecken in der Schweiz untersucht [34,35]. Die positiven Erfahrungen aus diesen Projekten haben die Bundesämter ASTRA und BAFU dazu bewogen, ein Forschungspaket zum Thema „Lärmarme Beläge innerorts“ zu starten. Dies soll Kontinuität bei der Behandlung der Fragestellungen zu lärmarmen Belägen gewährleisten [25].

Ziel des gesamten Forschungspaketes „Lärmarme Beläge innerorts“ ist es [25],

den Einsatz lärmarmen Strassenbeläge zu fördern und einen weiteren Entwicklungsschub bei diesen Belägen zu bewirken;

die Akzeptanz gegenüber lärmarmen Belägen zu fördern und mit den betroffenen Strasseneigentümern eine Win-Win-Situation zu erreichen.

Um diese Ziele zu erreichen wurden mehrere Einzelprojekte (EP) definiert, unter anderem auch das EP 2 „Labortechnische Bestimmung der Dauerhaftigkeit lärmarmen Beläge“ mit folgenden Zielen und Randbedingungen:

Festlegung der Prüfparameter für die labortechnische Beanspruchung von Platten

Um das Langzeitverhalten im Zeitraffer zu simulieren, ist die Oberflächenstruktur derart zu beanspruchen, dass weder Spurrinnen noch Abdrücke der Reifen-Profilklötze erzeugt werden. Die Oberfläche des Prüfkörpers soll im Labor praxisnah und vollflächig beansprucht werden, um die gleichen Mechanismen der Veränderungen der Oberfläche nachzubilden, wie sie in der Praxis entstehen. Es soll eine Laborprüfmethode entwickelt werden, welche eine Aussage über die akustische Dauerhaftigkeit einer semidichten Asphaltdeckschicht unter rollendem Verkehr ermöglicht

Verwendung üblicher oder neuer Laborprüfverfahren

Die Prüfmethode soll mit Mischgutmengen durchführbar sein, welche im Labor mit üblichen Mischern hergestellt werden können. Übliche Labormischer sind in der Lage Chargen von ca. 50 bis 80 kg zu mischen. Für grössere Mengen sind spezielle Mischer erforderlich. Die Verdichtung soll gemäss EN 12697-33 mit einer Stahl-Glattmantelwalze erfolgen. Für die eigentliche mechanische Beanspruchung gibt es keine geeigneten Prüfgeräte auf dem Markt.

Validierung

Die Prüfmethode wird anhand der Begleitung und des Monitorings von Pilotstrecken validiert. Ebenfalls werden Platten aus dem EP1 sowie Prüfkörper (Belagsausschnitte) untersucht, welche aus den Pilotstrecken ausgebaut wurden. Vergleich mit der Praxis: die entwickelte Methode soll durch vergleichende Untersuchungen des gleichen Mischgutes im Labor und auf einer Teststrecke überprüft werden.

Um den Nutzen des Forschungsprojektes zu erläutern, wird das Vorgehen zur Erprobung von Asphalt-Deckschichten mit akustischen Eigenschaften beschrieben, wie es heute weltweit angewendet wird.

- Idee, Hypothese
Aufgrund empirischer Erfahrungen und/oder auf der Basis theoretische Ansätze wird eine Idee beschrieben.
- Mischgutkonzept
Zur Umsetzung der Hypothese wird die Rezeptur des Mischgutes erarbeitet und es wurden gewisse Parameter im Labor untersucht. Dies können zum Beispiel sein: Hohlraumgehalt der verdichteten Mischung, akustische Absorption etc.
- Teststrecke
Konnte die Hypothese im Labor umgesetzt werden und ein Bauherr von der Nützlichkeit überzeugt werden, so kann eine Teststrecke gebaut werden. Um repräsentativ zu sein hat diese mindestens 100 m lang zu sein und sollte auf einem stark befahrenen Objekt realisiert werden. Der Bauherr muss also auf einem stark befahrenen Teilstück seines Strassennetzes bereit sein ein Risiko einzugehen.
- Monitoring
Durch jährliche Lärmmessungen wird das Verhalten beobachtet. Auf diese Weise erhält man innert 3-4 Jahren eine Information über ungeeignete Konzepte; der Nachweis der Eignung eines erfolgreichen Konzeptes dauert hingegen deutlich länger. Heute werden akustische Gebrauchsdauer von 10 Jahren angestrebt; nach 6-7 Jahren lässt sich durch jährliche Messungen abschätzen, ob das Ziel (10 Jahre) erreichbar ist.

Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass die kombinierte Beanspruchung der Deckschicht (PW- / LW-Verkehr; Witterung) der Praxis entspricht. Die Nachteile sind folgende:

- Hohe Kosten für Herstellung der Teststrecke und der jährlichen Messungen
- Langdauerndes Evaluationsverfahren (mehrere Jahre)
- Beschränkte Aussagekraft und beschränkte Vergleichbarkeit mit anderen Teststrecken, da die Verkehrsbelastung und die Witterungsverhältnisse von Teststrecke zu Teststrecke unterschiedlich sind.

Eine Vielzahl bautechnischer Prüfungen ermöglichen Qualitätskontrollen vor und nach dem Einbau; sie charakterisieren den Neuzustand. Es sind ebenfalls genügend Prüfungen normiert und standardisiert, um eine Prognose des Wärmeverhaltens (Widerstand gegenüber Verformungen) und des Kälteverhaltens (Risse), wie auch des Ermüdungsverhaltens vorhanden.

Was bis heute fehlt ist ein Prüfverfahren, mit welchem die akustische Dauerhaftigkeit zuverlässig, rasch und kostengünstig prognostiziert werden kann. Eine derartige Prüfung bringt gewaltige Vorteile für Bauherren und Bauunternehmungen mit sich.

1.3 Organisation und Beteiligte

Das Forschungspaket „Lärmarme Beläge innerorts“ ist in drei Teilprojekte untergliedert (Abbildung 2):

- TP1: Forschung und Innovation
- TP2: Test und Validierung
- TP3: Langzeitüberwachung

Die Phase 1 im Teilprojekt TP1 beinhaltet fünf Einzelprojekte:

- EP1: Rezepturen für lärmarme Beläge
- EP2: Labortechnische Bestimmung der Dauerhaftigkeit lärmarmen Beläge
- EP3: Betrieb und Unterhalt lärmarmen Beläge
- EP4: Labormethoden für die Bestimmung akustischer Eigenschaften lärmarmen Beläge
- EP5: Verbesserung der Genauigkeit akustischer Messmethoden

Die Phase 2 im Teilprojekt TP1 wurde später gestartet und beinhaltet drei Einzelprojekte:

- EP7: Innovative, lärmarme Beläge für den potentiellen Einsatz in der Schweiz
- EP8: Akustische Wirkung betrieblicher Reinigungsmaßnahmen bei lärmarmen Belägen
- EP10: Sensitivität der akustischen Eigenschaften lärmarmen Beläge aufgrund der Variabilität bei der Herstellung

Der vorliegende Bericht beschreibt die Ergebnisse des „EP2: Labortechnische Bestimmung der Dauerhaftigkeit lärmarmen Beläge“.

Die Einbettung des „EP2“ innerhalb des Forschungspaketes „Lärmarme Beläge innerorts“ und des Teilprojektes „TP1: Forschung und Innovation“ ist in Abb.2 dargestellt.

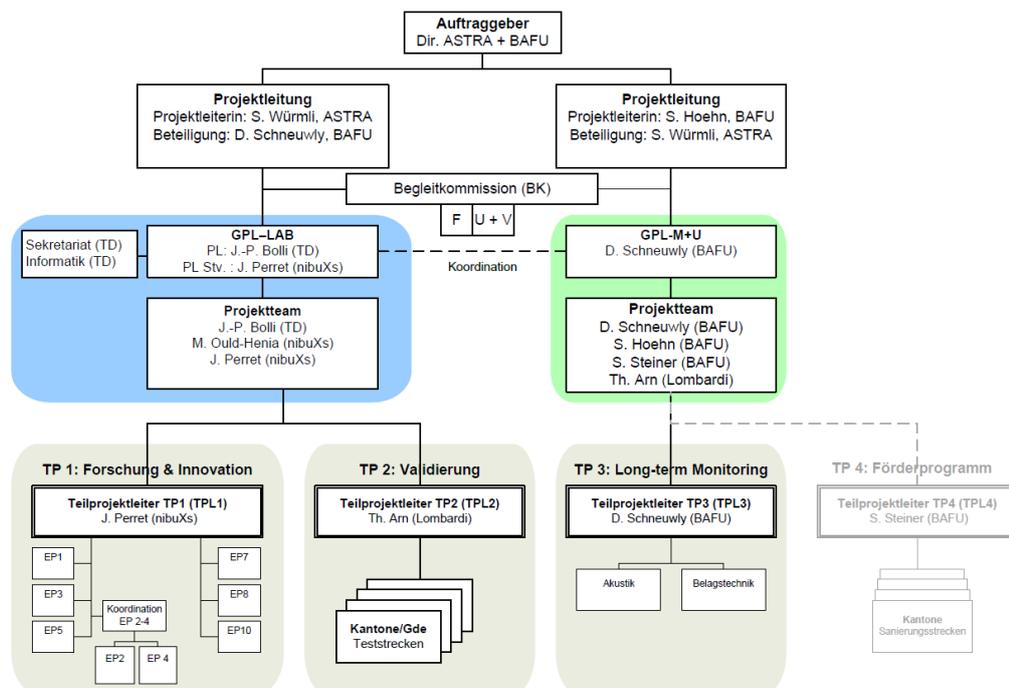


Abb.2 Organisationsstruktur des Forschungspaketes II

1.4 Grundidee IMPACT

Der Name des zur Zielerreichung entwickelten Prüfgerätes leitet sich direkt aus dessen Zweck ab:

Investigation Machine for Pavement ACousTic Durability: IMPACT.

1.4.1 Verkehrsüberrollungen

Eines der Haupterkenntnisse der bisherigen Forschungsarbeiten I [4,5] war die Feststellung, dass bei semi-dichten Asphalt-Deckschichten deren akustische Entwicklung sich vor allem in Abhängigkeit der Anzahl Überrollungen entwickelt und weniger in Abhängigkeit des Alters der Strecken (siehe *Abb.3*). Auch Bendtsen [6] kam in seiner Arbeit zu einem ähnlichen Schluss: Er beobachtete, dass bei Strecken die ein geringes Verkehrsaufkommen aufwiesen die lärmindernden Eigenschaften weniger stark abnahmen, als bei Strecken welche einem höheren Verkehrsaufkommen ausgesetzt wurden. Er postulierte aus den Untersuchungsergebnissen folgendes Modell zur Vorhersage der akustischen Dauerhaftigkeit einer lärmarmen Deckschicht:

$$\Delta L_{\text{Aging}}(A) = (0.25 \times \Delta L_{\text{Age}} \times A) + ((0.75 \times \Delta L_{\text{ADT}} \times \text{ADT} \times 365 \times A) / (10^6 \times N))$$

wobei

ΔL_{Age} Anteil des Alters am Lärmanstieg [dB/Jahr]; Bendtsen gibt hierzu Richtwerte je nach Belagstyp (siehe Tabelle 1)

ΔL_{ADT} Anteil des Verkehr am Lärmanstieg [dB/10⁶ FZ pro Spur]

A Alter des Belags

ADT DTV; Durchschnittlicher Täglicher Verkehr (für beide Richtungen)

N Anzahl der Fahrspuren (für beide Richtungen)

Tabelle 1 Richtwerte für ΔL_{Age} und ΔL_{ADT} aus [6]

Pavement type	ΔL_{Age} [dB/year]	ΔL_{ADT} [dB/1 mil vehicles]
All average	0.58	0.28
DGAC	0.40	0.21
OGAC	0.41	0.26
Thin Open	0.84	0.24
PAC	0.53	0.42

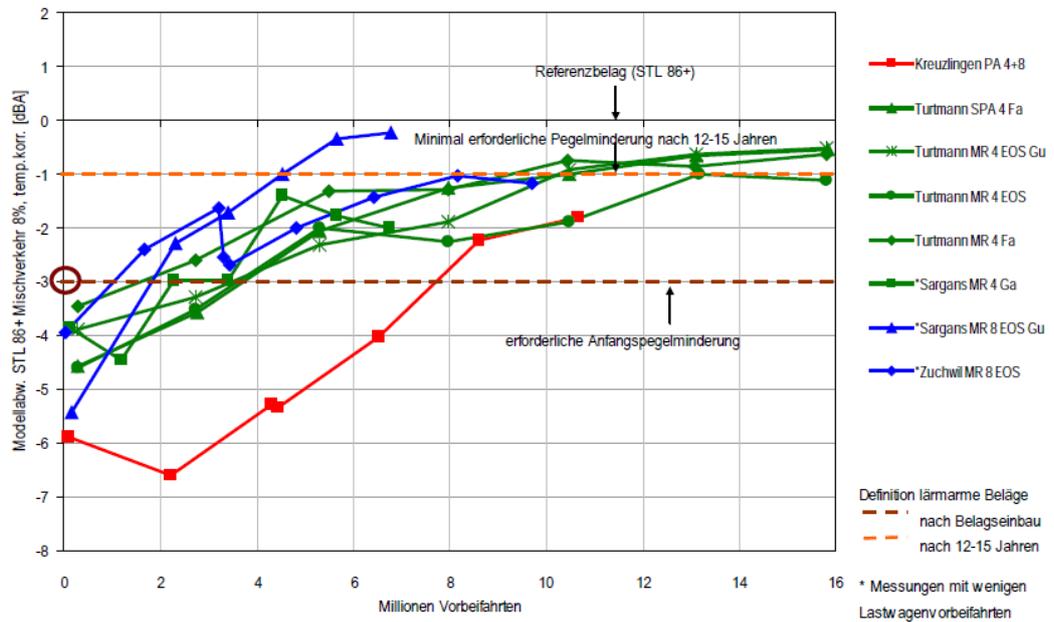


Abb.3 akustische Wirkung lärmarmen Beläge in Abhängigkeit der Überrollungen aus [4]

Im Rahmen des Forschungsauftrages TP 3 „Lärmarme Beläge Innerorts; Langzeitmonitoring“ [10] wurden jährliche CPX-Messungen auf mehreren Teststrecken durchgeführt. Aufgrund der bekannten Verkehrsdaten war es möglich die Entwicklung der akustischen Leistung in Abhängigkeit der Anzahl Überrollungen aufzuzeichnen. In Abb.4 ist die Abnahme des CPX-Wertes in Prozent des Anfangswertes dargestellt. Abgesehen von einigen Ausreißern (Zürich-Oerlikon und Näfels) liegen die Messkurven in einer Umhüllenden. Es ist somit ein klarer Trend der CPX-Werte in Abhängigkeit der Anzahl Überrollungen erkennbar, was die bisherigen Erfahrungen bestätigt.

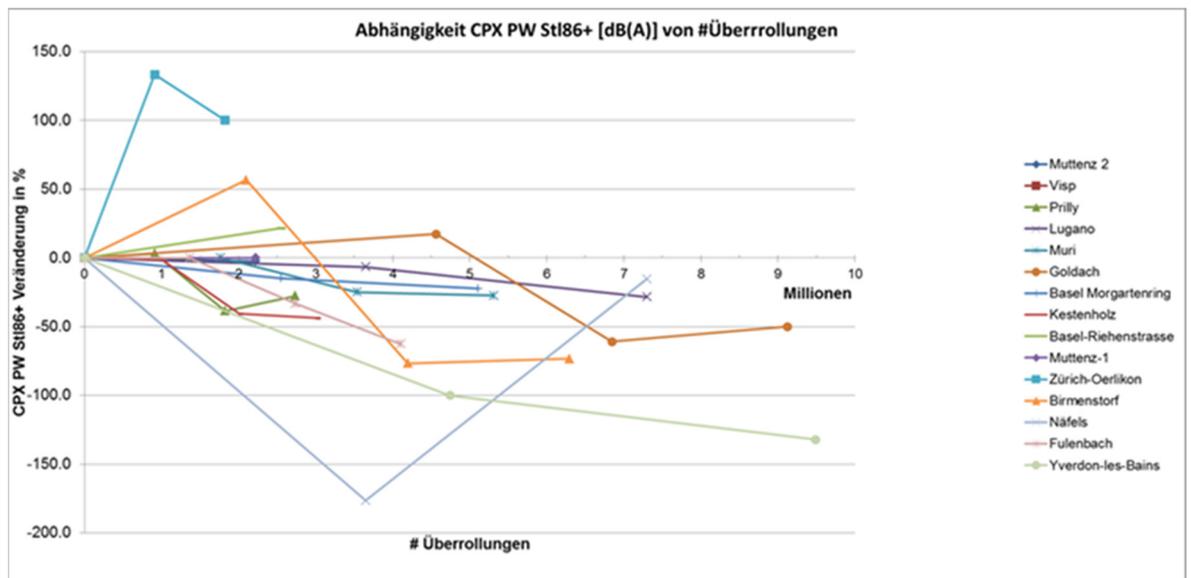


Abb.4 Entwicklung der CPX-Werte in Abhängigkeit von der Anzahl Überrollungen, dargestellt in % des Wertes der Erstmessung.

Analog zu anderen Prüfungen, bei welchen Prüfkörper durch dynamische Belastungen (Überrollungen, Druck-, Zug-, Biegebeanspruchungen) möglichst „praxisnah“ Beanspruchungen ausgesetzt werden, sollte es möglich sein im Labor die in der Praxis beobachtete Abnahme der akustischen Leistung nachzuvollziehen.

Eine besondere Herausforderung besteht darin, keine plastischen Deformationen in den zu prüfenden Probekörper zu erzeugen und trotzdem eine möglichst hohe Belastung der Oberfläche zu erhalten.

1.4.2 Bestimmung des Rollgeräusches im Labor

Das in der Reifen-Fahrbahn-Kontaktfläche entstehende Rollgeräusch lässt sich im Labor nicht direkt messen, da die Antriebsmotoren zu laut sind. Eine Abkapselung des Reifens würde konstruktive Massnahmen erfordern, welche die Ausmasse der Prüfmaschine extrem anwachsen liesse. Dies würde zu einer Rundlauf-Anlage mit einem Durchmesser von mehreren Metern führen.

SPERoN (Statistical Physical Explanation of Rolling Noise) wurde von Müller BBM zusammen mit der Chalmers Universität Göteborg, Schweden entwickelt und ist ein mathematisches Simulationsmodell, welches aus Kennwerte der Oberfläche (Textur, Luftströmungswiderstand, akustische Adsorption und mechanische Impedanz) die akustischen Eigenschaften eines Decksbelages berechnen kann. Dabei greift das Programm auf eine Datenbank mit ca. 30 verschiedenen Reifen, welche bezüglich ihrer dreidimensionalen Profilgeometrie und ihrer struktur-dynamischen Eigenschaften vermessen wurden. So werden im SPERoN-Simulationsmodell nicht nur die Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche berücksichtigt, sondern auch die unterschiedlichen Reifen und deren Reaktion auf Unterschiede der Fahrbahnoberfläche. Das SPERON Simulationsmodell wurde in zwei internationalen Projekten validiert [7,8] und in mehreren Forschungsprojekten [9], [4,5] und [10] eingesetzt. Die bisherigen Anwendungen des Modells basierte auf in situ-Messungen.

Im Rahmen der ersten Ideen zur Entwicklung des IMPACT haben wir mit den Akustikern von Müller BBM Kontakt aufgenommen, um die Machbarkeit des Konzeptes abzuklären. Die positive Beurteilung führte letztendlich zum Einzelprojekt EP4 „Labormethoden für die Bestimmung akustischer Eigenschaften lärmarmen Beläge“ welches eng mit dem EP 2 „Labortechnische Bestimmung der Dauerhaftigkeit von lärmarmen Belägen“ verbunden ist.

Im Rahmen des EP 4 wurden die bisherigen Messverfahren der Oberflächeneigenschaften an die Laborverhältnisse angepasst; es waren dies:

- Messung der Textur
- Messung des Luftströmungswiderstandes
- Messung der akustischen Absorption

Zudem musste die SPERoN-Simulation an die Verhältnisse des Labors angepasst werden. Die einzelnen Arbeitsschritte und deren Ergebnisse sind in [27] beschrieben.

2 IMPACT Maschinen I und II

Die Arbeiten mit dem IMPACT I sind nicht Gegenstand der Forschungsarbeit und wurden im Vorfeld des Forschungsprojektes durch IMP geleistet. Der Vollständigkeit halber werden sie untenstehend kurz zusammengefasst.

2.1 Erste Erfahrungen mit dem IMPACT I

Bei der ersten Prüfmaschine (IMPACT I) wurde ein herkömmliches Gerät zur Prüfung der Spurrinnenbildung von Asphaltmischungen gemäss SN 670 422 [11] verwendet. Bei dieser normierten Prüfung wird ein 500 mm langer und 180 mm breiter, im Labor verdichteter Prüfkörper, einer hohen Belastung ausgesetzt, um den Widersand gegenüber Spurrinnenbildung zu prüfen. Die Belastung wird in Form von Überrollungen mit einem Gummi-Reifen aufgebracht. Die Prüfbedingungen sind:

Temperatur der Probe:	60° C
Auflast:	5000 ± 50 N
Reifendruck:	600 ± 10 kPa
Anzahl Überrollungen:	10'000 oder 30'000

Zur Prüfung der akustischen Dauerhaftigkeit mussten die Prüfbedingungen angepasst werden, um eine Veränderung der Oberflächen-Eigenschaften (Textur) zu erzeugen, ohne den Prüfkörper zu verformen (Spurrinnen). Dazu wurde die Temperatur reduziert, erste Vorversuche wurden bei Raumtemperatur durchgeführt. Um höhere Schubkräfte an der Belagsoberfläche einzuleiten wurde die Aufhängung des Rades derart modifiziert, dass das Rad gegenüber der Laufrichtung schräg gestellt wurde. Das schräglaufende Rad erzeugt – analog der Messfahrzeuge zur Bestimmung der Griffigkeit von Fahrbahnen (SKM; Seiten-Kraft-Messung [12]) – eine Schubbeanspruchung der Oberfläche.

Bei den ersten Versuchen wurde das Rad mit verschiedenen Winkeln (2, 4, 6 °) schräggestellt und die Asphaltprüfkörper wurden mit bis zu 70 000 Zyklen belastet. Als Kriterium zur Bewertung der Veränderungen der Textur der Oberfläche wurde der Gestaltfaktor gewählt [22,23]. In der Abb.5 ist die Veränderung des Gestaltfaktors in Funktion der Anzahl Überrollungen aufgetragen worden. Aus dieser Abbildung gehen folgende Punkte klar hervor:

- Der Gestaltfaktor verändert sich linear in Abhängigkeit der Anzahl Überrollungen. Dieses Ergebnis untermauert die Feststellungen aus [5, 6], wonach die Veränderungen der Oberflächeneigenschaften durch Überrollungen erfolgen.
- Mit der Schrägstellung um 6° zeigten sich ab ca. 20000 Überrollungen Kornausbrüche. Analog zu den Beobachtungen in der Praxis konnte im Labor festgestellt werden, dass eine Übermässige Beanspruchung zu Zerstörungen führt.

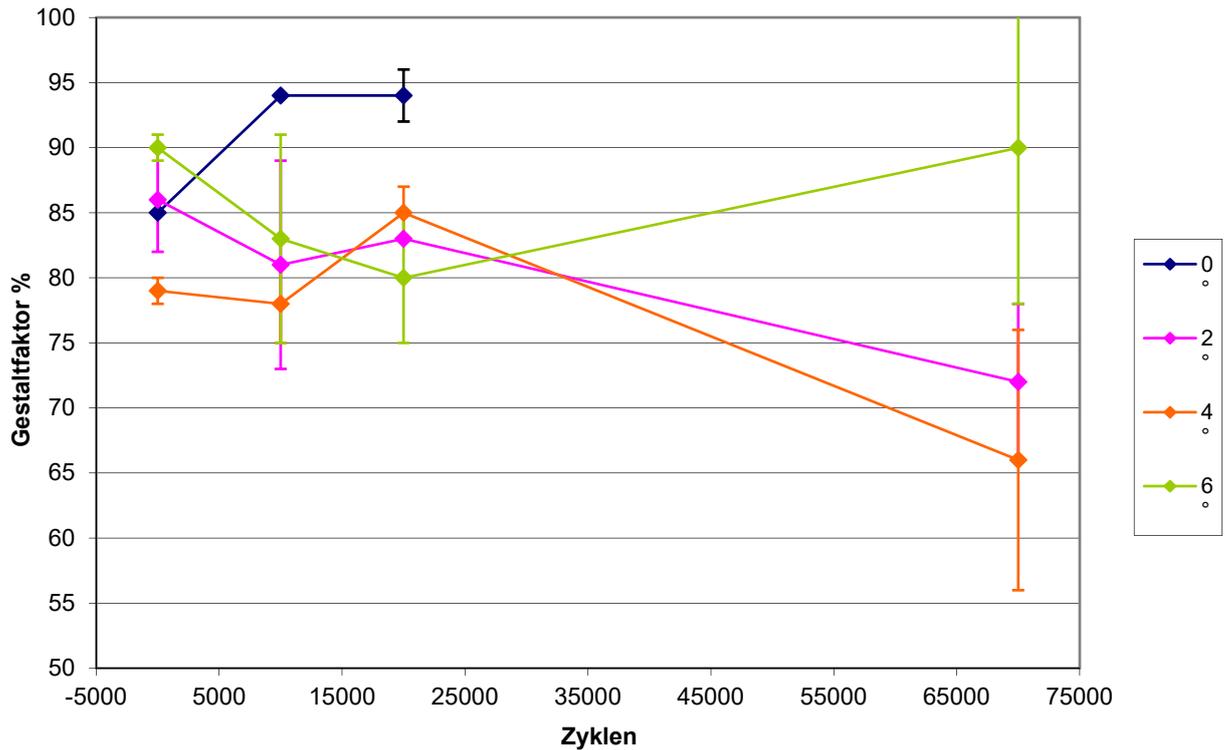


Abb.5 Gestaltfaktor der Asphaltoberfläche in Abhängigkeit der Anzahl Überrollungen bei unterschiedlichen Winkeln der Schrägstellung des Rades.

Obwohl die Ergebnisse ermutigend waren (siehe Abb.5), zeigte es sich relativ rasch, dass das Prüfgerät „Spurrinntester“ zu wenig massiv gebaut war, um die durch die Schrägstellung des Rades entstandenen Kräfte aufzunehmen.

Nachdem auch eine Verstärkung der Aufhängung und der Führung keinen Erfolg brachte, wurde die Idee der Verwendung des Spurrinntesters aufgegeben.

2.2 Funktionsweise IMPACT II

Die Entwicklung des IMPACT II wurde durch das BAFU finanziell unterstützt, da das BAFU die Idee verfolgte ein Zertifizierungsverfahren für lärmindernde Deckschichten zu entwickeln. Die Produktezertifizierung wurde nicht weiter verfolgt.

Das Überrollen des Probekörpers wurde beim IMPACT II durch ein sich hin- und her bewegendes Rad bewerkstelligt. Der zu untersuchende Probekörper wurde auf einem Probetisch eingespannt und fuhr mit einer definierten Geschwindigkeit ($v = 0.89 \text{ m/s}$) hin und her. Gleichzeitig drehte sich ein Rad synchron mit der Laufrichtung des Probetisches. Rad und Probetisch waren mit einer Kette derart verbunden, dass durch den Austausch von Zahnrädern das Übersetzungsverhältnis Probetisch/Rad variiert werden konnte. Auf diese Weise konnte der Schlupf (= Verhältnis der Drehzahl eines angetriebenen Rad zu der Drehzahl eines nicht angetriebenen mitlaufenden Rad) gewählt werden kann (siehe Abb.6).

Das System der auswechselbaren Zahnräder funktionierte analog der Übersetzung eines Rennvelos und erlaubte es den Schlupf im Bereich von -13.54% bis $+22.58\%$ schrittweise zu variieren.

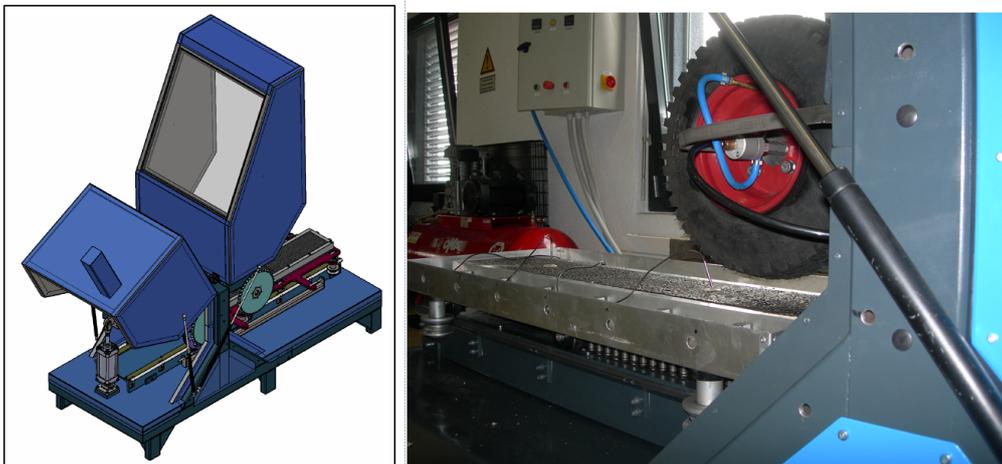


Abb.6 IMPACT II; links in der Übersicht; rechts Detailansicht

Zum Prüfgerät IMPACT II sind folgende Kenndaten festzuhalten:

- Dimensionen des Probetisches (der Probe): 1000 mm x 180 mm.
- Temperaturbereich von 20°C ... 50°C
- Schlupf: -6% (bremsendes System) und $+6\%$ (beschleunigendes System). Obwohl die Prüfmaschine einen grösseren Bereich zuließ, fokussierte man die Untersuchungen in einem engeren Bereich. Der Schlupf ist dabei nicht stufenlos variierbar, denn er wird durch die Wahl der Zahnräder bestimmt.
- Radlast; bis zu 4000 N (= 400kg)
- Anzahl Überrollungen beliebig verstellbar
- Reifen mit Reifenformat 16 x 6.50-8
- Reifendruck beliebig verstellbar

Die Prüfkörper wurden im Walzsegmentverdichter gemäss der SN 670 433 [13] verdichtet. Um die Laufbahn mit einer Länge von 10000 mm zu erstellen, wurden 2 Platten mit den Massen 500 x 180 mm hintereinander auf den Probetisch gelegt. Der Probetisch wies zudem eine feinverstellbare Arretierung der Platten, sodass eventuelle Dickenunterschiede der beiden Probekörper auf 0.1 mm genau ausgeglichen werden konnten.

2.2.1 Parameterstudien

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Parameterstudien präsentiert. Das Ziel dieser Untersuchungen war es, die optimalen Parameter festlegen zu können, bei welchen eine möglichst praxisnahe Belastung der Oberfläche erzeugt werden konnten. Diese Parameterstudien wurden, jeweils wenn nicht anders vermerkt wird, mit einem Schlupf von 6 % durchgeführt.

- **Auflast und Reifendruck**

In einer ersten Parameterstudie wurde ermittelt, wie hoch die Auflast und der Reifendruck sein müssen, damit eine möglichst breite Aufstandsfläche des Reifens generiert werden kann (siehe Abb.7). Hierzu wurde die Prüffläche mit Talgpulver bestäubt, um den Abdruck der Reifen sichtbar zu machen. Es wurden folgende Versuche gefahren (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2 Breite der Aufstandsfläche des Reifens in Abhängigkeit der Auflast und des Reifeninnendruckes

Luftdruck im Reifen [kPa]	Auflast [N]	Kontaktbreite [mm]	# Zyklen
300	1151	60	30
300	2302	120	30
300	3453	130	30
300	4489	133	30
210	2878	127	30
300	2878	128	30
390	2878	133	30

Wie der obigen Tabelle zu entnehmen ist, hat die Auflast einen deutlich grösseren Einfluss als der Reifeninnendruck.

Daher wurde für die weiteren Parameterstudien beschlossen, dass der Luftdruck des Reifens konstant gehalten wird und nur die Auflast variiert wird.



Abb.7 Dank dem Bestäuben der Reifen mit Talkpulver vor dem Abrollen auf dem Asphalt konnte die Aufstandsfläche sichtbar gemacht und ausgemessen werden.

- **Reifen**

In einer weiteren Parameterstudie wurde untersucht, welches Reifenprofil am geeignetsten war. Als Ziel wurde eine möglichst gleichmäßige Befahrung der gesamten Oberfläche des Probekörpers festgelegt. Belastet man die Prüfplatte mit einem Reifen, so bildet sich auf dem Prüfkörper das Abbild des Reifenprofils ab. Das Profil ist derart zu wählen, dass die gesamte Oberfläche des Prüfkörpers gleichmäßig beansprucht wird. In der *Abb.8* ist ein schlechtes Beispiel dargestellt.



Abb.8 keine gleichmäßige Beanspruchung der Oberfläche infolge der Verwendung eines ungeeigneten Reifens ohne Schlupf

Es wurden verschiedene Reifen mit unterschiedlichem Pneuinnendruck und Schlupf untersucht. Hierzu wurden vier verschiedene Reifen der Grösse 16 x 6.50-8 verwendet und mit Druckerschwärze eingefärbt (siehe Abb.9). Anschliessend wurden Holzbretter in den IMPACT eingebaut und mit 20 Zyklen belastet (siehe Abb.10). Zur Ermittlung der geeigneten Prüfparameter wurden folgende Prüfzyklen gefahren (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3 Versuchsmatrix zur Ermittlung des idealen Versuchsreifens

Reifen	Versuch Nr.	Übergänge	Auflast kPa	Auflast N	Reifendruck kPa	Zähnezahl	Schlupf %
X	x1	20	250	2877	300	36	6%
	x2				200	36	6%
	x3				300	33	15%
	x4				300	31	23%

Die Versuche wurden mit folgenden 4 Reifentypen gefahren (siehe Tabelle 4)

Tabelle 4 Übersicht über die verwendeten Reifen

Reifen-Nr.	Beschreibung/Bezeichnung
1	16x6.50 – 8 N.H.S NYLON / 0309 1707 / HENG SHINTIRE
2	16x6.50 – 8 N.H.S TURF MASTER CARLISLE
3	16x6.50 – 8 N.H.S TURF TRAGE RIS CARLISE
4	16x6.50 – 8 N.H.S TURF SAVER CARLISLE

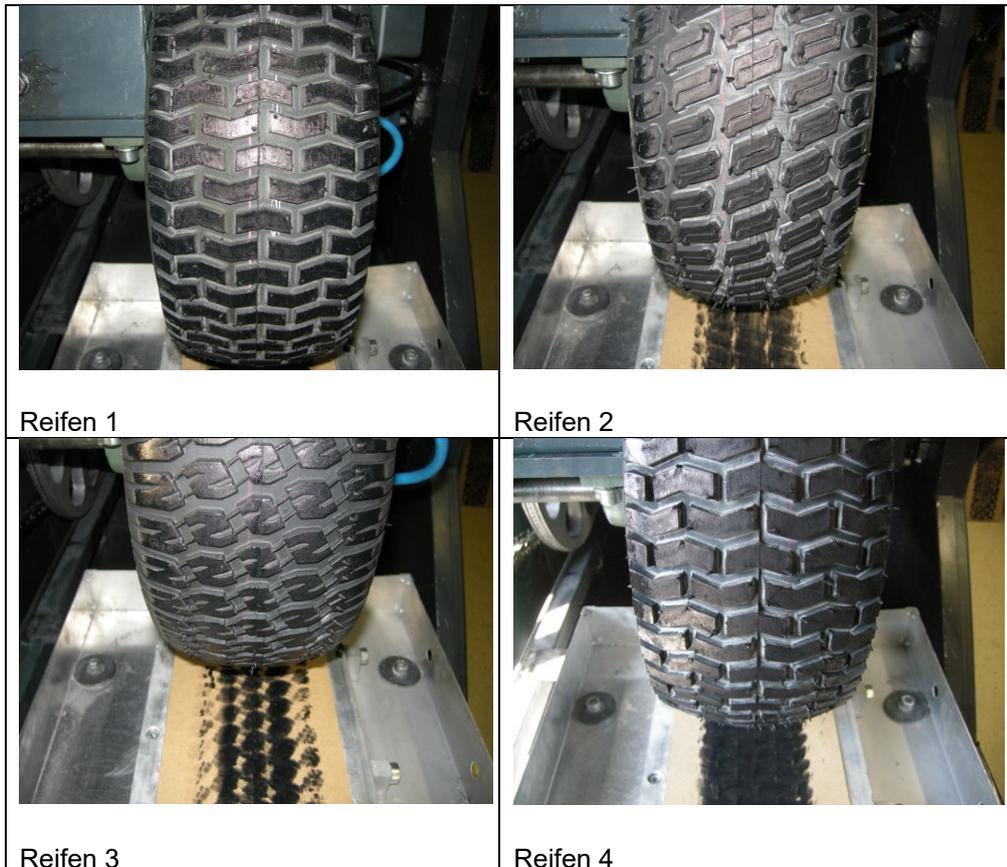


Abb.9 Verwendete Versuchsreifen

Aufgrund der Abmessungen der im IMPACT II verwendeten Reifen war die Auswahl an Reifenprofilen stark eingeschränkt. Da die verwendeten, kleinen Reifen in erster Linie für Landwirtschaftsfahrzeuge verwendet werden, waren die zur Verfügung stehenden Profile allesamt grob.

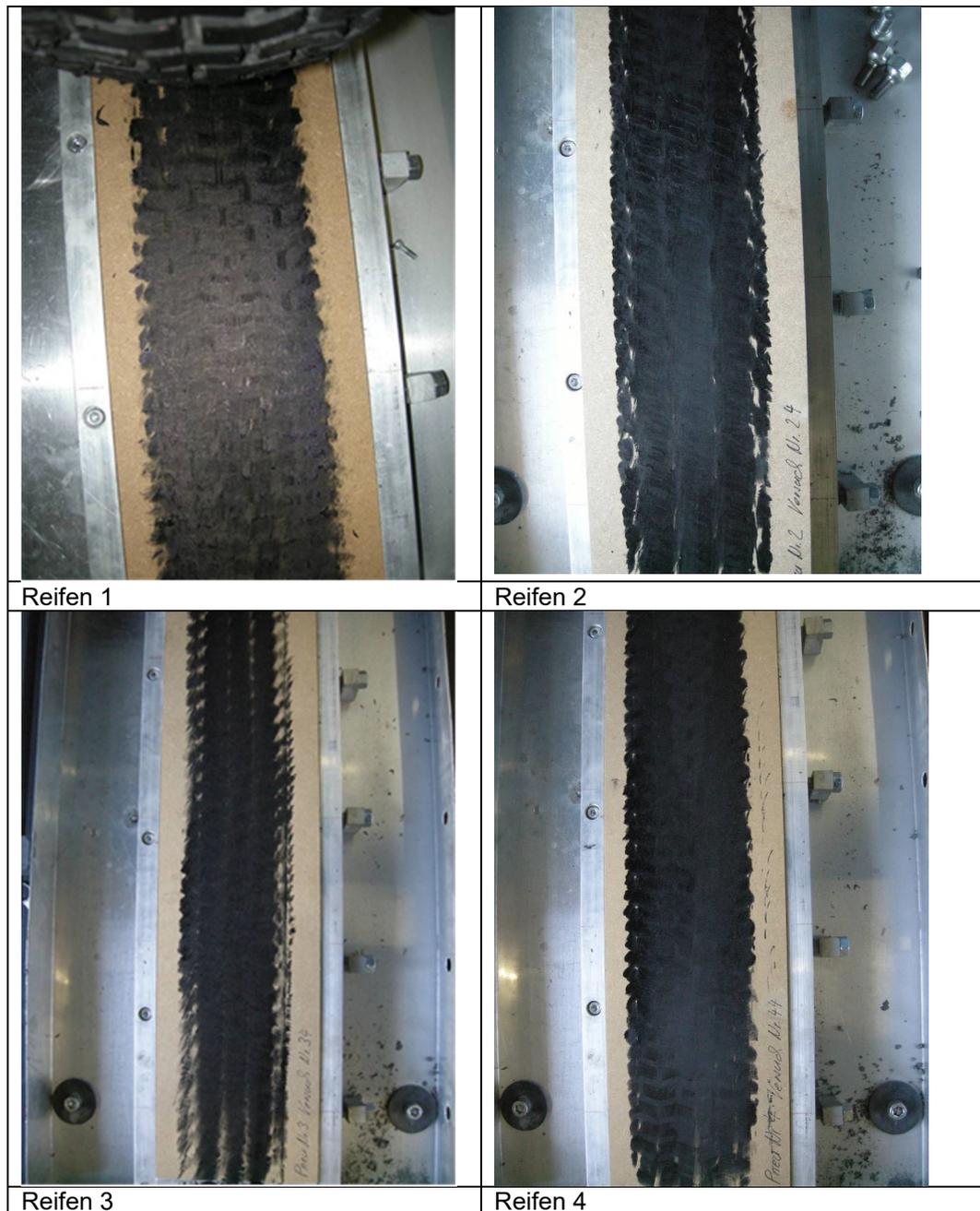


Abb.10 Überrollversuche mit unterschiedlichen Reifenprofilen, mit Schlupf =23% und Reifeninnendruck von 300kPa mit dem Ziel eine möglichst gleichmässige Befahrung der Oberfläche zu erreichen.

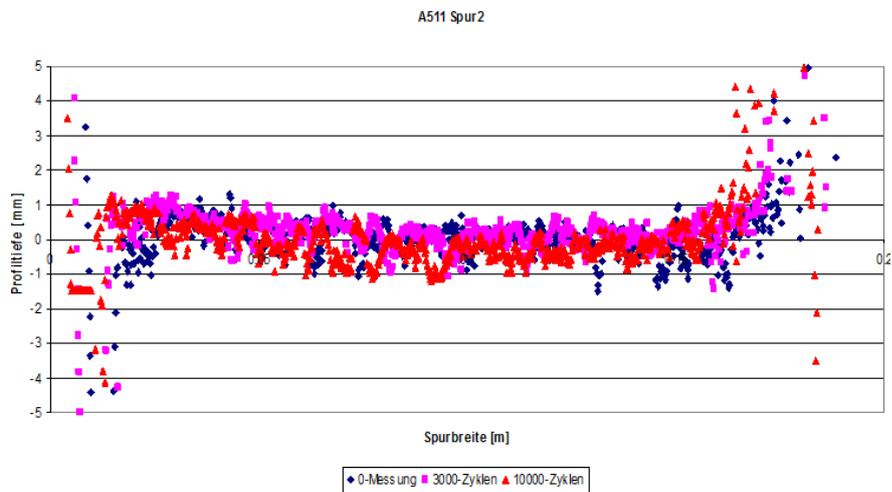
Es war zu beobachten, dass bei allen vier Reifenprofilen bei einem Schlupf von $\geq 15\%$ und einem Reifen-Innendruck von 300 kPa zu einem vollständigen Abdruck des Reifenprofils kam. Der Reifen mit Profil 4 erwies sich dabei am idealsten, da es bei diesem Reifen das homogenste Bild des vollständigen Reifenabdrucks vorlag.

Fazit: Reifen Nr 4 weiterverwenden

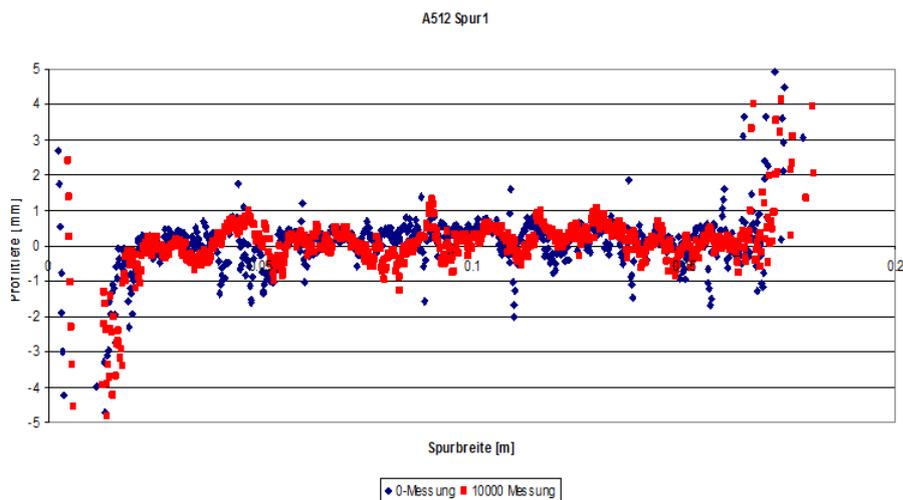
- **Auflast und Temperatur:**

Für die Messung des Luftströmungswiderstandes – als wichtige Eingangsgrösse für die Berechnung des Rollgeräusches im Simulationsmodell - wird eine möglichst plane Oberfläche benötigt. Daher sollen die zu prüfenden Platten derart belastet werden, dass es beim Überrollvorgang wohl zu Veränderungen der Textur, jedoch nicht zu plastischen Verformungen (Spurinnenbildung) kommen kann. Aus der Praxis ist bekannt, dass die Verformung des Asphaltes sehr stark von der Auflast und der Temperatur abhängig ist. Daher erfolgte in dieser Parameterstudie die Ermittlung der optimalen Parameter für die Auflast und die Temperatur in zwei Schritten. Für diese Parameterstudie wurde ein Asphaltmischgut AC 11 L verwendet.

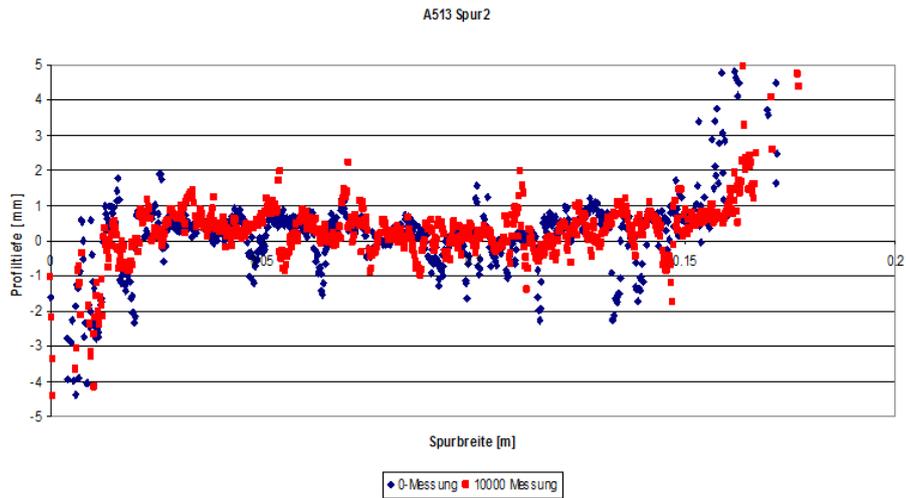
In einem ersten Schritt wurde bei gleichbleibender Temperatur ($T = 30^{\circ}\text{C}$) und Schlupf (6%) die Auflast erhöht (2877 N, 3453 N und 4028 N). Es wurden jeweils 10'000 Überrollungen durchgeführt. Dazu wurde jeweils vor Versuchsbeginn und nach 10'000 Zyklen an derselben Stelle die Querebenheit aufgenommen (siehe Abb.11).



Auflast 2877 N



Auflast 3453 N



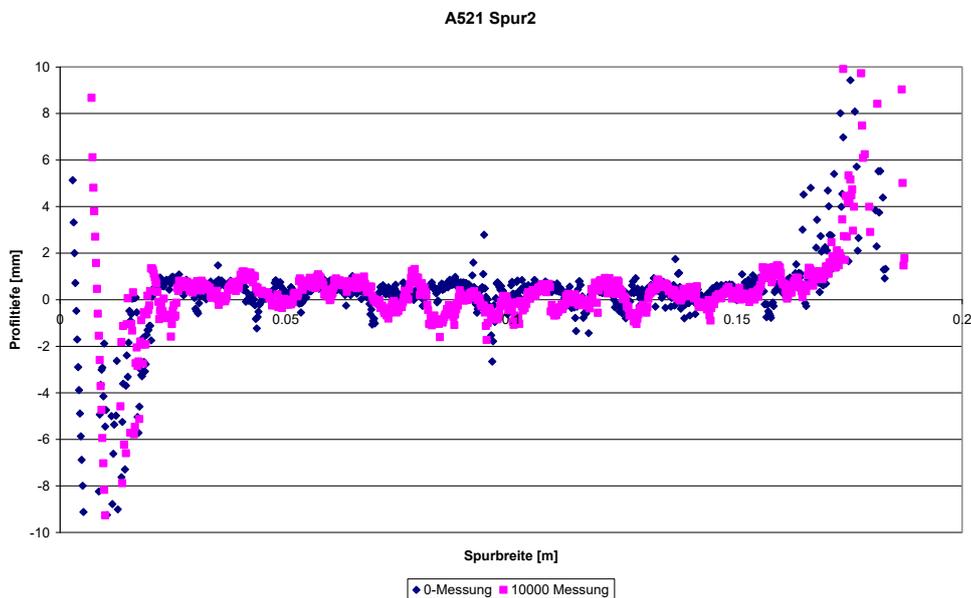
Auflast 4028 N

Abb.11 Überrollversuche bei verschiedenen Auflasten und $T=30^{\circ}\text{C}$; Querprofilmessungen zu Beginn und nach 10 000 Überrollungen

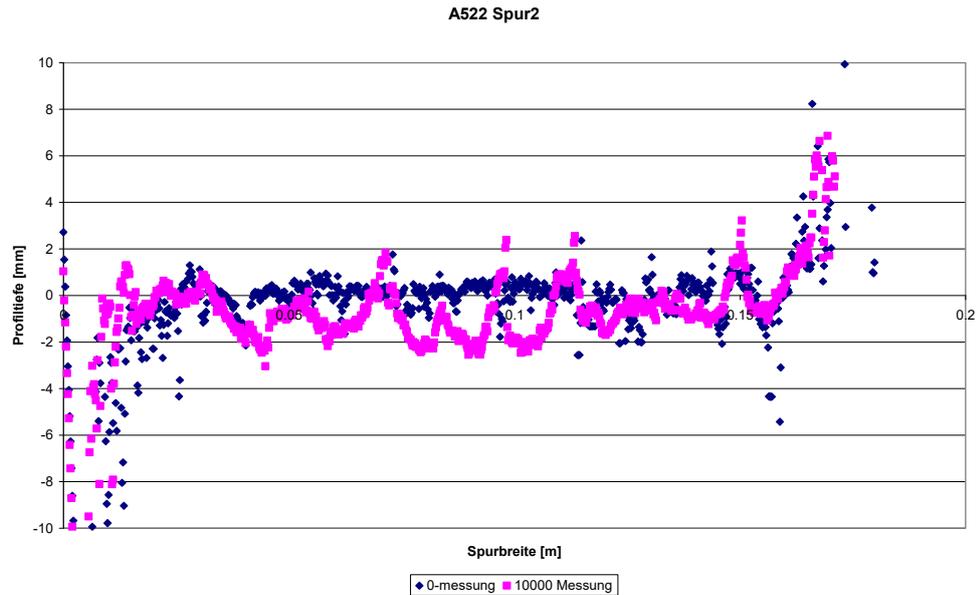
Aus der Abb.11 ist ersichtlich, dass es auch bei der grössten Auflast von 4028 N zu keinen nennenswerten Verformungen der Prüfplatte in Form von Spurrinnen gekommen war.

Fazit: Für die weiteren Untersuchungen wurde diese Auflast (4028 N) gewählt.

Für den Schritt 2 wurde – mit der im Schritt 1 festgelegten Auflast von 4028 N - die Temperatur variiert ($T=40^{\circ}\text{C}$ und 50°C). Bei der Versuchstemperatur von 50°C war eine Spurrinnenbildung auf der Prüfplatte zu beobachten (siehe Abb.12).



$T=40^{\circ}\text{C}$



T=50°C

Abb.12 Querprofilmessungen bei unterschiedlichen Temperaturen und gleichbleibender Auflast (4028 N).

Zudem war bei der Prüftemperatur von 50°C die Abbildung des Reifenprofils auf den Prüfplatten deutlich zu erkennen, während bei der Prüftemperatur von 40°C dieses Phänomen nur schwach ausgeprägt war (siehe Abb.13). Erwartungsgemäss wurde das Reifenprofil mit zunehmender Anzahl Überrollungen deutlich auf der Oberfläche des Probekörpers abgebildet. Ebenso war ein hoher Reifenverschleiss beobachtbar. Da der Reifen konstruktionsbedingt keine volle Umdrehung beim Abrollvorgang vollbringen konnte, wies der Reifen eine ungleichmässige Abnutzung auf.



a. Fahrbahnoberfläche nach 100'000 Zyklen bei 40°C



b. Fahrbahnoberfläche nach 100'000 Zyklen bei 50°C

Abb.13 Abdruck des Reifenprofils auf der Asphaltoberfläche der Probekörper. Bei der Prüftemperatur von 50°C (rechts) ist dies deutlicher zu erkennen als bei 40°C (links).

An der Oberfläche der Platten konnten Ablagerungen einer gummiartigen, klebrigen Masse festgestellt werden. Um sicher zu gehen, dass die an der Oberfläche der Probekörper sichtbaren Abdrücke durch Ablagerungen des Reifen-Gummis entstanden waren, wurde eine chemisch-analytische Untersuchung (FT-IR Analyse) durchgeführt.

Die Untersuchungen ergaben, dass im charakteristischen Fingerprintbereich für aromatische Kohlenwasserstoffe sowohl Molekülschwingen zu beobachten waren, die dem Bitumen zugeordnet werden konnten als auch solche die dem Gummi des Reifens entsprachen. In der Abb.14 sind die FTIR-Analysen des Abriebmaterials und des Reifens einander gegenübergestellt. Die blaue Linie (Abrieb) verläuft über einen grossen Bereich der Wellenlängen parallel zur roten (Gummi des Reifens); einzig in den für Bitumen typischen Wellenlängen gibt es nennenswerte Unterschiede zwischen den beiden Ergebnissen. Daraus kann geschlossen werden, dass die an der Oberfläche der Probekörper vorgefundenen Ablagerungen vorwiegend vom Prüfreifen herrühren.

Fazit: Eine Prüftemperatur von 40° C scheint optimal zu sein; die weiteren Schritte werden mit dieser Temperatur durchgeführt.

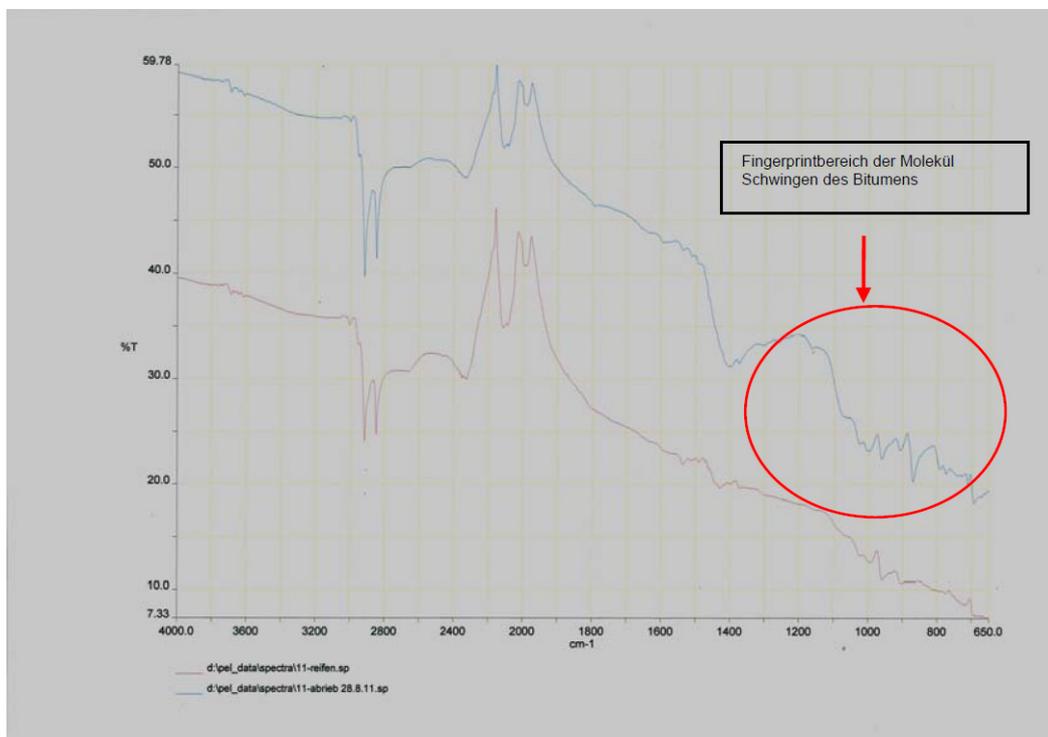


Abb.14 FT-IR Analyse der Ablagerungen an der Oberfläche der Prüfkörper (blaue Linie) im Vergleich mit einer Probe aus dem Reifen (rote Linie)

- **Schlupf**

Die Untersuchung des Einflusses des Schlupfes konnte auf den bisherigen Ergebnissen aufgebaut werden. Bei der Variation der Auflast und der Temperatur wurde mit einem konstanten Schlupf von + 6% gefahren. Die dabei festgestellten Ablagerungen des übermässigen Abriebes des Reifens sind für die weiteren Untersuchungen nicht akzeptabel, da sie weder dem Verhalten in der Praxis entsprechen, noch weitere Messungen der Oberflächeneigenschaften ermöglichen (Textur, Luftströmungswiderstand).

In einem ersten Schritt wurde das Vorzeichen des Schlupfes geändert. Dies bedeutet, dass die Probe neu mit einem gebremsten Rad (negativer Schlupf) beansprucht wurde, während die bisherigen Untersuchungen mit einem beschleunigten Rad (positiver

Schlupf) durchgeführt wurden. Das Ergebnis war dasselbe, denn es traten die gleichen Ablagerungen auf.

In einem zweiten Schritt wurde die Temperatur von 40 auf 30°C reduziert und gleichzeitig der Schlupf erhöht (15%), um mehr Schubkräfte an der Probenoberfläche zu erhalten. Wie der Abb.15 zu entnehmen ist, haben diese Parameter zu Kornausbrüchen geführt.



Abb.15 Prüfplatte mit Kornausbruch nach 100'000 Zyklen mit den Versuchsparametern $T = 30^{\circ}\text{C}$ und Schlupf = 15%

2.2.2 Folgerungen

Die Parameterstudien am IMPACT II hatten ein bisher unterschätztes Problem in aller Deutlichkeit aufgedeckt: der Prüfreifen ist das zentrale Element des Prüfstandes. Mit den bis dato verwendeten Prüfreifen war es nicht möglich die Oberfläche einer Asphaltprobe derart zu beanspruchen, dass Texturveränderungen erzeugt werden können, welche denjenigen einer Strasse unter Verkehr entsprechen. Um das Gerät nicht zu gross werden zu lassen, hatten wir einen relativ kleinen Reifen gewählt. Die Reifendimension 16 x 6.50-8 wird in erster Linie für Landwirtschaftsfahrzeuge verwendet. Diese Reifen müssen Eigenschaften aufweisen, welche dem Verwendungszweck dienen. Es werden daher grobstollige Reifen aus weichen Gummimischungen hergestellt. Die Nachteile bei der Verwendung dieser Reifen zur Untersuchung von Asphaltprobekörper sind:

- Gummimischung:
Die weiche Gummimischung erzeugt einen sehr hohen Abrieb, welcher den Prüfungsablauf in unzulässiger Art und Weise beeinflusst.
- Profil:
Bei dem von uns verwendeten grobstolligen Prüfreifen war das Profil völlig symmetrisch angeordnet, d.h. beim Abrollen wurde immer dieselbe Reifen/Fahrbahn Kontaktfläche generiert. Somit kam es mit zunehmender Anzahl der Überrollungen zur Abbildung des Reifenprofils, da nur an der Kontaktfläche Reifen/Fahrbahn der Bitumenfilm aberodiert wurde. Im Bereich zwischen den groben Profilklotzen entstand kein Kontakt Reifen/Oberfläche, sodass an diesen Stellen keine Veränderungen der Asphaltoberfläche entstehen konnten.

- Länge der Rollbahn:
Die Länge des Prüfkörpers bzw der Rollbahn muss so lange sein, dass der Reifen mehr als eine volle Umdrehung machen kann, ansonsten wird der Reifen nur partiell abgenutzt und verändert seine Laufeigenschaften im Verlaufe der Prüfung.

Diverse Kontakte mit Herstellern neuer Reifen und mit Rundumerneuerer (Reifen-Aufgummieren) zeigten, dass es nicht möglich ist Reifen der Dimension 16 x 6.50-8 mit gezielten Gummi-Eigenschaften und Profilen herzustellen. Es sollten Reifen verwendet werden, welche kein regelmässiges Reifenprofil besitzen. Bei PW-Reifen wird darauf geachtet, dass die Profilklotze leicht unterschiedliche Längen aufweisen (Pitching), um eine erhöhte Laufruhe und somit einen besseren Komfort zu erreichen (siehe Abb.16). Dieses Pitching kommt den Anforderungen des IMPACT sehr entgegen, um eine gleichmässige Beanspruchung der Asphaltoberfläche zu erreichen.



Abb.16 Reifenprofil mit unterschiedlich grossen Profilklotzen (Pitching)

Die oben aufgeführten Gründe führten zur Entscheidung eine, neue Prüfmaschine (IMPACT III) zu bauen, mit welchem PW-Reifen verwendet werden können. Diese unvorhersehbare Neuentwicklung der Prüfmaschine führte zu einer Verzögerung des Forschungsvorhabens von knapp zwei Jahren.

3 IMPACT III

3.1 Konzept und Funktionsweise

Die Grundidee des IMPACT wurde beibehalten und weiterentwickelt. Für den IMPACT III wurden die Erkenntnisse aus der Parameterstudie am IMPACT II ausgewertet und maschinentechnisch umgesetzt (siehe Abb.17).



Abb.17 Prüfmaschine IMPACT III

Die Neukonzeption des IMPACT III unterscheidet sich vom IMPACT II in folgenden Punkten:

- Der Prüfreifen hat die Dimension eines PW-Reifen. Diese Wahl hat für das Prüfverfahren folgende Vorteile:
 - Verwendung von sowohl handelsüblichen PW-Reifen als auch die Verwendung von Spezialreifen (z.B. Spezial Gummimischungen).
 - Für die Simulation des Rollgeräuschs mittels SPERoN kann auf eine Datenbank zurückgegriffen werden, in welcher eine grosse Anzahl handelsüblicher PW-Reifen enthalten sind.
 - Abrollvorgang ist fast nahezu identisch mit demjenigen auf der Strasse.
- Die Prüfbahnlänge beträgt nun insgesamt 2m statt 1 m. Somit ist es möglich dass der Prüfreifen mehr als eine Radumdrehung vollbringen kann. Dies hat den Vorteil, dass der Reifen einer gleichmässigen Abnutzung unterliegt.
- Der Schlupf ist stufenlos einstellbar; die Richtung des Schlupfes wird bei jeder Richtungsänderung des Rades ebenfalls gewechselt. Fährt beispielweise das Rad nach links mit plus 3 % Schlupf, so beträgt der Schlupf auf der „Rückfahrt“ nach rechts minus 3 %. So ist sichergestellt, dass die Schubkräfte immer in die gleiche Richtung auf der Probe wirken; analog der Überrollung einer Strasse in der Praxis.
- Die Temperierung der Probe erfolgt auf der Basis einer Oberflächenmessung. Es interessiert nicht die Temperatur in der Probe, sondern an dessen Oberfläche. Damit können auch allfällige Erwärmungsprozesse infolge der Überrollungen ausgeglichen werden.
- Die Probe liegt auf einem Tisch, der zur Bestimmung der Oberflächenparameter ausgefahren werden kann. Dadurch wird die zu messende Oberfläche zugänglicher.

3.2 Zusammenfassung der Geräteentwicklung

In der Tabelle 5 sind die drei Entwicklungsstufen der Prüfeinrichtung IMPACT zusammengefasst

Tabelle 5 Zusammenfassung der Entwicklung des IMPACT

Parameter	IMPACT I	IMPACT II	IMPACT III
Probekörperdimension [mm]	500 x 180	1000 x 180	1000 x 180
Abrolllänge Pneu [mm]	500	1000	2000
Maximale Auflast [N]	5000	4000	4000 N
Schlupf	kein	-6% bis 6% stufenweise einstellbar	-3% bis 3% stufenlos varierbar,
Prüftemperatur [°C]	60	20 ... 50	20 ... 50
Dimension Pneu	4.00-8	16 x 6.50-8	205/60 R15
Pneuprofiltyp	Glattreifen	Landwirtschaftsreifen	V-Profil
Pneudruck	6.0 bar	3.3 kPa (3.3 bar)	2.2 bar
Gummimischung	handelsüblich	handelsüblich	DK-Mischung

3.3 Festlegung des Prüfreifens

3.3.1 Reifendimension

Es wurde vorgängig evaluiert, welche Reifendimensionen einen Abrollumfang kleiner als 2000 mm aufweisen, damit der Prüfreifen im IMPACT III eine volle Radumdrehung vollbringen kann. Es wurde dabei folgende Auswahl getroffen (siehe Tabelle 6).

Reifengrösse	205/55 R16	215/65 R15	225/55 R16
Durchmesser [cm]	63.2	66.1	65.4
Abrollumfang statisch ¹ [cm]	198.5	207.5	205.4
Abrollumfang dynamisch ² [cm]	192.1	200.8	198.8

¹ nicht belasteter Reifen [14]

² belasteter Reifen, dadurch wird der Abrollumfang kleiner [14]

Die Breite der Aufstandsfläche kann nicht aus den Hersteller-Angaben abgeleitet werden und musste mit einigen Versuchen bestimmt werden. Die üblichen Angaben zu den Abmessungen der Reifen werden anhand eines Beispiels erläutert:

205/55 R16:

wobei:

205: Reifenbreite in mm (gemessen wird der unbelastete Reifen; daher stimmt diese Zahl nicht mit der Breite der Aufstandsfläche überein)

55: Querschnittsverhältnis in % von Höhe (=Abstand der Aufstandsfläche zum Reifeninnendurchmesser) zu Breite

R: radialer Aufbau der Karkasse (im Unterschied zum diagonalen Aufbau)

16: Reifeninnendurchmesser (= Felgendurchmesser) in Zoll

Um die Breite der Aufstandsfläche der verschiedenen Reifen zu messen, wurden mit den in Tabelle 6 erwähnten Reifendimensionen praktische Abrollversuche durchgeführt. Die Einfahrt der firmeneigenen Tiefgarage wurde bewässert, so dass das jeweilige Fahrzeug nach der Einfahrt auf dem trockenen Einstellhallenboden eine Spur hinterliess. Anschliessend wurde sofort die Breite (= Reifenaufstandsfläche) der so generierten Spur bestimmt (siehe Abb.18)

Die Auswertung (Tabelle 7) der Reifenaufstandsweite ergab, dass die Aufstandsweite des Reifens mit der ursprünglich vorgesehenen Dimension 225/55 R 16 grösser war als die Prüfplattenbreite von 180 mm. Um zu verhindern, dass der Reifen auf der Schalung der Probe fährt, musste ein schmalere Reifen gewählt werden. Die Aufstandsfläche der Reifendimension 205/65 R15 (165 mm) erwies sich eigentlich als ideal, doch hatte unser damaliger Hersteller der Prüfreifen diese Reifendimension mittlerweile aus dem Sortiment genommen.



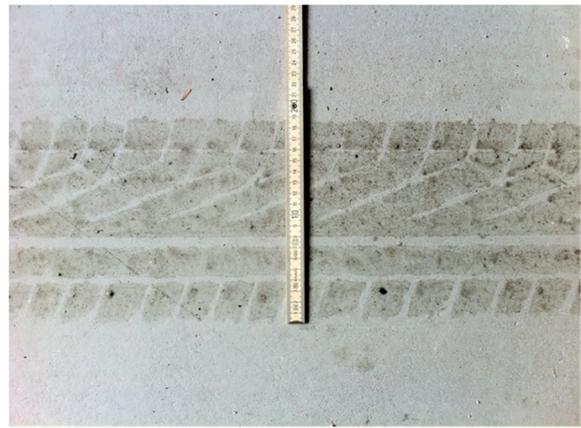
Aufstandsfläche eines 205/55 R16 Reifens.



Aufstandsfläche eines 215/65 R15 Reifens



Aufstandsfläche eines 225/55 R16 Reifens mit P= 2.2 bar



Aufstandsfläche eines 225/55 R16 Reifens mit P= 2.0 bar

Abb.18 Bestimmung der Aufstandsbreite der Prüfreifen

Tabelle 7 Zur Bestimmung der Aufstandsbreite verwendete Reifen

Reifendimension	Fabrikat	Reifendruck [bar]	Aufstandsbreite [mm]
205/55 R16	Conti Wintercontact	2.3	158 – 160
215/65 R15	Cooper Wheatermaster	2.4	163 – 165
225/55 R 16	Pirelli	2.0	182
225/55 R 16	Pirelli	2.2	185

Somit fiel die Wahl der Prüfreifendimension auf die Dimension 205/60 R15, da diese Dimension am die gestellten Anforderungen am besten erfüllte.

3.3.2 Reifenprofil

Zusätzlich zu den in Kapitel 2.2.2 aufgeführten Anforderungen an den neuen Reifen, wurde ein Profil ohne Längsrille gesucht, da eine solche Längsprägung - bei mm-genauer gleicher Überrollung der Probe - zu einer Abbildung der Rille auf der Belagsoberfläche geführt hätte. Mit der Wahl eines V-Profiles sollte sichergestellt werden, dass beim Abrollvorgang möglichst die ganze Prüfplattenfläche homogen belastet wird (siehe Abb.19). Dank des Pitching, soll zudem vermieden werden, dass bei jedem Abrollvorgang die gleiche Reifen/Fahrbahnkontaktfläche generiert wird.



Abb.19 Reifen mit V-Profil

3.3.3 Herstellung der Prüfreifen

Dem Prüfreifen kommt eine grosse Bedeutung zu. Nicht nur sein Profil ist entscheidend, sondern auch die verwendete Gummimischung und der Aufbau des Reifens (die Karkasse beeinflusst das Abrollen und damit den Druck in der Kontaktfläche Reifen/Fahrbahn). Alle Hersteller von PW-Reifen passen die verwendete Mischung ihrer Produkte laufend den technischen Verbesserungen an, berücksichtigen aber auch ökonomische Faktoren und passen die Gummimischung entsprechend den Einkaufspreisen der Ausgangsprodukte an. Auch die Profile der Reifen verändern sich laufend und berücksichtigen sowohl die neuesten Kenntnisse wie auch die Trends auf dem Markt. Dies führt unweigerlich dazu, für ein Prüfverfahren einen eigenen standardisierten Prüfreifen zu bauen, wie dies von anderen Prüfverfahren bereits bekannt ist. Bei der Prüfung der Griffigkeit verwendet jedes Messverfahren eigene, standardisierte Reifen; auch bei der Rollgeräuschmessung CPX werden Standardreifen verwendet.

Es wurden die Reifen folgender Verfahren zur Messung der Griffigkeit einer Fahrbahn untersucht: Stuttgarter Reibungsmesser [15], Griptester [16], SCRIM [17], SKM [18], Skiddometer [19], IMAG [20], ADHERA [21]. Auch die 4 Standard-Reifen der CPX-Messung zur Erfassung des Rollgeräusches wurden betrachtet. Sämtliche Reifen haben entweder kein Profil oder eine ausgeprägte Längsrillierung. Sie sind daher für den Zweck des IMPACT nicht verwendbar.

Da kein geeigneter Prüfreifen zur Verfügung stand, musste ein solcher definiert und beschafft werden.

Gummimischung:

Bei der Beanspruchung einer Strassenbelagsoberfläche durch den Verkehr spielen Staub, Abrieb und sonstige feine Bestandteile eine wichtige Rolle als Abrasions- und Schleifmittel. Da im Prüfstand des IMPACT III diese Beanspruchung fehlt, wurde Ausschau nach einer besonders harten und abrasiven Gummimischung gehalten. Kontakte zur Reifenindustrie zeigten zudem, dass mit der Beimengung von Silicastaub in die Gummimischung ein Teil der fehlenden Schleif- und Abrasionsmittel vermutlich kompensiert werden könnte.

Die gesuchte Gummimischung sollte nicht nur möglichst hart sein, sondern auch über lange Zeit in gleichbleibender Qualität zur Verfügung stehen. Die Wahl fiel auf eine in der deutschen Autoindustrie verwendete Standardmischung mit der Bezeichnung „DK“. Diese Mischung entspricht einem sehr harten Lastwagen-Reifen mit hohem Naturkautschuk-Anteil. Diese Mischung wird zur Herstellung von standardisierten Testreifen verwendet, mit welchen die Kraftübertragung Fahrzeug – Fahrbahn untersucht wird. Zusätzlich wurde auch eine in der ASTM 1136 [24] definierte Gummi-Mischung ausgewählt, um eine Alternative bereit zu haben.

Herstellungsverfahren

Erste Prüfreifen wurden gemäss folgendem Verfahren hergestellt:

- Herstellung einer kleinen Menge einer definierten Gummimischung beim Partner A
- Kauf eines definierten Reifens, Abschälen der Lauff-Fläche und profillose Aufgummierung der definierten Gummimischung beim Partner B
- Manuelles Schneiden des gewünschten Profils in der Forschungsabteilung von Continental, Hannover

Die Koordination und Kommunikation dreier weit auseinander liegender Partner war nicht ganz einfach, zumal es sich jeweils um Kleinstmengen handelte, bei denen der Goodwill wichtiger als der Umsatz ist. Nach überaus langer Zeit erhielten wir wohl handgeschnittene Reifen mit definierter Gummimischung, aber das Profil enthielt die unerwünschten Längsrillen (siehe Abb.20).



Abb.20. Gelieferter Prüfreifen mit Längsrillen

Zweite Serie von Prüfreifen

Im Verlaufe unserer Recherchen bei Reifen-Fabrikanten haben wir einen Hersteller gefunden, welcher bis vor kurzem einen für uns idealen Reifen im Angebot hielt. Glücklicherweise war die Gussform noch vorhanden, sodass eine kleine Serie von Reifen der Dimension 205/60 R15 mit der gewünschten Gummi-Mischung hergestellt werden konnte. Leider verzögerte sich die Auslieferung um mehrere Quartale; wir erhielten diese Reifen erst Ende Dezember 2014 und konnten keine weiteren Messungen mit diesen Reifen durchführen. Der Reifenhersteller hat schriftlich zugesichert, die entsprechende Gussform aufzubewahren, um bei Bedarf zu einem späteren Zeitpunkt den Prüfreifen herstellen zu können.

3.3.4 Bezeichnung der hergestellten Prüfreifen

Um die Übersicht über die hergestellten und beschafften Prüfreifen, sowie deren Einsatz im Projekt zu bewahren, wurden die Reifen und deren Verwendung in der Tabelle 8 zusammengefasst.

Bezeichnung	Profil	Gummimischung	Verwendet für IMPACT III
C-L-ASTM	Längsrillen; siehe Abb.20	ASTM 1136-14	
C-L-DK	Längsrillen; siehe Abb.20	DK	
C-L-DK-Si	Längsrillen; siehe Abb.20	DK mit Silicastaub	X
C-V-DK-Si	Ohne Längsrillen siehe Abb. 21	DK mit Silicastaub	X
V- Markt	V-Profil; siehe Abb.19	Marktübliche Sommer-Mischung	X
V-DK-Si	V-Profil; siehe Abb.19	DK-Mischung mit Silikastaub; siehe Kapitel 3.3.3	



Abb. 21 Von Hand geschnittener Reifen mit der Bezeichnung „C-V-DK-Si“

3.4 Parameterstudie

Die Parameterstudie wurden mit einem Reifen „C-L-DK-Si“ gemäss durchgeführt.

3.4.1 Auflast

Bei der Dimensionierung der Prüfmaschine IMPACT III wurde davon ausgegangen, dass PW-Reifen verwendet werden. Dementsprechend wurde das Prüfgerät derart gebaut, dass Radlasten erzeugt werden können, welche denjenigen von Personenwagen entsprechen.

Der IMPACT wurde so konstruiert, dass die Auflast des sich hin und her bewegendes Rades der Radlast eines durchschnittlichen PW von ca. 400 kg entspricht (Bsp. Gewicht 1600 kg, Gewichtsverteilung vorne/hinten 50/50%).

Da immer wieder die Frage aufgeworfen wurde, ob die Auflast von 4000 N für die Abbildung der tatsächlichen Verkehrslast genügend ist, wurde folgender rechnerischer Vergleich durchgeführt. Dabei wurden die Aufstandsdrücke eines Sattelschleppers (total 5 Achsen) (siehe Abb. 22) und eines Mittelklasse-PW jeweils für den leeren und vollbeladenen Zustand berechnet (siehe Tabelle 9).

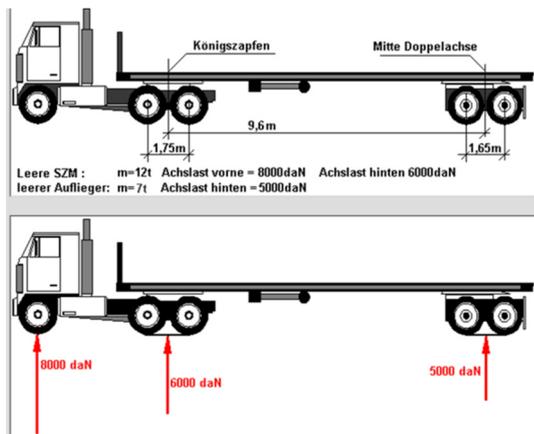


Abb. 22 Sattelschlepper (LW) mit 5 Achsen [33]

Tabelle 9 Vergleich des Aufstandsdrucks LW vs. PW

Fahrzeugtyp	LW			PW	LW			PW
	Beladungszustand							
	leer				voll			
Gesamtgewicht [kg]	19000			1600	32000			2000
Position Achse	vorne	mitte	hinten		vorne	mitte	hinten	
Achslast [N]	80000	60000	50000	8000	80000	120000	120000	10000
Anzahl Pneu	2	8	8	2	2	8	8	2
Last pro Pneu [N]	40000	7500	6250	4000	40000	15000	15000	5000
Aufstandsfläche Pneu [m ²]	0.0648			0.0225	0.0648			0.0225
Auflagedruck [N/m ²]	617284	115741	96451	177778	617284	231481	231481	222222

Die Schätzungen zeigten, dass beim Sattelschlepper (LW) die vordere Achse einen Aufstandsdruck erzeugt, der ca. 3 Mal so gross ist, wie bei einem Mittelklasse-PW. Die vier verbleibenden Achsen weisen allerdings Aufstandsdrücke auf, welche denjenigen eines Mittelklasse-PW entsprechen. Die für den IMPACT gewählte Radbelastung erzeugt somit einen Druck auf die Belagsoberfläche, welcher sowohl unter einem PW-Reifen als auch unter den meisten LW-Reifen entsteht. Die grössere Belastung eines LW wirkt sich selbstverständlich bei der Dimensionierung eines Oberbaus aus, da die grössere Aufstandsfläche der Auflast eine grössere Tiefenwirkung bewirkt. Im Zusammenhang mit der im Forschungsprojekt anvisierten Veränderung der Oberflächeneigenschaften einer Deckschicht hat die grössere Aufstandsfläche der LW jedoch keinen Einfluss.

3.4.2 Reifendruck

Im Rahmen der Parameterstudie mit dem IMPACT II wurde festgestellt, dass der Reifeninnendruck (siehe Tabelle 7) die Breite der Aufstandsfläche in geringem Masse beeinflusst.

Da der IMPACT III möglichst realitätsnah den Abrollvorgang im Labor nachbilden soll, wurde ein Reifendruck gewählt, welcher demjenigen eines Mittelklasse-Personenwagen entsprach. Auch wurden die Empfehlungen des Reifenherstellers berücksichtigt.

Der Reifeninnendruck wurde auf 2.3 bar festgelegt.

3.4.3 Schlupf

Im Unterschied zum IMPACT II kann der Schlupf beim Nachfolgemodell stufenlos eingestellt werden. Diese Möglichkeit wurde dazu genutzt, in einem relativ kleinen Bereich unterhalb von 4 % den Schlupf zu variieren.

Auf die Parameterstudie mit dem Schlupf von 1% Prozent wurde verzichtet, da erwartet werden konnte, dass bei diesem Schlupf die mechanische Beanspruchung zu gering war.

Mit Prüfplatten (Mischgut AC MR 8), wurden Versuche mit einem Schlupf von 2%, 3% und 4% durchgeführt. In Tabelle 10 ist eine Übersicht über die Beobachtungen an der Oberfläche der Prüfplatten gegeben.

Tabelle 10 Übersicht der Parameterstudien zur Ermittlung des optimalen Schlupfs

Versuch	Schlupf	Beobachtung
1	4%	Schon nach wenigen 10'000 Überrollungen waren Kornausbrüche auf den Probeplatten beobachtbar (Siehe Abb.23.)
2	2%	Es zeigte sich, dass der Schlupf zu gering war, denn die Körner an der Prüfkörperoberfläche waren nach mehreren 100'000 Zyklen noch vollständig mit einem Bitumenfilm bedeckt.
3	3%	Es waren nur einzelne Kornausbrüche zu beobachten; zudem war der Bindemittelfilm an der Oberfläche stärker abgefahren als mit 2 % Schlupf.



Abb.23 Versuch mit 4% Schlupf. Erkennbar Kornausbruch auf der Plattenoberfläche

Die Parameterstudie mit unterschiedlichem Schlupf (2%, 3% und 4%) zeigte, dass ein Schlupf von 3 % der beste Kompromiss zwischen erwünschtem, möglichst grossem Abrieb und unerwünschten Kornausbrüchen darstellte.

3.4.4 Temperatur

Die Prüftemperatur hat zwei gegensätzliche Bedingungen zu erfüllen:

1. Sie soll möglichst hoch sein, um Veränderungen der Oberflächen-Textur zu begünstigen.
2. Sie soll nicht zu hoch liegen, denn plastische Verformungen der Prüfkörper beeinflussen die Messung des Luftströmungswiderstandes in unzulässiger Weise.

Um die obenstehenden zwei Punkte möglichst zu erfüllen, wurde die Temperatur der Probe an deren Oberfläche gemessen und die Temperatur wurde auf der Basis dieser Messung gesteuert.

Aus den Untersuchungen mit dem IMPACT II war bekannt, dass bei Temperaturen von 50°C das Risiko der Spurrinnenbildung erhöht ist. In einem ersten Versuch wurde dies auch für den IMPACT III bestätigt. Bereits nach 15'000 Überrollungen, konnten Deformationen gemessen werden (siehe Abb.24).



Abb.24 Spurrillenbildung bei einer Prüftemperatur von 50°C nach 15'000 Überrollungen

In einem weiteren Überrollversuch bei einer Temperatur von 35°C konnten nach 200' 000 Überrollungen keine Verformungen gemessen werden. Der Bau einer komplett neuen Prüfmaschine hatte sehr viel Zeit in Anspruch genommen und somit zu erheblichen Verspätungen geführt. Es wurde daher an dieser Stelle auf eine weitere Optimierung der Temperatur zwischen 35 und 50°C verzichtet.

3.4.5 Reifenprofil

Um die Zeit, in welcher wir auf die bestellten Reifen warteten zu nutzen, haben wir Versuche mit einem längsgerillten Reifen durchgeführt. Diese Versuche hatten eine beschränkte Aussagekraft hinsichtlich der Veränderung der Textur der Prüfkörperoberfläche, sie dienen jedoch auch dazu, das Prüfgerät IMPACT III einer Langzeitbelastung auszusetzen. Der verwendete Prüfreifen C-L-DK-Si (siehe Tabelle 8) wies, wie bereits erwähnt, nicht das von uns bestellte V-Profil auf.

Erwartungsgemäss bildeten sich an der Oberfläche der Asphalt-Prüfkörper die Längsrillen des Reifens ab (siehe Abb.25).



Abb.25 Längsrillen des Reifens C-L-DK-Si (siehe Tabelle 8) und deren Abdruck auf den Probeplatten nach 20'000 Überrollungen und Prüfkörpertemperatur von 35°C

Ein weiterer Versuch wurde mit einem auf dem Markt erhältlichen Reifen ohne Längsrillen beschafft und eingesetzt. Der Reifen mit der Bezeichnung „V-Markt“ ist in der Tabelle 8 beschrieben. Die durchgeführten Überrollversuche zeigten wie erwartet, dass keine Abbildung des Reifenprofil auf der Prüfplatte zu beobachten waren. Die Prüfplatte wurde aus Mischgut SDA 8 hergestellt (siehe Abb.26).



Abb.26 Prüfreifen mit der Bezeichnung „V-Markt“ und Prüfplatte nach 400'000 Überrollungen; es sind weder Längsrillen, noch sich wiederholende Abdrücke ersichtlich

3.4.6 Festlegung der Versuchsparameter

Aufgrund der durchgeführten Parameterstudie, bei welcher die in Tabelle 11 aufgeführten Variationen untersucht wurden, konnten die Versuchsparameter provisorisch wie folgt festgelegt werden:

- Auflast: 400 kg
- Reifendruck: 2.3 bar
- Schlupf: 3% (synchron zur Fahrtrichtung wechselt die Richtung des Schlupfes)
- Temperatur: 35°C
- Reifen: C-V-DK-Si gemäss Tabelle 8

Tabelle 11 Übersicht der verwendeten Parameter der Studien

Parameter	IMPACT II	IMPACT III
Überrollungen	x	x
Temperatur	x	x
Auflast	x	x
Reifendruck	x	x
Reifenprofil	x	x
Gummimischung		x
Schlupf	x	
Schluf (stufenlos)		x

3.5 Herstellung und Verdichtung der Probepplatten

3.5.1 Festlegung des Standardverfahrens

Zur Herstellung einer Platte 180 x 500 mm sind je nach Mischgutsorte und Plattendicke zwischen 11 kg (AC 11 L mit Schichtdicke 50mm) und 6 kg (SDA 8B mit Schichtdicke 30 mm) Mischgut erforderlich. Das Mischgut kann entweder in einer Aufbereitungsanlage hergestellt, oder gemäss SN 670 435 [29] im Labor gemischt werden.

Die Prüfkörper wurden im Walzsegmentverdichter gemäss SN 670 433 [13] verdichtet. Um die Laufbahn mit einer Länge von 10000 mm zu erstellen, wurden 2 Platten mit den Massen 500 x 180 mm hintereinander auf den Probentisch gelegt. Der Probentisch wies zudem eine feinverstellbare Arretierung der Platten auf, sodass eventuelle Dickenunterschiede der beiden Probekörper auf 0.1 mm genau ausgeglichen werden konnten.

Da zwei Platten erforderlich sind, können auch zwei unterschiedliche Asphaltarten gleichzeitig untersucht werden.

3.5.2 Validierung der Probepplatten

Verdichtungsgrad

Für die Validierung wurden mit dem Walzsegmentverdichter Probepplatten hergestellt (siehe Tabelle 12). Es zeigte sich, dass diese Probepplatten Verdichtungsgrade aufwiesen, welche denjenigen von in situ Belägen entsprachen. Die erreichten Verdichtungsgrade erfüllten die Anforderungen der SN-Norm 640 430 [31].

Tabelle 12 Übersicht der Verdichtungsgrade von hergestellten Probepplatten

Mischgutsorte	Verdichtungsgrad [%]
AC 11 N	100.2
AC 11 L	100.0
ACMR 8	99.9
SDA 4 A	98.2
SDA 4 C	101.8
SDA 6 C	98.7
SDA 8 B	98.8

Oberflächeneigenschaften

Des Weiteren wurden für die Validierung der Probenplatten die Texturkennwerte wie Luftströmungswiderstand (R_s), die mittlere Profiltiefe MPD, der Gestaltfaktor g und die effektive Rauigkeitstiefe $R_{\text{eff,max}}$ Probenplatten gemessen und mit den in-situ gemessenen Texturdaten verglichen (siehe Tabelle 13). Die IMPACT Messungen wurden nach rund 2000 Überrollungen durchgeführt. Die in-situ Messung erfolgt in der Regel erst 2-3 Monate nach der Inbetriebnahme. So kann in beiden Fällen die Oberfläche als eingefahren angesehen werden.

Beim Vergleich der Rauigkeits-Spektren (λ_{max} , $R_{\text{eff,max}}$) fällt die hervorragende Übereinstimmung zwischen Labor und in-situ Messung beim SDA 8 B auf. Beim SDA 4 ist zu bemerken, dass feinere Körnungen generell flachere Spektren aufweisen, sodass die Bestimmung des Maximum der Verteilung etwas zufällig ist. λ_{max} wird in Terzbänder eingeteilt; wobei 6.3 mm das benachbarte Band zu 8.0 mm ist.

Tabelle 13 Vergleich der Texturkennwerte der IMPACT Platten mit in-situ Messungen

Mischgut	SDA 8 B		SDA 4 C	
	IMPACT	in-situ	IMPACT	in-situ
Messort	747	29803	3157	n.b
R_s [Pas/m]	747	29803	3157	n.b
MPD [mm]	0.9	0.76	0.6	1.05
g [%]	80.0	87.7	81	82.4
λ_{max} [mm]	12.5	12.5	8.0	6.3
$R_{\text{eff,max}}$ [μm]	214	202.2	107	130

4 Bestimmung des Rollgeräusches im Labor

Das in der Reifen-Fahrbahn-Kontaktfläche entstehende Rollgeräusch lässt sich im Labor nicht direkt messen, da die Antriebsmotoren zu laut sind. Eine Abkapselung des Reifens würde konstruktive Massnahmen erfordern, welche die Ausmasse der Prüfmaschine extrem anwachsen liessen. Dies würde zu einer Rundlauf-Anlage mit einem Durchmesser von mehreren Metern führen. Aus diesem Grunde stützt sich der IMPACT auf die rechnerische Bestimmung der Rollgeräusche, welche aufgrund von physikalischen Messungen an der Belagsoberfläche erfolgt. Zur Berechnung des Rollgeräusches wurde die Software SPERoN [26] ausgewählt. Abklärungen vor Beginn des Forschungsprojektes zeigten, dass eine Anwendung der SPERoN-Software im Labor möglich ist.

SPERoN (Statistical Physical Explanation of Rolling Noise) ist ein mathematisches Simulationsmodell, welches aus Kennwerte der Oberfläche (Textur, Luftströmungswiderstand, akustische Adsorption und mechanische Impedanz) die akustischen Eigenschaften einer Deckschicht berechnen kann. Dabei greift das Programm auf eine Datenbank mit ca. 30 verschiedenen Reifen, welche bezüglich ihrer dreidimensionalen Profilgeometrie und ihrer struktur-dynamischen Eigenschaften vermessen wurden. So werden im SPERoN-Simulationsmodell nicht nur die Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche berücksichtigt, sondern auch die unterschiedlichen Reifen und deren Reaktion auf Unterschiede der Fahrbahnoberfläche.

Die bisherigen Anwendungen des Simulationsmodells erfolgte bei in-situ-Messungen. Die für die Anwendung im Labor erforderlichen Anpassungen wurden im Rahmen eines anderen Forschungsprojektes (EP 4) [27] durchgeführt. Die wesentlichen Arbeiten und Ergebnisse seien hier kurz zusammengefasst.

Im Projekt EP4 wird die Ertüchtigung, Anpassung und Erprobung von Messverfahren zur Bestimmung akustisch relevanter Belageigenschaften hinsichtlich des Einsatzes im IMPACT-Prüfstand durchgeführt. Die Messgrössen sollen geeignet sein, in das Rechenmodell SPERoN für die Vorhersage von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen eingespeist zu werden, um eine direkte Aussage für den Lärminderungswert des Prüfkörpers im jeweiligen Zustand zu erhalten. Im Projekt EP4 [27] waren folgende Arbeitspakete zu bearbeiten:

1. Labormessung und Bewertung der Textur
2. Labormessung und Bewertung des Luftströmungswiderstands im Reifen-Fahrbahn-Kontakt
3. Labormessung und Bewertung des Schallabsorptionsgrads
4. Labormessung und bewertung der mechanischen Impedanz
5. Simulation des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs anhand der Labormesswerte für die oben genannten Fahrbahnparameter

Die Messverfahren zur Erfassung der relevanten Grössen Textur, Luftströmungswiderstand und Schallabsorptionsgrad wurden den Laborbedingungen angepasst und mittels Vergleichsmessungen evaluiert. Dabei wurden zwei Deckschichten mit den üblichen Verfahren in-situ gemessen. Aus diesen Deckschichten wurden Platten aus der Strasse herausgeschnitten und passgenau in den IMPACT-Prüfstand eingebaut. An diesen Prüfkörpern wurden die Laborprüfmethoden angewendet und die Ergebnisse mit den in-situ-Werten verglichen. Die mechanische Impedanz spielt bei Asphalt-Mischgut eine untergeordnete Rolle, da die Unterschiede zwischen dem Gummi des Reifens und der Strassenoberfläche sehr gross sind. Falls elastische Deckschichten entwickelt würden, bei welchen die Impedanz in einer ähnlichen Grössenordnung wie beim Gummi der Reifen zu liegen kommen würde, wäre es von Interesse diesen Wert in die Berechnung zu integrieren.

Die im Kapitel 5 „Validierung des Prognoseverfahrens“ durchgeführten Messungen erfolgten mit den im EP 4 optimierten Labor-Prüfmethoden.

5 Validierung des Prognoseverfahrens

5.1 Wahl der Deckschichten

Das untersuchte Mischgut wurde aus Probestrecken beschafft, bei welchen mit periodischen Messungen die Entwicklung der akustischen und belagstechnischen Parameter verfolgt wird (siehe Tabelle 14). Nur so kann die Entwicklung der akustischen Eigenschaften im IMPACT mit der Entwicklung in der Praxis verglichen werden. Es wurden folgende zwei Mischgut-Sorten gewählt:

- SDA 8 B; PmB 45/80-65 (CH-E)
Teststrecke in Näfels
Bestandteil des TP 3 [10] ; eingebaut 2012
- SDA 4 C; PmB 45/80-65 (CH-E)
Teststrecke in Beinwil am See, AG
Monitoring der Strecke durch das Tiefbauamt Kt AG: eingebaut 2013

Tabelle 14 Kennwerte der beiden Mischgute mit welchen die Validierung durchgeführt wurde

Mischgut	Mischgut		Eingebaute Schicht		
	Lös. Bindemittelgeh. [M.-%]	Hohlraumgehalt Marshall [Vol.-%]	Schichtdicke [mm]	Hohlraumgehalt BK [Vol.-%]	Verdichtungsgrad [Vol.-%]
SDA 8 B	6.17	10.0	32	13.5	98.9
SDA 4 C	6.02	19.4	35	18.2	101.0

Im Labor wurden Platten mit dem Walzsegmentverdichter [13] in hergestellt. Zur Kontrolle der Verdichtung wurde der Verdichtungsgrad an den Probepplatten mit folgendem Ergebnis bestimmt (siehe Tabelle 15):

Tabelle 15 Kennwert der beiden verwendeten Probepplatten

Mischgut	Verdichtungsgrad [%]	Schichtdicke [mm]
SDA 8 B	98.8	30.4
SDA 4 C	101.8	36.1

Beim SDA-Mischgut handelt es sich um einen Semi-Dichten Asphalt gem. [32]. Semidichte Asphalte weisen einen charakteristischen Marshall-Hohlraumgehalt zwischen 12 und 20 Vol.-% auf. Sie sind in einer „Schweizer Regel SNR“ beschrieben; dabei handelt es sich um „normative Dokumente mit limitiertem Konsens“, welche nicht zwingend unter Einbeziehung aller interessierten Kreise erarbeitet werden und daher schneller publiziert werden können. Dies kann leider zu Verwirrungen in den Begriffen führen; so hiessen die SDA in einem nicht publizierten Entwurf LNA (Low Noise Asphalt).

5.2 Messprogramm

Es wurden folgende Messungen periodisch durchgeführt:

- Luftströmungswiderstand
- Texturmessung
- Akustische Absorption

In diesem Messprogramm wurde der Reifen V-Markt (siehe Tabelle 8) verwendet.

Vor der Nullmessung wurden die beiden Prüfplatten SDA 4 C und SDA 8 B mit 2000 Überrollungen eingefahren. Die anschliessenden Messungen wurden nach folgendem Schema durchgeführt (siehe Tabelle 16)

Tabelle 16 Wochenprogramm der Messungen und der Belastung der Probeplatten

Montag	Messungen und visuelle Beurteilung an den Oberflächen
Montag bis Freitag	100'000 Überrollungen
Freitag	Messungen und visuelle Beurteilung an den Oberflächen
Freitag bis Montag	72'000 Überrollungen

Bis zum Versuchsende wurden etwa 5'200'000 Überrollungen absolviert, dazu war ein Zeitraum von insgesamt 36 Wochen (= 9 Monate) erforderlich.

5.3 Ergebnisse

In einem ersten Schritt werden die einzelnen Werte der Textur und der Luftströmungswiderstand dargelegt und kommentiert. Im Kapitel 5.3.4. werden dann im zweiten Schritt die Ergebnisse der SPERoN-Modellrechnungen aufgezeigt.

5.3.1 Luftströmungswiderstand

Der Luftströmungswiderstand wurde periodisch gemessen; die Ergebnisse sind im ANHANG 1 Tabelle 1 und 2 detailliert aufgeführt und in Abb. 27 grafisch dargestellt.

Im Vergleich zu den Messungen des Luftströmungswiderstandes in situ wurden erhebliche Unterschiede festgestellt, wie dies in Tabelle 17 zu sehen ist.

Tabelle 17 Vergleich des Luftströmungswiderstandes, gemessen in situ und an den mit dem gleichen Mischgut im Labor verdichteten Platten

Strecke	Im Labor verdichtet (Walzsegment-Verdichter)				In situ Verdichtung			
	Schichtdicke [mm]	Verdichtungsgrad [%]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]	Luftströmungswid- erstand [Pa*s/m]	Schichtdicke [mm]	Verdichtungsgrad [%]	Hohlraumgehalt BK [Vol.-%]	Luftströmungs- widerstand [Pa*s/m]
SDA 4 Beinwil	36	101.8	17.9	3157	35	101.5	18.2	n.b.
SDA 8 Näfels	30	98.8	13.7	747	32	98.9	13.5	29803

Dass der Luftströmungswiderstand des feineren Mischgutes SDA 4 gegenüber demjenigen des gröberen Mischgutes SDA 8 grösser ist, entspricht den Erwartungen und auch den Erfahrungen aus der Praxis. Die Zunahme des Luftströmungswiderstandes in Abhängigkeit zur Anzahl Überrollungen (siehe Abb. 27) stimmt mit den üblichen Entwicklungen, welche in situ beobachtet werden, überein. So wurde bereits in [10] innerhalb eines Jahres eine markante Zunahme des mittleren Luftströmungswiderstandes verschiedener Teststrecken festgestellt, wie dies in Tabelle 18 zu sehen ist. Bereits nach ca. 50 000 Überrollungen hat sich der Luftströmungswiderstand praktisch verdoppelt; die weitere Zunahme erfolgt sehr langsam.

Bei 1.7 Mio Überrollungen ist ein systematischer Fehler in der Messung entstanden; der Ausschlag nach unten ist deutlich zu erkennen.

Der Vergleich des Luftströmungswiderstandes Labor/in-situ kann leider nicht vollzogen werden, denn einerseits wurde dieser Wert in Beinwil nicht gemessen, andererseits liegt der Wert der Teststrecke Näfels erstaunlich hoch. Die Strecke Näfels wurde im Rahmen des TP3 Monitoring gemessen, der entsprechende Kommentar aus dem Jahresbericht 2014 [28] lautet:

Bemerkenswert ist, dass die Deckschicht in Näfels, trotz relativ hohem Hohlraumgehalt der Bohrkern (13.7 Vol.-%) akustisch gesehen ein dichter Belag ist. Das bedeutet, dass die Deckschicht zwar Hohlräume enthält, diese Hohlräume jedoch in keiner Art und Weise akustisch zugänglich sind.

Der Einbau und die Verdichtung in Näfels haben zu einer dichten Deckschicht geführt, während die Verdichtung im Labor dank der Verwendung eines Walzsegmentverdichters, bei welchem eine Glattmantelwalze nachbildet wird, eine offenerere Oberfläche erzeugt hat.

Tabelle 18 Vergleich des Luftströmungswiderstandes, gemessen im Abstand eines Jahres auf mehreren Vergleichsstrecken; aus [4]

Luftströmungswiderstand in den Jahren 2009 und 2010. Werte 2009 sind zum Teil Einzelmessungen. Werte 2010 sind Mittelwerte und Standardabweichungen aus sechs Einzelmessungen die über eine Radspurlänge von 20 Meter verteilt sind.

Teststrecke und Mischgutsorte	Luftströmungswiderstand [Pa*s/m]		
	2009	2010	Standardabweichung
	Mittelwert	Mittelwert	
Sargans ACMR 4 Ga	21'600	36'500	± 10'200
Sargans ACMR 8 EOS Gummigranulat	8'500	4'200	± 1'500
Sargans AC 11	29'200	73'200	± 32'300
Sessa AC 11 Leca	25'800	68'900	± 14'200
Gurmels Wecophone 6	31'900	48'600	± 5'500

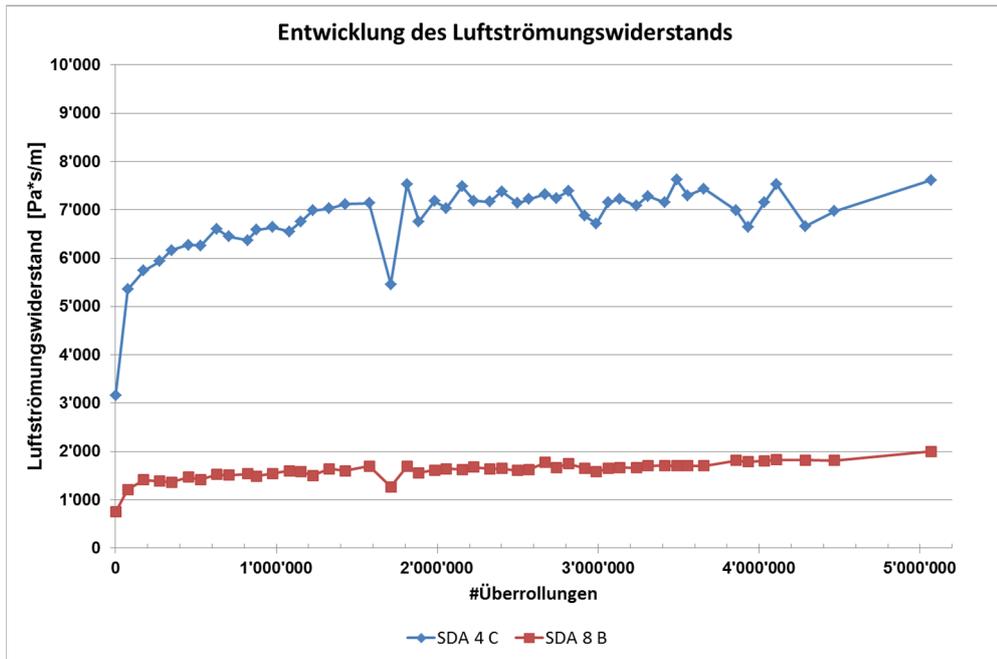


Abb. 27 Luftströmungswiderstand der Prüfplatten in Abhängigkeit der Überrollungen

Des Weiteren wurde der relative Anstieg des Luftströmungswiderstand, normiert auf den Ausgangszustand von 2'000 Überrollungen, bei beiden Prüfplatten berechnet. Interessant ist, dass der relative Anstieg des Luftströmungswiderstandes - über die ganze Versuchsdauer gesehen - für beide Mischgutsorten gleich war (siehe Abb.28).

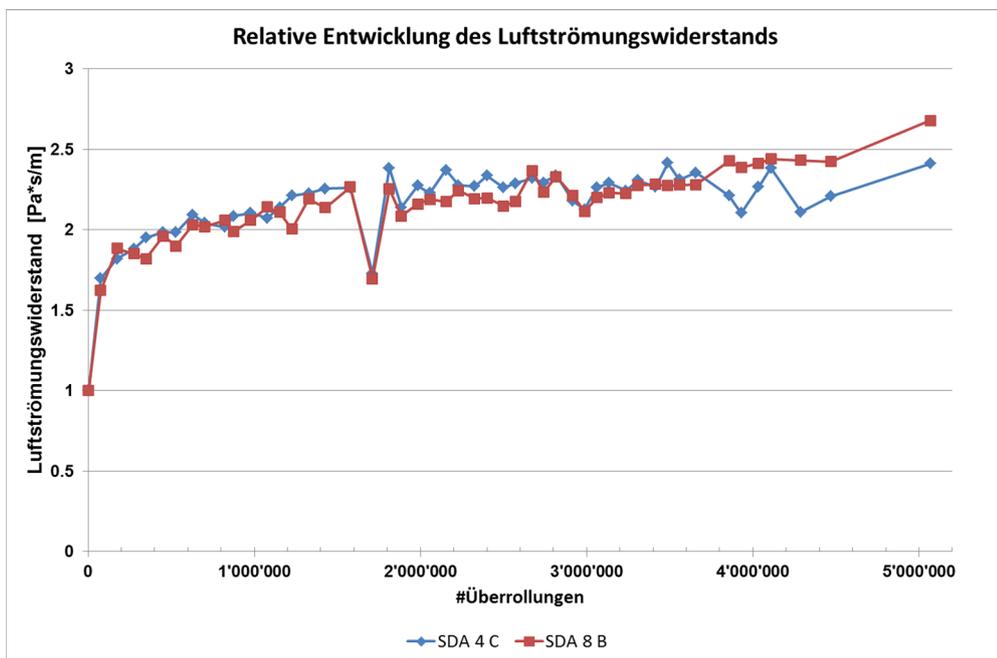


Abb.28 relativer Luftströmungswiderstand der Prüfplatten in Abhängigkeit der Anzahl Überrollungen (bezogen auf den Anfangswert bei 2'000 Überrollungen)

5.3.2 Schallabsorption

Die Schallabsorption bei hohlraumreichen Deckschichten ist jeweils abhängig vom hohlrauminduzierten Luftströmungswiderstand. Wie im Kapitel 5.3.1 beschrieben, zeigte es sich, dass der Anstieg des Luftströmungswiderstandes auf beiden Prüfplatten nach 50'000 Überrollungen bis zum Versuchsende nur noch gering war. Daher konnte davon ausgegangen werden, dass sich der Schallabsorptionsgrad nur noch geringfügig änderte. Aus diesem Grund konnte auf eine durchgehende Messung des Schallabsorptionsgrad verzichtet werden; der Schallabsorptionsgrad wurde punktuell gemessen.

5.3.3 Texturwerte

Das Ziel des Forschungsprojektes besteht darin, im Labor Veränderungen der Textur der Belagsoberfläche zu erzeugen, wie sie in der Praxis festgestellt werden. Zur Validierung des Verfahrens wurden daher nicht nur diejenigen Werte, welche für die SPERoN-Modellierung erforderlich sind gemessen, sondern auch weitere Texturwerte. Die Wahl dieser Kenngrößen der Textur lehnte sich an den jährlichen Messungen des Teilprojektes TP3 „long-term Monitoring“ [10]: mittlere Profiltiefe (MPD) / Gestaltfaktor g und effektive Rauigkeitstiefe:

- *mittlere Profiltiefe (MPD)*

Wie zu erwarten war, weist die Probeplatte mit dem gröberen Mischgut (SDA 8 B) eine grössere mittlere Profiltiefe (0.9 mm) auf, als die mit feinerem Mischgut (SDA 4 C) hergestellte Platte (0.6 mm). In der Abb.30 ist die Entwicklung der mittleren Profiltiefe des Mischgutes SDA 8 D auf der Teststrecke Näfels der Entwicklung der mittleren Profiltiefe des gleichen Mischgutes im Labor gegenübergestellt. Bei beiden Prüfplatten (SDA 8 B und SDA 4C) kommt es während der ersten 100'000 Überrollungen zu einem raschen Abfall der mittleren Profiltiefe um ca. 0.2 mm. Anschliessend pendelt sich beim Mischgut SDA 8 B die mittlere Profiltiefe nach einem kleinen Anstieg bei ca. 0.75 mm ein. Das Mischgut SDA 4C zeigt ein ähnliches Verhalten mit einem Endwert von ca. 0.45 mm (siehe Abb.29).

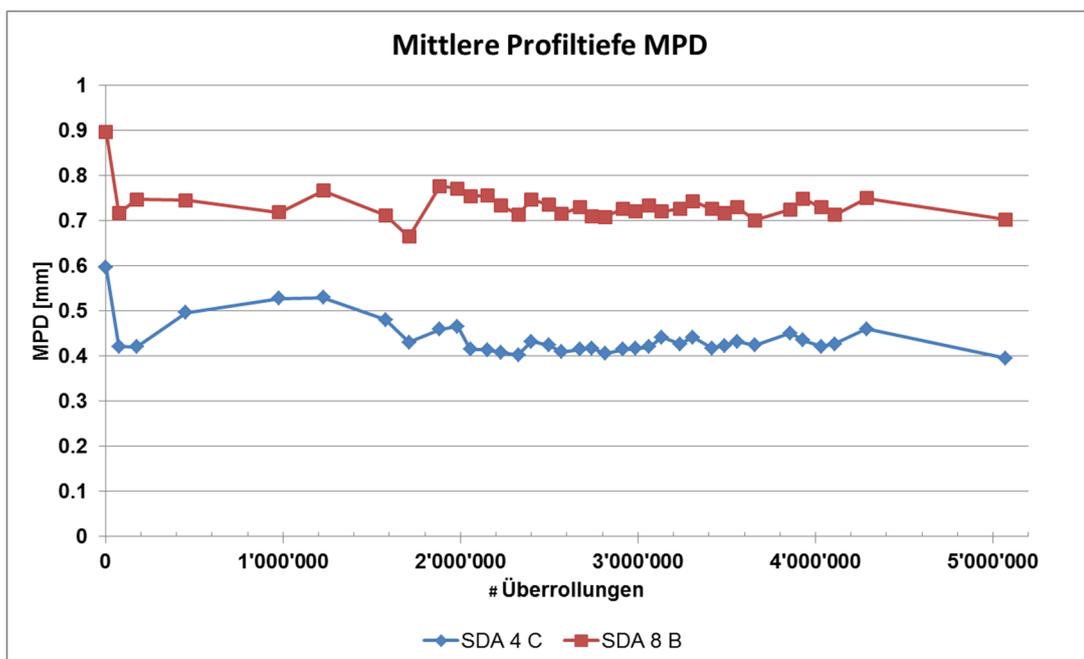


Abb.29 Mittlere Profiltiefe (MPD) der Prüfplatten in Abhängigkeit der Anzahl Überrollungen

Der plötzliche Anstieg der mittleren Profiltiefe nach ca 1'800'000 Überrollungen ist auf das Auftreten von Kornausbrüchen zurückzuführen (siehe Abb.37)

Ab ca. 2 Mio Überrollungen pendelt sich der Wert des MPD für beide untersuchten Platten auf den Endwert ein.

In Abb.30 ist die Entwicklung der mittleren Profiltiefe MPD von 4 verschiedenen Teststrecken mit ähnlichen Mischgutsorten in Abhängigkeit der Anzahl Überrollungen dargestellt. Auch in der Praxis nimmt der Wert vorerst zu, um dann wieder abzunehmen.

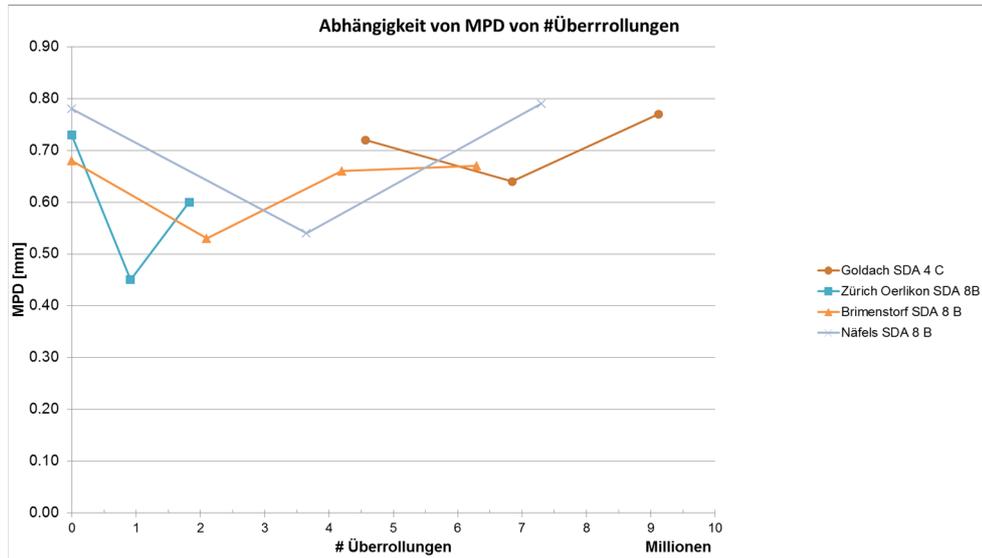


Abb.30 Darstellung der Entwicklung der MPD-Werte der lärmarmen Beläge innerorts in Funktion der Anzahl Überrollungen (aus TP3 „Langzeitmonitoring“ [10])

- *Gestaltfaktor g*

Der Gestaltfaktor g wird aus der statistischen Auswertung der Häufigkeit der Profiltiefen berechnet (siehe Abb.31). Konkave Formen (Plateau mit Tälern) gelten als lärmarm, da die Reifen weniger angeregt werden und somit weniger Lärm durch die Schwingungen des Reifens entsteht. Konkave Oberflächen bieten der zwischen Reifen und Fahrbahn eingepressten Luft genügend Raum, um sich ohne Zisch-Laute zu entspannen (Air-Pumping-Effekt). Als „konkav“ gelten Oberflächen mit einem Gestaltfaktor oberhalb von 60%.

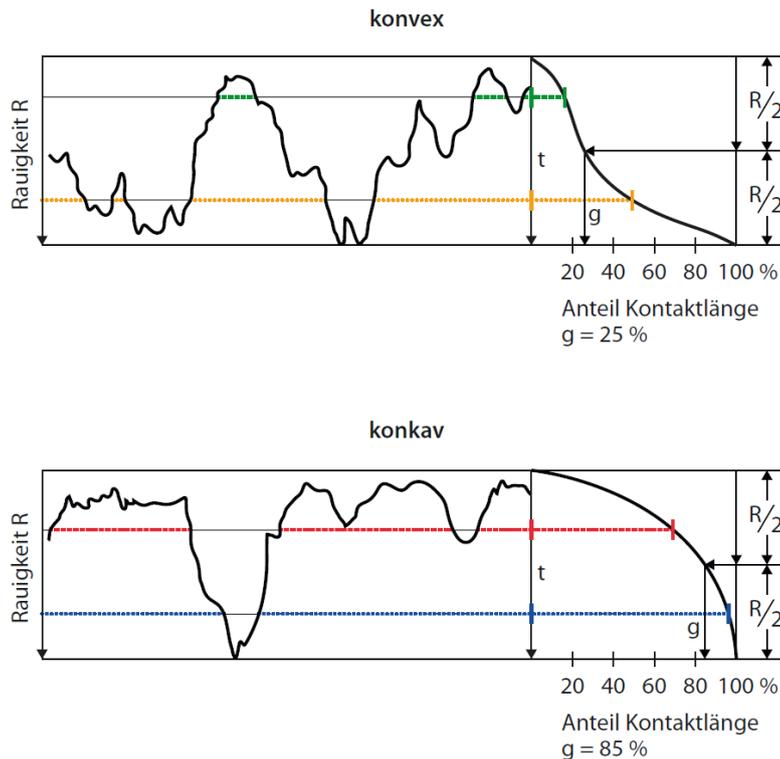


Abb.31 Der Gestaltfaktor g als Mass für die Beurteilung der konvexen/konkaven Beschaffenheit der Oberfläche

Beide Prüfplatten besitzen im Ausgangszustand einen Gestaltfaktor g der etwa 80 % beträgt (siehe Abb.32). Bei der Prüfplatte mit dem Mischgut SDA 8 B ist ein leichter Anstieg des Gestaltfaktor g auf 85 % beobachtbar, danach pendelt sich dieser Wert bei 82% ein, um dann auf 60 % zu fallen. Bei der Prüfplatte mit dem Mischgut SDA 4 C ist zu Beginn ebenfalls ein Anstieg des Gestaltfaktors zu beobachten, danach fällt er bei 1'000'000 Überrollungen auf einen minimalen Wert von 65% ab. Anschliessend pendelt sich der Wert zwischen 70 und 75 % ein.

Als erstrebenswert für einen lärmarmen Belag gilt ein Wert für den Gestaltfaktor von > 65%. Im Bericht des ersten Forschungspaketes [4] konnten kurz nach dem Einbau bei 2 von 13 Deckschichten ein Gestaltfaktor < 65 % gemessen werden. Nach 4 Jahren war der Gestaltfaktor bei 7 von 13 Deckschichten unterhalb 65 %. Der Gestaltfaktor kann einen allgemeinen Hinweis auf die akustischen Veränderungen geben, ist jedoch kein eindeutiger Indikator, denn es gibt auch Fälle mit relativ guten, akustischen Eigenschaften und ungenügendem Gestaltfaktor (zum Beispiel Sargans AC MR4 aus [4]).

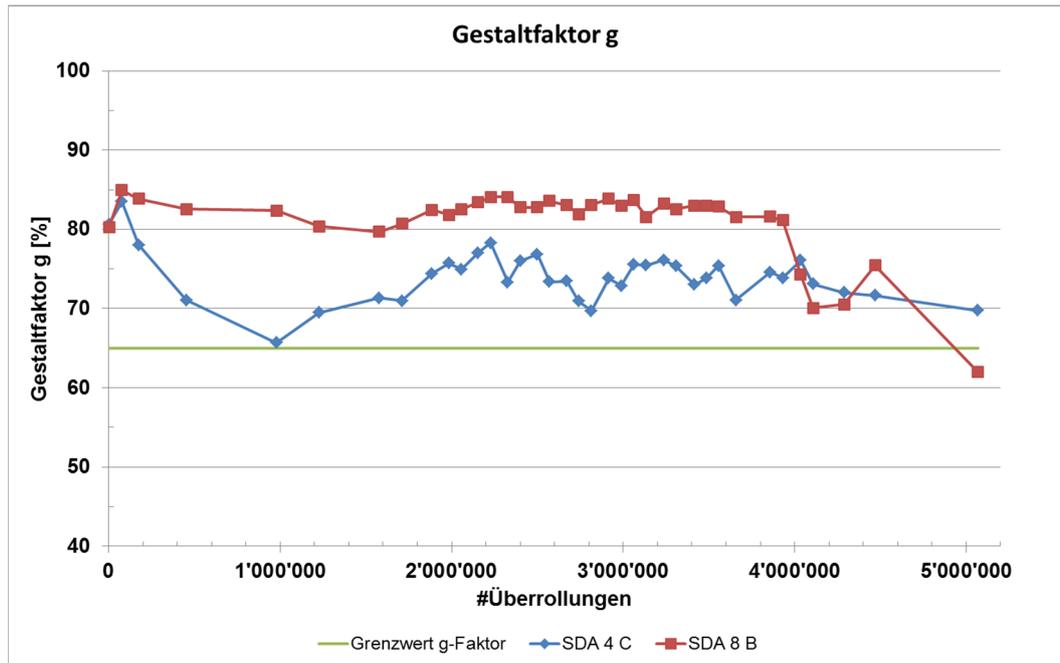


Abb.32 Gestaltfaktor g in Abhängigkeit der Überrollungen; ein Wert $> 65 \%$ ist erstrebenswert

- effektive Rauigkeitstiefe

Für die Schallentstehung ist die Oberflächentextur eines Belags entscheidend. Dabei wird das zuvor gemessene Belagsprofil mittels einer Fourier-Transformation in eine Serie von Sinus-Schwingungen mit bestimmter Wellenlänge und Amplitude zerlegt. Das Resultat wird als Texturspektrum in Terzbändern mit entsprechender Amplitude (= effektive Rauigkeitstiefe) im halb-logarithmischen Massstab dargestellt (siehe Abb.33). Diese von Sandberg [30] vorgeschlagene Darstellung fokussiert auf zwei Kenngrößen: einerseits die maximale Rautiefe ($R_{\text{eff max}}$), bezeichnet als „effektive Rautiefe“ und andererseits die Wellenlänge (λ_{max}) bei welcher die maximale Rautiefe auftritt. Typischerweise verändert sich das Spektrum infolge der Verkehrsbeanspruchung gem. Sandberg derart, dass einerseits das Maximum der Rautiefe kleiner wird und andererseits, dass es bei grösseren Wellenlängen auftritt. Das Maximum in der Grafik (siehe Abb.33) wandert „nach links unten“. Sandberg ging allerdings von einer sich kontinuierlich verändernden Oberfläche aus und berücksichtigte das Auftreten von Kornausbrüchen nicht.

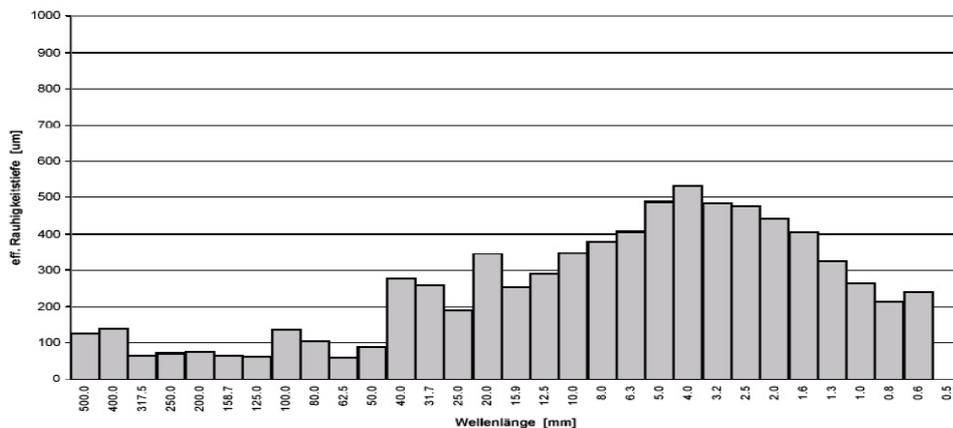


Abb.33 Darstellung eines Texturspektrums mit Einteilung der Wellenlängen in Terzbändern; die Amplitude wird als Rauigkeitstiefe bezeichnet.

Es zeigte sich wie erwartet, dass die Prüfplatte mit dem gröberen Mischgut grössere max. Rauigkeitstiefen als die Prüfplatte mit dem feineren Mischgut besass (siehe Abb.34). Des Weiteren war zu beobachten, dass bei der Platte mit dem Mischgut SDA 8 ab 600'000 Überrollungen eine stetige Abnahme der Rauigkeitstiefe stattfand. Anschliessend blieb der Wert bis zu ca. 1'750'000 Überrollungen konstant. Der darauf folgende, plötzliche Anstieg der Rautiefe kann mit dem Auftreten von Kornausbrüchen erklärt werden. Bereits im ersten Forschungspaket FP1 [4,5] konnte beobachtet werden, dass die Rautiefe in einer ersten Phase in Funktion der Anzahl Überrollungen abnimmt, um dann in einer zweiten Phase wieder anzusteigen. In der Abb.37, bei welcher 3D-Bilder einer kleinen Teilfläche der Oberfläche dargestellt sind, können tatsächlich Kornausbrüche beobachtet werden.

Bei der Probeplatte mit SDA 4 war nur ein markanter Abfall der Rauigkeitstiefe bis ca.100'000 Überrollungen zu beobachten. Danach pendelte sich der Wert bei rund 70 μm ein.

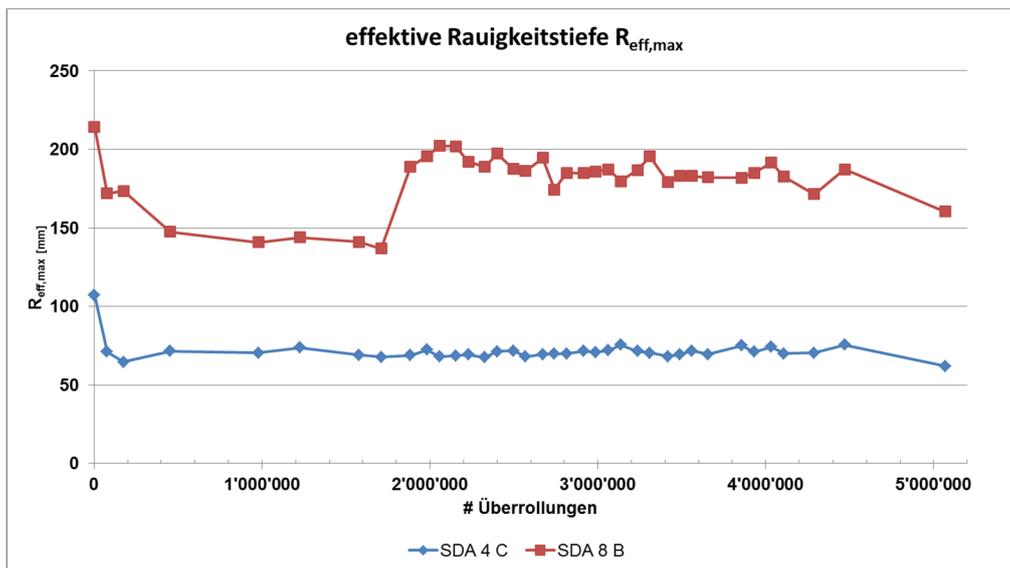


Abb.34 Entwicklung der effektiven Rauigkeitstiefe $R_{\text{eff,max}}$ in Abhängigkeit der Überrollungen

In Abb.35 ist die Entwicklung der Wellenlänge bei welcher die maximale Rauigkeitstiefe auftritt in Abhängigkeit zur Anzahl Überrollungen dargestellt. Beim SDA 8B hat sich der Wert λ_{max} um eine Terzbandklasse von 10 auf 12.5 erhöht. Beim SDA 4 pendelt der Wert zufällig zwischen dem Anfangswert 8 mm und der nächst höheren Terzbandklasse von 10 mm. Die bei den feinkörnigen Deckschichten üblicherweise sehr flache Verteilung führt wohl zu diesen Zufälligkeiten bei der Bestimmung des maximalen Wertes.

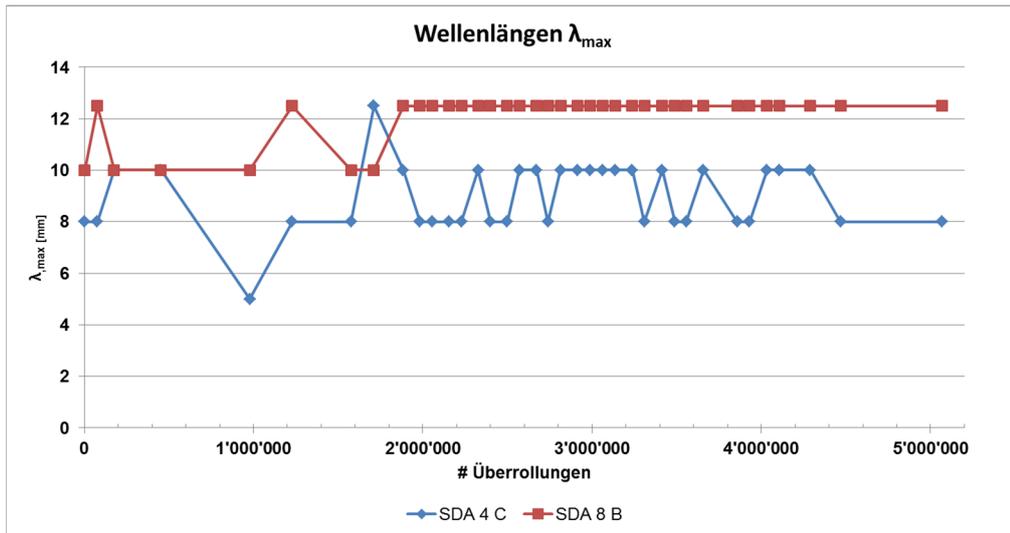


Abb.35 Wellenlänge bei welcher das Maximum der Rautiefe auftritt (λ_{max}) in Funktion der Anzahl Überrollungen

- Weiterführende Texturbetrachtungen

Des Weiteren wurde von den beiden Prüfplatten SDA 4 C und SDA 8 B ein 3d-Oberflächenmodell mit den Massen 15 cm x 4cm erstellt und ausgewertet. Dies erfolgte nach 2000 und 1'710'500 Überrollungen.

Die Auswertungen ergaben für die Prüfplatte mit dem Mischgut SDA 4, dass die Überrollungen zu einer generellen Abnahme der Profiltiefe führen. Erkennbar ist die Abnahme der Profiltiefe, durch eine Verschiebung von mehrheitlich blau-gelblichen Flächen (2'000 Überrollungen) zu mehrheitlich grün-gelblichen Flächen. Die durch die Überrollungen entstandene Einebnung ist an der Abnahme der roten Bereiche beim Vergleich der Bilder nach 2'000 Überrollungen mit demjenigen nach 1'710'500 Überrollungen (siehe Abb.36) zu erkennen.

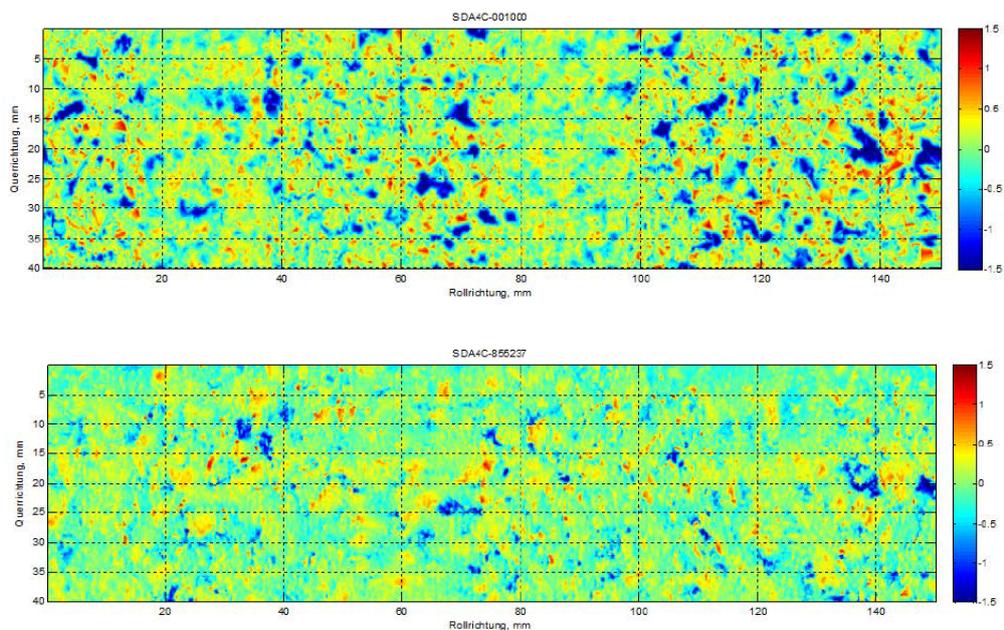


Abb.36 3d-Aufnahmen der SDA 4 C Platte bei 2'000 und 1'710'500 Überrollungen

Bei den 3d-Auswertungen der Prüfplatte mit dem Mischgut SDA 8B konnten über 1'710'500 Überrollungen sowohl die Abnahme der Profiltiefe wie auch die Einebnung der Prüfplattenoberfläche beobachtet werden (siehe Abb.37). Zudem ist auch die Entstehung von Kornausbrüchen erkennbar. Nach 1.7 Mio Überrollungen gibt es weniger Vertiefungen (Einebnung der Oberfläche), dafür sind die Vertiefungen grösser (Kornausbrüche). Bei der abgebildeten Teilfläche ist auch ein Kornausbruch sehr gut zu erkennen. Nach 2 000 Überrollungen ist die eingekreiste Stelle noch gelb-rötlich (entsprechend einer leichten Erhebung); nach 1 710 500 Überrollungen ist die Stelle dunkelblau (tiefer Krater ca. 8 x 5 mm).

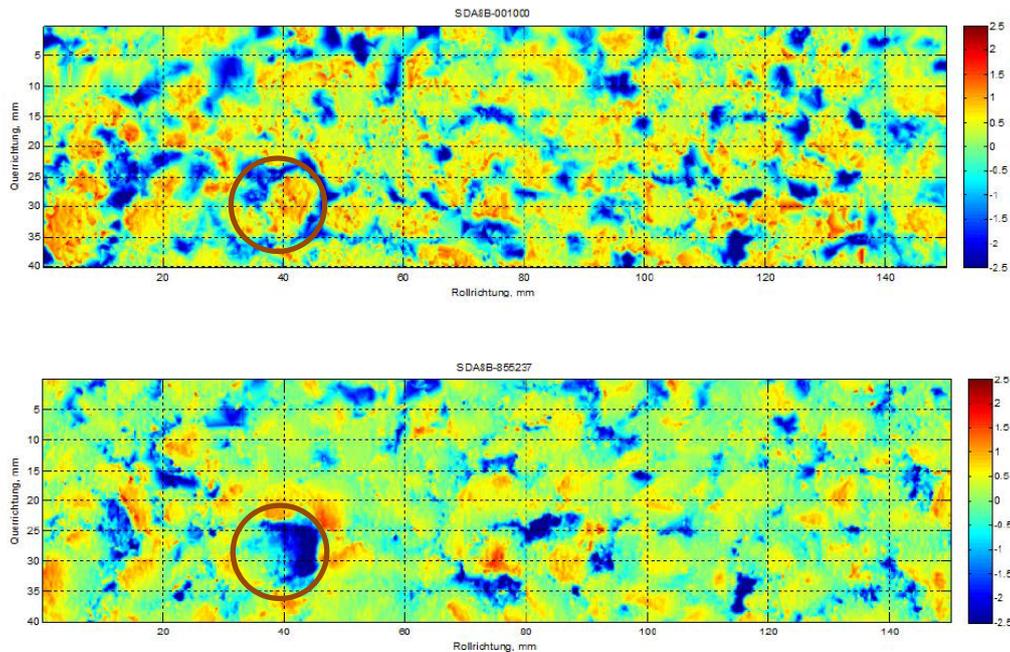


Abb.37 3d-Aufnahmen der SDA 8 B Platte bei 2'000 Überrollungen und 1'710'500 Überrollungen

5.3.4 Visuelle Aufnahme der Probplatten

Zu Beginn der Überrollungen war auf beiden Prüfplatten ein geschlossener, schwarzer Bindemittelfilm zu beobachten (siehe Abb.38), welcher mit zunehmender Anzahl Überrollungen abgefahren wurde. Zugleich war eine zunehmende Verschmierung der Oberfläche zu beobachten (siehe Abb.39). Gegen Ende des Versuches (ca. 3.8 Mio Überrollungen) gleicht die Oberfläche der Prüfkörper zunehmend der Oberfläche eines Belages unter Verkehr (siehe Abb.40).



Abb.38 Visuelle Begutachtung der Versuchsplatten SDA 4 C und SDA 8 B nach 2'000 Überrollungen



Abb.39 Visuelle Begutachtung der Versuchsplatten SDA 4 C und SDA 8 B nach 2'200'000 Überrollungen



Abb.40 Visuelle Begutachtung der Versuchsplatten SDA 4 C und SDA 8 B nach 3'552'000 Überrollungen

5.3.5 SPERoN-Modellierung

Aus den 3d-Aufnahmen der Oberflächentextur wurden x/y-Profile generiert, die gemeinsam mit den gemessenen Luftströmungswiderstandswerten für die SPERoN-Modellierung (= Berechnung des Gesamtpegel der Platten) verwendet wurden. Die SPERoN-Berechnungen wurden für die beiden Probeplatten SDA 8 B und SDA 4 C in Abhängigkeit der Überrollungen durchgeführt. Die Modellierung der Schallpegel wird in der Regel für die beiden Geschwindigkeiten 50 km/h und 80 km/h durchgeführt. Da das Ziel des vorliegenden Forschungsauftrages auf die Lärminderung innerorts fokussiert, wird im Weiteren nur die Geschwindigkeit von 50 km/h betrachtet. Bei den Ergebnissen der SPERoN-Berechnungen beträgt der Unsicherheitsfaktor ± 0.5 dB(A) für den Gesamtpegel. Dies bedeutet, dass Pegelunterschiede, welche grösser als 1 dB(A) betragen, als statistisch signifikante Unterschiede betrachtet werden können.

Beim Vergleich der SPERoN-Berechnungen zu Beginn und am Ende des Versuches liegt bei der Prüfplatte mit dem Mischgut SDA 4 C die Differenz unterhalb von 1 dB(A). Dies bedeutet, dass bei diesem Mischgut keine relevante Veränderung der akustischen Eigenschaften vorliegt (siehe Abb.41)).

Bei der Prüfplatte mit dem Mischgut SDA 8 B hingegen, liegt der maximale Pegelunterschied zwischen dem Anfangswert und dem Endwert von etwa 2.0 dB(A), was als statistisch relevanten Unterschied zu bezeichnen ist. Die Entwicklung des Gesamtpegels ist in Abb.42 dargestellt.

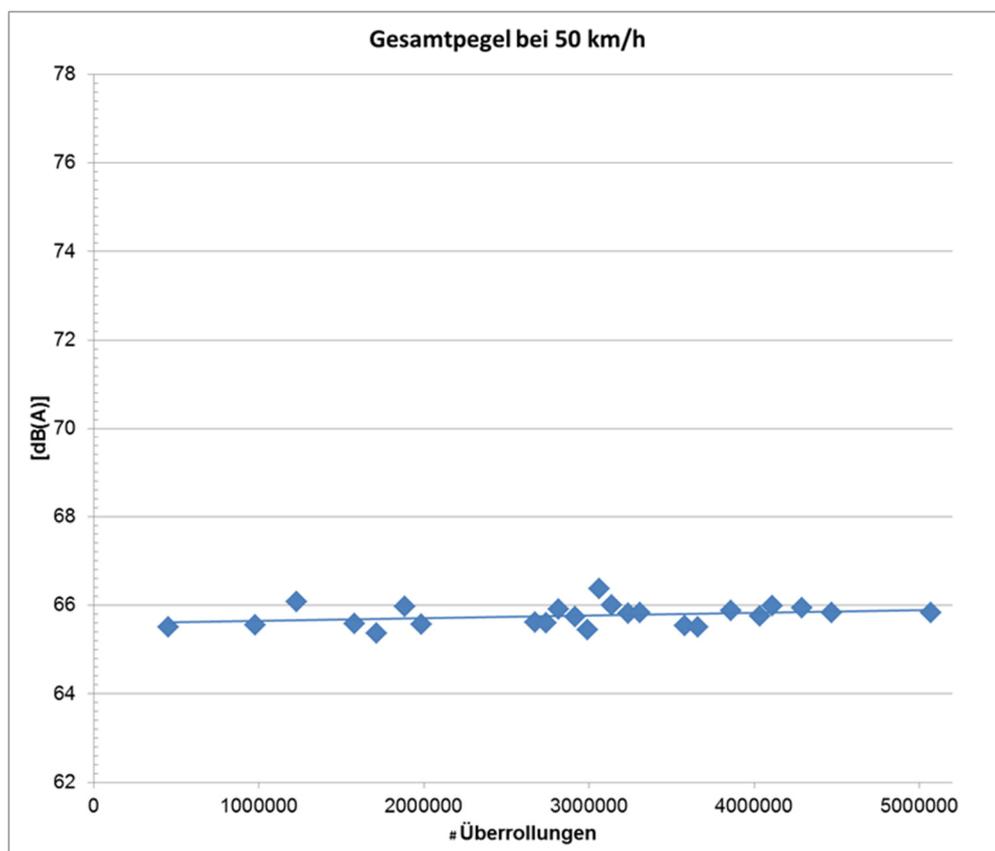


Abb.41 Entwicklung des Gesamtpegel in Abhängigkeit der Anzahl Überrollungen bei der Probeplatte SDA 4 C

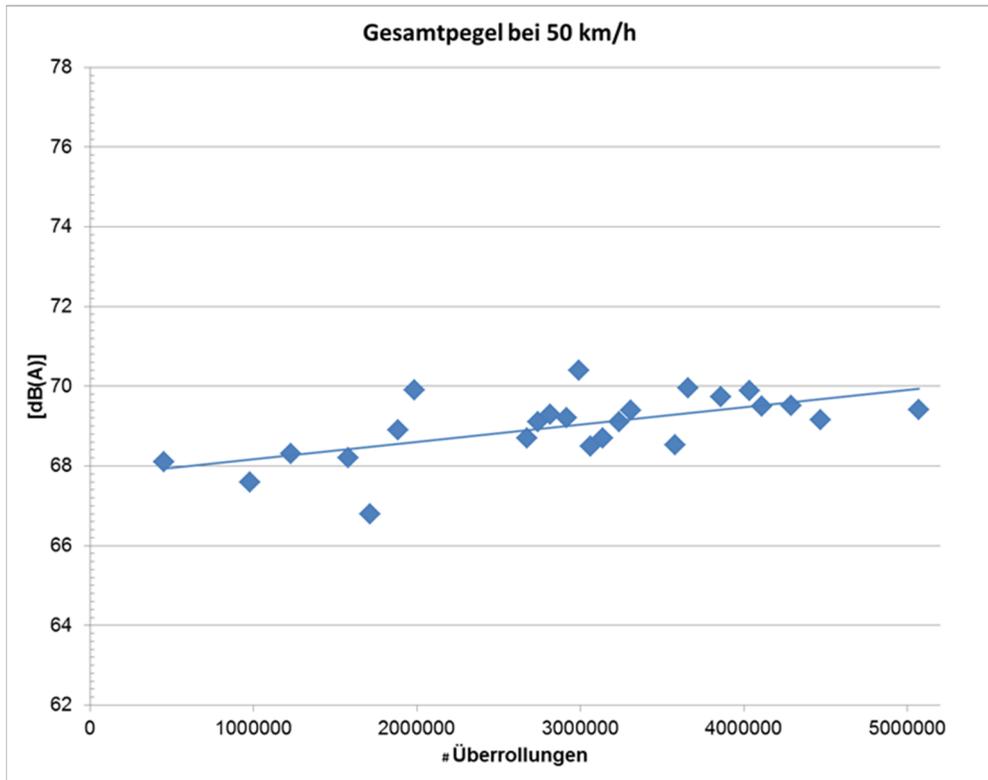


Abb.42 Entwicklung des Gesamtpegel in Abhängigkeit der Anzahl Überrollungen bei der Probeplatte SDA 8B.

Bei der Gegenüberstellung des Gesamtpegels und des Luftströmungswiderstandes ist erkennbar, dass beide Parameter wie erwartet mit zunehmender Anzahl Überrollungen ansteigen (siehe Abb.43)

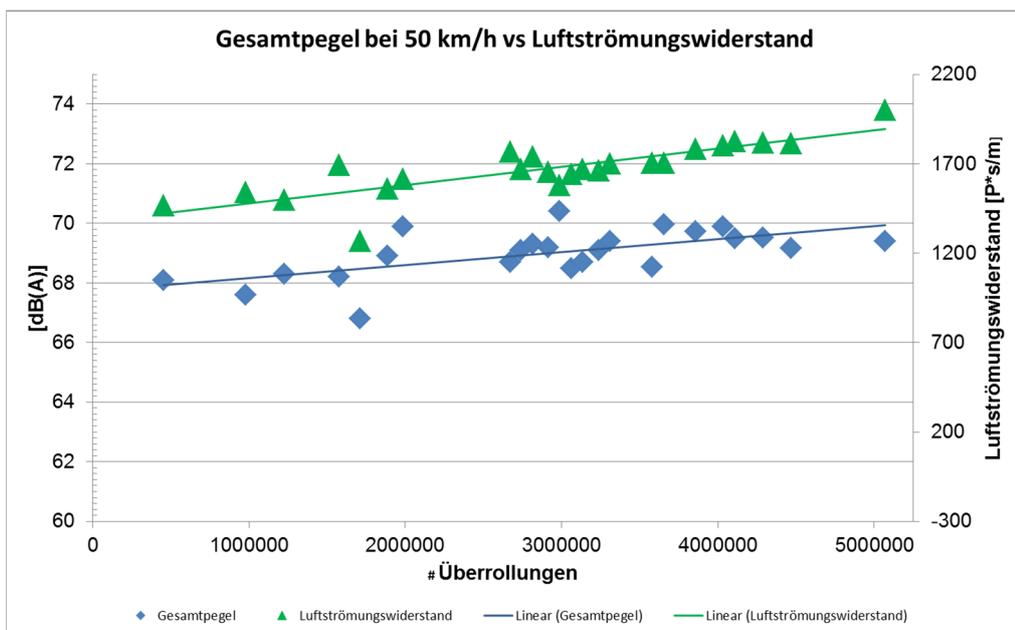


Abb.43 Gegenüberstellung des Gesamtpegels und des Luftströmungswiderstand bei der Prüfplatte aus Mischgut SDA 8B.

5.4 Zusammenfassung der Validierung

Der Entscheid eine neue Prüfmaschine (IMPACT III) zu bauen erwies sich zwar als richtig, doch beanspruchte dies viel Zeit. Dadurch blieb für die Validierung, welche ursprünglich anhand mehrerer Mischgutsorten hätte erfolgen sollen, weniger Zeit. In Absprache mit der Teilprojektleitung TP1 (TPL1), wurde die Validierung auf der Basis von zwei Mischgutsorten durchgeführt. Die Validierung wurde soweit möglich, mit Datenmaterial aus der Parameterstudie bzw anderen Projekten ergänzt.

5.4.1 Herstellung der Platten

Erwartungsgemäss stellte die Herstellung und Verdichtung der Platten kein Problem dar. Wie in Tabelle 12 zu sehen ist erfüllen die Verdichtungsgrade aller 7 Mischgutsorten, mit welchen Platten verdichtet wurden, die Anforderungen der SN 640 430 [31]

Auf zwei Baustellen konnte genügend Mischgut entnommen werden, um im Labor Platten herzustellen. So ergab sich die Gelegenheit die Oberflächeneigenschaften zweier Mischgutsorten zu vergleichen, welche sowohl in-situ, als auch im Labor verdichtet wurden. Die Ergebnisse (siehe Tabelle 13) zeigen bezüglich der Textur ($R_{\text{eff max}}$ und λ_{max}) eine sehr gute Übereinstimmung; bei der Mischgutsorte SDA 8 B stimmen beide Werte sogar überein. Auch der Gestaltfaktor zeigt eine gute Übereinstimmung. Es darf gefolgert werden, dass die Verdichtung im Labor (für die beiden untersuchten Mischgutsorten SDA 8B und SDA 4D) analoge Oberflächentexturen ergab wie die Verdichtung in-situ.

5.4.2 Akustische Dauerhaftigkeit

Entwicklung des Luftströmungswiderstandes:

An den im Labor verdichteten Platten konnten zwei Feststellungen gemacht werden: Einerseits liegt der Luftströmungswiderstand beim feineren Mischgut höher als beim gröberen, andererseits nahm der Luftströmungswiderstand bei beiden Mischgutsorten in Funktion der Anzahl Überrollungen zu. Beide Trends stehen in Einklang mit Beobachtungen in der Praxis. Eine in [27] durchgeführte Analyse der im SPERoN berechneten Terzspektren des Vorbeifahrpegels an IMPACT-Platten zeigte auf, dass dem Luftströmungswiderstand bei höheren Geschwindigkeiten (60 km/h) infolge der aerodynamischen Effekte eine grössere Bedeutung zukommt als bei 40 km/h.

Entwicklung der Texturwerte:

Die mittlere Profiltiefe fällt im Labor bei beiden Mischgutsorten rasch ab, um anschliessend wieder anzusteigen (siehe Abb.29). Dieser allgemeine Trend wird auch in der Praxis beobachtet, wie dies in Abb.30 anhand von 4 Teststrecken mit ähnlichen Mischgutsorten gezeigt wird.

Rauigkeitsspektrum:

Die effektive Rauigkeitstiefe beider Mischgutsorten verhält sich analog dem oben beschriebenen Trend. Bei der Entwicklung der Wellenlänge, bei welcher das Maximum der Rauigkeitstiefe auftritt (λ_{max}) wird eine Zunahme festgestellt. Somit zeigen beide SDA-Mischgutsorten unter der Labor-Beanspruchung im IMPACT eine Entwicklung, welche in der Praxis ebenfalls beobachtet wird.

Entwicklung des Schallpegels:

Die Berechnung des Schallpegels in Abhängigkeit der Anzahl Überrollungen zeigt beim SDA 4 eine Veränderung, welche innerhalb der Präzision der SPERoN-Modellierung liegt. Obwohl Texturwerte und Luftströmungswiderstand sich unter der Belastung im Labor in der gewünschten Art und Weise veränderten, kam dies in der Modellierung des Schallpegels nicht zum Ausdruck. Beim SDA 8 B konnte zum Ende des Langzeitversuches eine Schallpegel-Änderung von etwa 2.0 dB(A) festgestellt werden. Diese Veränderung ist statistisch relevant.

Zeitraffereffekt:

Die im Prüfstand erzeugten Veränderungen der Textur der Oberfläche nach ca. 4 Mio Überrollungen entsprechen etwa den in der Praxis feststellbaren Veränderungen nach 2 Jahren. Berücksichtigt man die Tatsache, dass sich die Eigenschaften bereits vor dem Ende des Langzeitversuches kaum veränderten, so kann der Zeitraffeffaktor zu ca. 4 geschätzt werden. Dieser Wert ist völlig unbefriedigend.

6 Folgerung und Ausblick

6.1 Folgerungen

Die zur Abwicklung der Forschungsarbeit erforderliche Neu-Entwicklung des ursprünglich vorhandenen Prüfstandes brachte erhebliche zeitliche Verzögerungen mit sich. Erfreulich ist, dass mit dem IMPACT III nun ein Gerät zur Verfügung steht, mit welchem die wesentlichen Parameter nachvollziehbar und präzise variiert werden können. Das Gerät hat in mehreren Mio. Überrollungen seine Zuverlässigkeit und Funktionstauglichkeit unter Beweis gestellt.

Die bedeutende Frage der Herstellung eines Prüfreifens mit definiertem Profil und gleichbleibender Gummimischung konnte gelöst werden. Es wurde mit einem Reifenhersteller eine schriftliche Vereinbarung getroffen, damit die zur Herstellung der Prüfreifen in der gewünschten Grösse und mit dem zweckmässigen Profil erforderlichen Giess-Formen langfristig zur Verfügung stehen.

Sowohl die einzelnen Parameter Luftströmungswiderstand und Texturspektrum wie auch die mittels SPERoN berechneten Schallpegel zeigen einen analogen Trend, wie dies in der Praxis in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer beobachtet werden kann. Die Übereinstimmung der Labor-Prognose mit den Praxiswerten ist allerdings nicht für alle drei Parameter gleich. Beim Luftströmungswiderstand ist unter realen Bedingungen ein stärkerer Anstieg zu beobachten. Möglicherweise ist dies ein Hinweis darauf, dass IMPACT den Schmutzeintrag nicht genügend abzubilden vermag. IMPACT wurde explizit für semidichte Mischgutsorten entwickelt, bei denen der Schmutzeintrag eine geringere Bedeutung einnimmt als bei offenporigen Mischgutsorten. Es ist im heutigen Zeitpunkt unklar, welche Rolle ein allfälliger Schmutzeintrag bei semidichten Asphalten spielt.

Die Entwicklung des Rollgeräusches ist bei der Probeplatte mit dem gröberen Mischgut (SDA 8) deutlich erkennbar, bei der Probeplatte mit dem feinkörnigeren Mischgut (SDA 4) liegt die Zunahme des Schallpegels innerhalb der Messgenauigkeit.

Es ist grundsätzlich die gleiche Entwicklung der Textur- Eigenschaften wie in der Praxis zu beobachten, obwohl man ursprünglich einen deutlicheren Abfall innerhalb weniger Überrollungen angestrebt hatte.

Die durchgeführten Untersuchungen haben den Nachweis erbracht, dass der IMPACT unter Laborbedingungen grundsätzlich analoge Veränderungen der akustisch relevanten Oberflächeneigenschaften erzeugt, wie sie in der Praxis unter rollendem Verkehr beobachtet werden können.

6.2 Ausblick

Obwohl im Prüfgerät IMPACT III analoge, akustische Veränderungen wie dies in der Praxis zu beobachten sind erzeugt werden konnten, ist das Ergebnis noch nicht befriedigend. Mit den gewählten Prüfparametern liegt die Anzahl erforderlicher Überrollungen deutlich zu hoch; auch dürften die Veränderungen der Eigenschaften deutlicher ausfallen.

Es sind weitere Optimierungen der Prüfbedingungen mit dem Ziel durchzuführen, die textuellen Veränderungen der Oberfläche zu beschleunigen. Dabei sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- **Reifen:**
Die Untersuchungen wurden mit einem marktüblichen Reifen durchgeführt, da sich die Beschaffung des Reifens mit einer sehr harten Gummimischung und der Beimischung von Silicastaub um mehrere Quartale verzögert hatte.
Der als Prüfreifen gezielt hergestellte Reifen konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht verwendet werden. Es ist zu erwarten, dass die nun vorhandenen, speziellen Prüfreifen eine grössere Abrasion erzeugen und somit zu einer Beschleunigung des Prozesses führen.
- **Temperatur:**
Ist die bisherige Wahl einer konstanten Temperatur richtig, oder sollten Temperatur-Zyklen gefahren werden, um die Abrasion des Bindemittelfilms zu beschleunigen? Das Befahren bei tiefen Temperaturen könnte zu einem schnelleren Abtrag des oberflächlichen Bitumenfilms führen, insbesondere wenn das Bindemittel vorgängig gealtert würde (siehe UV-Bestrahlung). Die Temperatur wird im Prüfstand zwar über Oberflächenmessungen gesteuert, aber es ist davon auszugehen, dass nach mehreren 100'000 Überrollungen kein Temperaturgradient mehr in der Probe besteht und die Kerntemperatur derjenigen der Oberfläche entspricht. Möglicherweise könnte die Oberflächentemperatur schadlos höher gewählt werden, wenn sich der Prüfkörper im Innern wieder abkühlen könnte.
Luftströmungswiderstand und MPD verändern sich innerhalb der ersten 30'000 Überrollungen rasch, danach stagniert die Entwicklung. Möglicherweise ist dies ein Indiz zur Wahl der Dauer der neu festzulegenden Temperaturzyklen.
- **UV-Bestrahlung:**
Möglicherweise würde die Bestrahlung der Prüfkörper-Oberfläche mit ultraviolettem Licht den Prozess (Abfahren des Bindemittelfilms) beschleunigen, indem die Bestrahlung das Bindemittel altern würde. Schlupf je höher der Schlupf liegt, desto grösser sind die auf die Probe wirkenden Schubkräfte, desto grösser die zu erwartenden Veränderungen der Textur. Der Schlupf wurde für eine konstante Oberflächen-Temperatur von 35 °C festgelegt. Es ist davon auszugehen, dass der Schlupf höher gewählt werden könnte, wenn es gelingen würde die Kerntemperatur der Probe tief zu halten.
- **Externer Schmutzeintrag:**
Möglicherweise würde externer Schmutzeintrag durch aufbringen von Schmutz direkt auf die Oberfläche ein zuschmieren der für die Akustik relevanten zugänglichen Hohlräumen beschleunigen, so dass ein rascherer Anstieg des hohlrauminduzierten Luftströmung

Anhänge

I	Messdaten	72
I.1	Texturdaten	72
I.1.1	Texturdaten der SDA 4 C Prüfplatte	72
I.1.2	Texturdaten der SDA 8 B Prüfplatte	73

I Messdaten

I.1 Texturdaten

I.1.1 Texturdaten der SDA 4 C Prüfplatte

Tab. 1 Übersicht der gemessenen Texturdaten der SDA 4 C Prüfplatte

SDA 4 C						
Zyklen	Überrollungen	Luftströmungswiderstand [Pa*s/m]	MPD [mm]	g- Faktor [%]	eff. Rauigkeitstiefe [µm]	λmax
1'000	2000	3'157	0.60	81	107	8
38181	76362	5'356	0.42	83	71	8
87423	174846	5'742	0.42	78	65	10
137799	275598	5'933				
174823	349646	6'161				
226405	452810	6'271	0.50	71	72	10
264787	529574	6'261				
314685	629370	6'607				
351526	703052	6'445				
410990	821980	6'367				
438771	877542	6'583				
489300	978600	6'641	0.53	66	70	5
539911	1079822	6'547				
576727	1153454	6'756				
613657	1227314	6'985	0.53	69	74	8
663975	1327950	7'028				
713859	1427718	7'118				
788589	1577178	7'138	0.48	71	69	8
855237	1710474	5'456	0.43	71	68	12.5
905658	1811316	7'526				
942171	1884342	6'755	0.46	74	69	10
991703	1983406	7'177	0.47	76	73	8
1028355	2056710	7'036	0.42	75	68	8
1076955	2153910	7'486	0.41	77	69	8
1114175	2228350	7'188	0.41	78	69	8
1163409	2326818	7'166	0.40	73	67	10
1200060	2400120	7'379	0.43	76	71	8
1249714	2499428	7'140	0.42	77	72	8
1285000	2570000	7'223	0.41	73	68	10
1335646	2671292	7'324	0.41	73	69	10
1370232	2740464	7'240	0.42	71	70	8
1407319	2814638	7'384	0.41	70	70	10
1457971	2915942	6'876	0.42	74	72	10
1494051	2988102	6'717	0.42	73	71	10
1531443	3062886	7'150	0.42	76	72	10
1567620	3135240	7'231	0.44	75	76	10
1618293	3236586	7'082	0.43	76	71	10
1654574	3309148	7'285	0.44	75	71	8
1707684	3415368	7'155	0.42	73	68	10
1743968	3487936	7'625	0.42	74	69	8
1778912	3557824	7'298	0.43	75	72	8
1828579	3657158	7'438	0.42	71	69	10
1929162	3858324	6'986	0.45	75	75	8
1965357	3930714	6'641	0.44	74	71	8
2016733	4033466	7'156	0.43	76	74	10
2054154	4108308	7'524	0.42	73	70	10
2144246	4288492	6'662	0.43	72	71	10
2234565	4469130	6'970	0.46	72	75	8
2534517	5069034	7'615	0.40	70	62	8

I.1.2 Texturdaten der SDA 8 B Prüfplatte

Tab. 2 Übersicht der gemessenen Texturdaten der SDA 8 B Prüfplatte

SDA 8 B						
Zyklen	Überroll	Luftströmungswiderstand [Pa*s/m]	MPD [mm]	g- Faktor [%]	eff. Rauigkeitstiefe [µm]	λmax
1000	2000	747	0.90	80	214	10
38181	76362	1'212	0.72	85	172	12.5
87423	174846	1'408	0.75	84	174	10
137799	275598	1'383				
174823	349646	1'359				
226405	452810	1'465	0.75	83	147	10
264787	529574	1'418				
314685	629370	1'518				
351526	703052	1'508				
410990	821980	1'537				
438771	877542	1'486				
489300	978600	1'538	0.72	82	141	10
539911	1079822	1'599				
576727	1153454	1'575				
613657	1227314	1'497	0.77	80	144	12.5
663975	1327950	1'637				
713859	1427718	1'596				
788589	1577178	1'693	0.71	80	141	10
855237	1710474	1'266	0.67	81	137	10
905658	1811316	1'684				
942171	1884342	1'558	0.78	82	189	12.5
991703	1983406	1'613	0.77	82	196	12.5
1028355	2056710	1'636	0.76	83	202	12.5
1076955	2153910	1'625	0.76	83	202	12.5
1114175	2228350	1'675	0.73	84	192	12.5
1163409	2326818	1'639	0.71	84	189	12.5
1200060	2400120	1'642	0.75	83	197	12.5
1249714	2499428	1'605	0.74	83	187	12.5
1285000	2570000	1'625	0.72	84	186	12.5
1335646	2671292	1'768	0.73	83	194	12.5
1370232	2740464	1'668	0.71	82	174	12.5
1407319	2814638	1'740	0.71	83	185	12.5
1457971	2915942	1'652	0.73	84	185	12.5
1494051	2988102	1'580	0.72	83	186	12.5
1531443	3062886	1'643	0.73	84	187	12.5
1567620	3135240	1'667	0.72	82	180	12.5
1618293	3236586	1'661	0.73	83	187	12.5
1654574	3309148	1'700	0.74	83	195	12.5
1707684	3415368	1'705	0.73	83	179	12.5
1743968	3487936	1'699	0.72	83	183	12.5
1778912	3557824	1'702	0.73	83	183	12.5
1828579	3657158	1'703	0.70	82	182	12.5
1929162	3858324	1'814	0.73	82	182	12.5
1965357	3930714	1'783	0.75	81	185	12.5
2016733	4033466	1'803	0.75	82	191	12.5
2054154	4108308	1'823	0.73	82	183	12.5
2144246	4288492	1817	0.71	80	171	12.5
2'234'565	4469130	1'811	0.75	80	187	12.5
2'534'517	5069034	2'001	0.70	79	160	12.5

+

Glossar

Begriff	Bedeutung
AC	Asphalt Concrete = Asphaltbeton
SMA	Splittmastixasphalt
AC MR	Rauasphalt
PA	Offenporiger Asphalt
SDA	Semidichter Asphalt
PW	Personenwagen
LW	Lastwagen
IMPACT	I nvestigation M achine for P avement A CousTic Durability
SPERoN	Statistical Physical Explanation of Rolling Noise
FT-IR	Fourier-Transform-Infrarotspektrometer. Analysengerät für Chemische Untersuchungen
SCRIM	Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine
SKM	Seitenkraftmessverfahren
CPX	Close Proximity (Methode für kontinuierliche Messung der Fahrbahn-Strassen-Lärm)
ASTM	American Society for Testing and Materials
MPD	Mean Profile Depth
DTV	Durchschnittlicher Tagesverkehr

Literaturverzeichnis

-
- [1] Bundesgesetz über den Umweltschutz vom 7. Oktober 1983 (USG, SR 814.01)
-
- [2] Lärmschutzverordnung vom 15. Dezember 1986 (LSV, SR 814.41)
-
- [3] Pestalozzi, H., Grollmund, H.-J., Angst, Ch Lärmarme Strassenbeläge innerorts Statusbericht 2003. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und Bundesamt für Strassen (ASTRA),2004
-
- [4] Angst, Ch., Beltzung, F., Bosshard, D., Bühlmann, E., Grollmund H.-J., Ziegler, T.,Lärmarme Strassenbeläge innerorts Jahresberichte 2004- 2010; Bundesamt für Umwelt, (BUFU) und Bundesamt für Strassen (ASTRA),2004-2010
-
- [5] Angst, C., Beltzung, F., Bosshard, D., Grollmund, H.-J., Pestalozzi, H Lärmarme Strassen innerorts Schlussbericht, Bundesamt für Umwelt, (BUFU) und Bundesamt für Strassen (ASTRA). 2007; ..
-
- [6] Bendtsen H., Lu, Q., Kohler, E, Acoustic aging of asphalt pavements - A Californian / Danish comparison danish Road Directorate, DRI report 171 ,2009
<http://www.vejdirektoratet.dk/imageblob/image.asp?objno=273199>.
-
- [7] 6th Framework Programme Research and Development Projekt "ITARI – Integrated Tyre and Road Interaction". Further development and application of a hybrid computational model for the prediction of tyre-road noise. Further development of measurement techniques for the evaluation of acoustical road surface properties. Development of novel road pavements with improved acoustical behaviour.
-
- [8] German French Co-operation"P2RN" – sub-project "Validation and application of models for the prediction of rolling noise. Validation and benchmarking of the tyre noise simulation tool "SPERoN" ("Statistical physical explanation of rolling noise" in comparsion with the French prediction model HyRoNe
-
- [9] Verbundprojekt „Leiser Strassenverkehr 2“ Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche, Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen, Heft 74, 2012.
-
- [10] Bühlmann, E., Bürgisser, Ph., Angst, C., Beckenbauer, Th., Ziegler, T Forschungspaket Lärmarme Beläge innerorts, Teilprojekt (TP) 3: Langzeitmonitoring 2011 - 2015., Bundesamt für Umwelt (BAFU) Berichte 2012 – 2014 <http://www.bafu.admin.ch/laerm/10526/10947/10956/index.html?lang=de>
-
- [11] SN 670 422 Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 22: Spurbildungstest
-
- [12] Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau, Teil: Seitenkraftmessverfahren (SKM), TP-Griff-Stb (SKM), Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln, 2007
-
- [13] SN 670 433, Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 33: Probestückvorbereitung mit einem Walzsegmentverdichtungsgerät
-
- [14] www.ck-inter.net/RR/
-
- [15] PrCEN/TS-15901-1 Verfahren zur Bestimmung der Griffigkeit von Fahrbahndecken durch Verwendung eines Geräts mit festgelegtem Schlupf in Längsrichtung (LFCS): das RoadSTAR-Gerät(CEN/TS 15901-1:2009)
-
- [16] PrCEN/TS-15901-7 Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen - Teil 7: Verfahren zur Bestimmung der Griffigkeit von Fahrbahndecken durch Verwendung eines Geräts mit festem Schlupfverhältnis in Längsrichtung (LFCG): der Grip Tester®; Deutsche Fassung CEN/TS 15901-7:2009
-
- [17] PrCEN/TS-15901-6 Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen. Verfahren zur Bestimmung der Griffigkeit von Fahrbahndecken durch Messung des Seitenreibungsbeiwerts (SFCS): das SCRIMGriffigkeitsmessgerät
-
- [18] PrCEN/TS-15901-8 Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen - Teil 8: Verfahren zur Bestimmung der Griffigkeit von Fahrbahndecken durch Messung des Seitenreibungsbeiwertes (SFCD): das SKM-Griffigkeitsmessgerät (CEN/TS 15901-8:2009)
-
- [19] PrCEN/TS-15901-12 Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen - Teil 12: Verfahren zur Bestimmung der Griffigkeit von Fahrbahndecken durch Verwendung eines Geräts mit geregelter Schlupf in Längsrichtung: das BV-11-Gerät und das Saab-Reibungsmessgerät (Saab-Friction-Tester); Deutsche Fassung CEN/TS 15901-12:2011
-
- [20] PrCEN/TS-15901-15 Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen - Teil 15: Verfahren zur Bestimmung der Griffigkeit von Fahrbahndecken durch Verwendung eines Geräts mit geregelter Schlupf in Längsrichtung (LFCE): Das IMAG-Gerät; Deutsche Fassung CEN/TS 15901-15:2014
-
- [21] PrCEN/TS-15901-3 Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen - Teil 15: Verfahren zur Bestimmung der Griffigkeit von Fahrbahndecken durch Verwendung eines Geräts mit geregelter Schlupf in Längsrichtung (LFCE): Das IMAG-Gerät; Deutsche Fassung CEN/TS 15901-15:2014
-
- [22] Beckenbauer, T.; Spiegler, P.; Bolkland, G.; Kuipers, A., Reinink, F.; Huschek, S.; Stütze, T., Heerkens, J Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 847;
-

-
- [23] Beckenbauer, T.; Spiegler, P.; Blokland, G.; Kuijpers, A.; Reinink, F.; Huschek, S. et al Geometric descriptors of road surface texture in relation to tire-road noise. In: Transportation Research Record, Vol. 1806 (Assessing and Evaluating Pavements 2002). Transportation Research Board (TRB), Washington D.C, Anfosso-Ledee, F.; Do, M.H. (2002):
-
- [24] ASTM1136-14; Standard Specification for P195/75R14 Radial Standard Reference Test Tire; The American Society for Testing and Materials (Hrsg.):Annual book of ASTM standards 2014
-
- [25] Gesamtprojektleitung Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts, 2011, <http://www.aramis.admin.ch/Default.aspx?page=Texte&ProjectID=28097>, 14.9.2011.
-
- [26] Kuijpers A., Peeters B., Kropp W., Beckenbauer T. (2007), "Acoustic Optimization Tool. RE4 – Modelling refinements in the SPERoN framework", Rep. M+P, <http://www.innovatieprogrammageduid.nl>
-
- [27] Beckenbauer, Th., Belcher, D., Kneib, G., Angst, Ch.:Forschungsprojekt EP4: Labormethode für die Bestimmung akustischer Eigenschaften lärmarmen Beläge, Forschungsauftrag ASTRA 2010/013, in Press
-
- [28] Bühlmann, E., Bürgisser, Ph., Angst, C., Beckenbauer, Th., Ziegler, T Forschungspaket Lärmarme Beläge innerorts, Teilprojekt (TP) 3: Langzeitmonitoring 2011 - 2015,, Bundesamt für Umwelt (BAFU) Berichte 2014, <http://www.bafu.admin.ch/laerm/10526/10947/10956/index.html?lang=de>
-
- [29] SN 670 435, Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 35: Labormischung
-
- [30] Sandberg, U., Ejsmont 2002: Tyre/Road Noise Reference Book, Ed. Informex, Sweden.
-
- [31] SN 670 430, Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 30: Probenvorbereitung, Marshall-Verdichtungsgerät.
-
- [32] SNR 670 436, Semidichtes Mischgut und Deckschichten; Festlegungen, Anforderungen, Konzeption und Ausführung.
-
- [33] www.fahrzeug-elektrik.de/Erhc.htm
-
- [34] Bundesamt für Strassen ASTRA, Bundesamt für Umwelt BAFU (2008), « Lärmarme Strassenbeläge innerorts: Schlussbericht 2007 », <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00704/index.html?lang=de>
-
- [35] Bundesamt für Strassen ASTRA, Bundesamt für Umwelt BAFU (2011), « Lärmarme Strassenbeläge innerorts: Jahresbericht 2010», <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01612/index.html?lang=de>
-

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 23.10.2015

Grunddaten

Projekt-Nr.: ASTRA 2010/011

Projekttitel: EP2: Labortechnische Bestimmung der Dauerhaftigkeit lärmarmen Beläge

Enddatum: 14.07.2015

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Die zur Abwicklung der Forschungsarbeit erforderliche Neu-Entwicklung des ursprünglich vorhandenen Prüfstandes brachte erhebliche zeitliche Verzögerungen mit sich. Erfreulich ist, dass mit dem IMPACT III nun ein Gerät zur Verfügung steht, mit welchem die wesentlichen Parameter nachvollziehbar und präzise variiert werden können. Das Gerät hat in mehreren Mio. Überrollungen seine Zuverlässigkeit und Funktionstauglichkeit unter Beweis gestellt.

Die bedeutende Frage der Herstellung eines Prüfreifens mit definiertem Profil und gleichbleibender Gummimischung konnte gelöst werden.

Sowohl die einzelnen Parameter Luftströmungswiderstand und Texturspektrum wie auch die mittels SPERoN berechneten Schallpegel verändern sich in Abhängigkeit der Anzahl Überrollungen in ähnlicher Art und Weise, wie dies in der Praxis beobachtet wurde. Die Entwicklung des Rollgeräusches ist bei der Probeplatte mit dem gröberen Mischgut (SDA 8) deutlich erkennbar, bei der Probeplatte mit dem feinkörnigeren Mischgut (SDA 4) liegt die Zunahme des Schallpegels innerhalb der Messgenauigkeit.

Es ist grundsätzlich die gleiche Entwicklung der akustischen Eigenschaften wie in der Praxis zu beobachten, obwohl man ursprünglich einen deutlicheren Abfall innerhalb weniger Überrollungen angestrebt hatte.

Die durchgeführten Untersuchungen haben den Nachweis erbracht, dass das Prüfgerät IMPACT (Investigation Machine for Pavement ACousTic Durability) unter Laborbedingungen grundsätzlich analoge Veränderungen der akustisch relevanten Oberflächeneigenschaften erzeugt, wie sie in der Praxis unter rollendem Verkehr beobachtet werden können.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Das Projekt verfolgte die Ziele:

1. Festlegung der Prüfparameter für die labortechnische Beanspruchung von im Labor verdichteten Platten mit dem Ziel, eine möglichst praxisnahe Beanspruchung zu erzeugen. Die Beanspruchung soll zu einer Zunahme des Schallpegels führen. Dieses Ziel wurde erreicht. Allerdings ist die erforderliche Anzahl Überrollungen deutlich höher als ursprünglich angestrebt wurde.
2. Verwendung üblicher oder neuer Laborprüfverfahren; die Methode soll mit Mischgut- Mengen durchführbar sein, welche im Labor hergestellt werden können. Dieses Ziel wurde vollumfänglich erreicht.
3. Validierung anhand des Monitoring von Pilotstrecken: Dieses Ziel wurde nicht mehr erreicht.

Folgerungen und Empfehlungen:

Mit dem IMPACT III steht ein neues Gerät zur Verfügung, mit welchem die wesentlichen Parameter einer Verkehrssimulation im Labor präzise variiert werden können; es hat in mehreren Mio. Überrollungen seine Zuverlässigkeit unter Beweis gestellt. Somit steht erstmals eine Prüfmethode zur Verfügung, mit welcher die für die akustische Dauerhaftigkeit lärmarmen Beläge relevanten Oberflächeneigenschaften unter Laborbedingungen verändert werden können. Dieses vielversprechende Ergebnis bildet die Basis für weitere Arbeiten zur Entwicklung einer Prüfmethode zur Prognose der akustischen Dauerhaftigkeit von semidichten Deckschichten.

Die erforderliche Anzahl Überrollungen ist zur Zeit noch zu gross. Durch weitere Optimierungen der Prüfparameter und der Verwendung spezieller Prüfreifen ist der Zeitraffer-Effekt zu steigern. Der Bericht umfasst konkrete Vorschläge zur Reduktion der Anzahl erforderlicher Überrollungen und somit zur Beschleunigung des Prozesses.

Das Verfahren ist durch den Vergleich von Laboruntersuchungen mit Daten aus dem Monitoring von Teststrecken zu validieren.

Publikationen:

Dr. Ch. Angst, Dr. P. Bürgisser (IMP), Dr. Th. Beckenbauer (Müller-BBM GmbH), INVESTIGATION MACHINE FOR PAVEMENT ACOUSTIC DURABILITY; IMPACT TESTING THE DURABILITY OF LOW NOISE ROAD SURFACE / A5EE-293 5th Eurasphalt & Euro-bitume Congress, 2012

Dr. Th. Beckenbauer (Müller-BBM GmbH), Dr. Ch. Angst, Dr. P. Bürgisser (IMP) SIMULATION OF TYRE/ROAD NOISE AS A TOOL FOR THE EVALUATION OF THE ACOUSTIC BEHAVIOUR OF ROAD SURFACES/ O5EE-338 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 2012

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Angst

Vorname: Christian

Amt, Firma, Institut: IMP Bautech AG

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Im Rahmen des Forschungsprojektes sollten die Prüfparameter der IMPACT II Maschine des Baustofflabors von IMPBautest definiert werden, welche die akustischen Eigenschaften bituminöser Prüfkörper verändern, bzw. verschlechtern. Mit der IMPACT II Maschine gelang es nicht die Prüfkörper genügend zu beschädigen, dass eine Veränderung der akustischen Eigenschaften hätte gemessen werden können. Es musste deshalb eine neue Maschine (IMPACT III) entwickelt werden. Mit dieser gelang es, einzelne Eigenschaften der Prüfkörper (Oberflächentextur, Strömungswiderstand) zu verändern, bzw. eine Verschlechterung herbeizuführen.

Die Entwicklung der an den Prüfkörpern beobachteten Veränderungen der Eigenschaften stimmen im Wesentlichen mit den Beobachtungen in situ überein. Mit Hilfe von Messungen einzelner Eigenschaften des Mischguttyps SDA8 und der Modellrechnung in SPERoN konnte eine Verschlechterung um 2dB(A) prognostiziert werden. Beim Mischguttyp SDA4 konnten jedoch keine Veränderungen gemessen und entsprechend prognostiziert werden.

Das Verhältnis der Dauer für 5 Millionen Überrollungen im Labor verglichen mit den gleichen Ergebnissen für reale Verhältnisse ist 1:4, was ungenügend ist (Zeitraffereffekt ungenügend). Zudem konnten die Tests nicht mit den gewünschten Reifen mit einer Gummimischung aus Silikat durchgeführt werden.

Es war schlussendlich nicht möglich eine Beziehung zwischen der Veränderung der akustischen Eigenschaften im Labor (aufgrund Modellrechnung mit SPERoN) und der Realität (Messungen in situ) herzustellen.

Umsetzung:

Die Anzahl Überrollungen eines Prüfkörpers in der IMPACT-Maschine ist mit 5 Millionen viel zu hoch, um in der Praxis effektiv angewendet werden zu können. Die daraus ermittelte akustische Verschlechterung von lediglich 2dB(A) für einen einzigen Mischguttyp ist noch zu wenig, um das Verfahren zusammen mit den SPERoN-Modellrechnungen gewissenhaft einsetzen zu können. Die Parameter der IMPACT-Maschine, welche im Rahmen des Forschungsprojektes definiert wurden, müssen weiter überprüft, angepasst oder gar erweitert werden.

weitergehender Forschungsbedarf:

Die Prüfparameter für die IMPACT-Maschine müssen weiter untersucht und angepasst werden, so dass die für die akustischen Eigenschaften relevanten Belageigenschaften schneller beansprucht werden und einerseits weniger Überrollungen notwendig sind (Beschleunigung des Verfahrens) und andererseits die realen Verhältnisse besser simuliert werden können (z.B. Belastung des Prüfkörpers durch Temperaturwechsel).

Zudem sollten weitere Tests mit Reifen mit einer Gummimischung aus Silika durchgeführt werden.

Einfluss auf Normenwerk:

Keine

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Seiler

Vorname: Luzia

Amt, Firma, Institut: Bundesamt für Strassen

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

21.12.2015

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1557	SVI 2010/001	Reklame im Strassenverkehr	2016
1555	SVI 2004/049	Sichere Schulwege – Gefahrenanalyse und Massnahmenplanung	2016
1554	VSS 2011/501	Evaluation des Frosttaumittelwiderstands von Beton – Vergleich von vier Prüfverfahren	2016
1551	VSS 2012/207	Akustische Installationen im Strassentunnel	2016
1550	VSS 2012/311	SERFOR: Voranalyse "Self Explaining and Forgiving Roads"	2016
1549	SVI 2011/015	Anforderungen an zukünftige Mobilitätshebungen	2016
1548	VSS 2010/404	Grundlagen für die Anforderungen an Schutzgeokunststoffe auf der Basis von neuen EN-Prüfmethoden	2016
1547	ASTRA 2011/012_OBF	Development of a self-healing asphalt road via induction heating	2015
1545	ASTRA 2011/013_OBF	Vergleich verschieden starker Asphalt-Belagsaufbauten: Ermittlung der Versagensgrenze eines T3-Normbelages mit der mobilen Grossversuchsanlage MLS10	2015
1544	VSS 2007/302	Rampenbewirtschaftung: Anforderungen an Regelungsverfahren	2015
1543	VSS 2012/402	Machbarkeitsstudie zur Reduktion von Feinstaub oder seiner Vorläufergase mittels spezieller Strassenbeläge	2015
1542	VSS 2011/713	Forschungspaket Nutzensteigerung für die Anwender des SIS: EP3: Transformationskonzepte zwischen Bezugssystemen	2015
1541	VSS 2010/301	Verkehrssicherheit zweistreifiger Kreisell	2015
1540	AGE 2013/001_ENG	TOSA - Transport par bus avec Optimisation du Système d'Alimentation	2015
1539	FGU 2010/007	Modelling of anhydritic swelling claystones	2015
1538	SVI 2011/021	Forschungspaket Verkehr der Zukunft (2060): Initialprojekt	2015
1537	FGU 2010/007	Geotechnischer Indexwert für die Beurteilung des Potentials zur Quarzstaubbelastung	2015
1536	VSS 2012/201	Wirkungskontrolle von Strassenprojekten	2015
1535	VSS 2012/403	Einfluss der Gesteinskörnung auf den Chloridwiderstand von Beton	2015
1534	VSS 2009/102	Forschungsbündel Erhebung verkehrsplanerischer Grundlagedaten: Teilprojekt 2: Methoden der Verkehrsbeobachtung	2015
1533	VSS 2009/101	Forschungsbündel Erhebung verkehrsplanerischer Grundlagedaten: Synthesebericht	2015
1532	VSS 2009/101	Forschungsbündel Erhebung verkehrsplanerischer Grundlagedaten: Teilprojekt 1: Systematik und Glossar	2015
1531	VSS 2011/906	Datenaustausch zwischen Strasseninformationssystemen und Verkehrsmodellen	2015
1530	VSS 2010/402	Einfluss biogener Öle auf die Ökobilanz von Strassenbaubindemittel	2015
1529	VSS 2005/404	Beschleunigte Alterungsmethode von heiss verarbeitbaren Fugenmassen zur Simulation des Einbaus	2015
1528	VSS 2011/308	Verkehrsablauf an ungesteuerten Knoten innerorts unter Berücksichtigung der verschiedenen Verkehrsarten; Ermittlung repräsentativer Richtwerte und Zusammenhänge	2015
1527	VSS 2006/510	Forschungspaket Brückenabdichtungen: Synthesebericht	2015
1526	VSS 2005/456	Paquet de recherche de recyclage des matériaux bitumineux de démolition des routes dans des enrobés à chaud : EP5: Formulation des enrobés avec matériaux recyclés	2015
1525	SVI 2004/058	Verträglichkeitskriterien für den Strassenraum innerorts	2015
1524	ASTRA 2012/003	Erarbeitung von Grundlagen zur Bemessung von Steinschlagschutzdämmen	2015
1523	VSS 2011/104	Monetarisierung des statistischen Lebens im Strassenverkehr	2015
1522	VSS 2011/106	Normierte gesamtverkehrliche Erschliessungsqualitäten - Grundlagenbericht	2015
1521	VSS 2006/514_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP4 - Zerstörungsfreie Prüfungen von Verbund und Oberflächen	2015
1520	ASTRA 2008/013_OBF	Nächtliche Immissionsprognosen von Strassenlärm (Hochleistungsstrassen)	2015
1519	VSS 2009/201	Lärmimmissionen bei Knoten und Kreiseln	2015
1518	SVI 2011/024	Langsamverkehrsfreundliche Lichtsignalanlagen	2015

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1517	VSS 2011/103	Bemessungsverkehrsstärken: Ein neuer Ansatz	2015
1516	VSS 2011/711	Forschungspaket Nutzensteigerung für die Anwender des SIS: EP1: Zeitaspekte und Historisierung	2015
1515	SVI 2011/034	Längere Umsteigezeiten und Haltestellenaufenthaltszeiten - Auswirkungen und Massnahmen	2015
1514	VSS 2006/513_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP3 - Langzeitverhalten des Verbundes	2015
1513	VSS 2005/403	Fließkoeffizienten von feinen Gesteinskörnungen aus der Schweiz	2015
1512	SVI 2004/069	Veloverkehr in den Agglomerationen - Einflussfaktoren, Massnahmen und Potenziale	2015
1511	VSS 2012/601	Die Physik zwischen Salz, Schnee und Reifen	2015
1510	VSS 2005/453	Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut: EP2: Mehrfachrecycling von Strassenbelägen	2015
1509	ASTRA 2010/022	Markt- und Nutzermonitoring Elektromobilität (MANUEL)	2015
1508	VSS 2011/716	Forschungspaket Nutzensteigerung für die Anwender des SIS: EP6: Schnittstellen aus den Auswertungssystemen SIS (SIS-DWH)	2015
1507	FGU 2007/004	TBM Tunneling in Faulted and Folded Rocks	2015
1506	VSS 2006/512_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP2 - Flüssigkunststoff-Abdichtungen, Erfassen der Verbundproblematik	2015
1505	VSS 2006/509	Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Betonbrücken - Initialprojekt	2014
1504	VSS 2005/504	Druckschwellversuch zur Beurteilung des Verformungsverhaltens von Belägen	2014
1503	VSS 2006/515_OBF	Research Package on Bridge Deck Waterproofing Systems: EP5-Mechanisms of Blister Formation	2014
1502	VSS 2010/502	Road – landside interaction : Applications	2014
1501	VSS 2011/705	Grundlagen zur Anwendung von Lebenszykluskosten im Erhaltungsmanagement von Strassenverkehrsanlagen	2014
1500	ASTRA 2010/007	SURPRICE (Sustainable mobility through road user charging) - Swiss contribution: Equity effects of congestion charges and intra-individual variation in preferences	2015
1499	ASTRA 2011/010	Stauprognoseverfahren und -systeme	2014
1498	VSS 2011/914	Coordinated Ramp Metering Control with Variable Speed Limits for Swiss Freeways	2014
1497	VSS 2009/705	Verfahren zur Bildung von homogenen Abschnitten der Strassenverkehrsanlage für das Erhaltungsmanagement Fahrbahnen	2014
1496	VSS 2010/601	Einfluss von Lärmschutzwänden auf das Raumnutzungsverhalten von Reptilien	2014
1495	VSS 2009/703	Zusammenhang Textur und Griffigkeit von Fahrbahnen und Einflüsse auf die Lärmemission	2014
1494	VSS 2010/704	Erhaltungsmanagement der Strassen - Erarbeiten der Grundlagen und Schadenkataloge zur systematischen Zustandserhebung und -bewertung von zusätzlichen Objekten der Strassen	2014
1493	VSS 2006/001	Neue Methoden zur Beurteilung der Tieftemperatureigenschaften von bitumenhaltigen Bindemitteln	2014
1492	SVI 2004/029	Kombiniertes Verkehrsmittel- und Routenwahlmodell	2014
1491	VSS 2007/704	Gesamtbewertung von Kunstbauten	2014
1490	FGU 2004/002	Langzeit-Beständigkeit von Tunnel-Abdichtungssystemen aus Kunststoffen (Best TASK)	2014
1489	VSS 2006/516_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP6 - Anschlüsse von Brückenabdichtungen	2014
1488	SVI 2007/020	Methodik zur Nutzenermittlung von Verkehrsdosierungen	2014
1487	SVI 2008/001	Erfahrungsbericht Forschungsbündel	2014
1486	SVI 2004/005	Partizipation in Verkehrsprojekten	2014
1485	VSS 2007/401	Anforderungen an Anschlussfugensysteme in Asphaltdecken - Teil 1: Praxiserfahrung	2014
1484	FGU 2010/003	Misestimating time of collision in the tunnel entrance due to a disturbed adaptation	2014
1483	VSS 2005/452	Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut: EP1: Optimaler Anteil an Ausbauasphalt	2014
1482	ASTRA 2010/018	SURPRICE: Sustainable mobility through road user charges Swiss contribution: Comprehensive road user charging (RUC)	2015
1481	VSS 2001/702	Application des méthodes de représentation aux données routières	2014

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1480	ASTRA 2008/004	Prozess- und wirkungsorientiertes Management im betrieblichen Strassenunterhalt Modell eines siedlungsübergreifenden Unterhalts	2014
1479	ASTRA 2005/004	Entscheidungsgrundlagen & Empfehlungen für ein nachhaltiges Baustoffmanagement	2014
1478	VSS 2005/455	Research Package on Recycling of Reclaimed Asphalt in Hot Mixes - EP4: Evaluation of Durability	2014
1477	VSS 2008/503	Feldversuch mit verschiedenen Pflästerungen und Plattendecken	2014
1476	VSS 2011/202	Projet initial pour la conception multi-usagers des carrefours	2014
1475	VSS 1999/125	Ringversuch "Eindringtiefe eines ebenen Stempels, statische Prüfung an Gussasphalt"	2014
1474	VSS 2009/704	Wechselwirkung zwischen Aufgrabungen, Zustand und Alterungsverhalten im kommunalen Strassennetz-Entwicklung eines nachhaltigen Aufgrabungsmanagement	2014
1473	VSS 2011/401	Forschungspaket "POLIGRIP - Einfluss der Polierbarkeit von Gesteinskörnungen auf die Griffbarkeit von Deckschichten - Initialprojekt"	2014
1472	SVI 2010/003	Einfluss der Verlässlichkeit der Verkehrssysteme auf das Verkehrsverhalten	2014
1471	ASTRA 2008/011	Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr Forschungspaket UVEK/ASTRA - Synthese	2014
1470	VSS 2011/907	Initialprojekt für ein Forschungspaket "Kooperative Systeme für Fahrzeug und Strasse"	2014
1469	VSS 2008/902	Untersuchungen zum Einsatz von Bewegungssensoren für fahrzeitbezogene Verkehrstelematik-Anwendungen	2014
1468	VSS 2010/503	Utilisation des géostructures énergétiques pour la régulation thermique et l'optimisation énergétique des infrastructures routières et ouvrages d'art	2014
1467	ASTRA 2010/021	Sekundärer Feinstaub vom Verkehr	2014
1466	VSS 2010/701	Grundlagen zur Revision der Normen über die visuelle Erhebung des Oberflächenzustands	2014
1465	ASTRA 2000/417	Erfahrungen mit der Sanierung und Erhaltung von Betonoberflächen	2014
1464	VSS 2002/403	Récupération de liants modifiés aux polymères issus d'échantillons d'enrobés	2014
1463	VSS 2006/511_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP1 – Standfester Gesamtaufbau, Prüfung und Bewertung	2014
1462	ASTRA 2011/004	Ermittlung der Versagensgrenze eines T2 Norm-Belages mit der mobiles Grossversuchsanlage MLS10	2014
1461	VSS 2001/506	Einfluss der Verdichtungstemperatur auf die Ergebnisse der Marshall-Prüfung und der Einbaukontrolle	2014
1460	SVI 2007/017	Nutzen der Verkehrsinformation für die Verkehrssicherheit	2014
1459	VSS 2002/501	Leichtes Fallgewichtsgesetz für die Verdichtungskontrolle von Foundationsschichten	2014
1458	VSS 2010/703	Umsetzung Erhaltungsmanagement für Strassen in Gemeinden - Arbeitshilfen als Anhang zur Norm 640 980	2014
1457	SVI 2012/006	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 5: Medizinische Folgen des Strassenunfallgeschehens	2014
1456	SVI 2012/005	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 4: Einflüsse des Wetters auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1455	SVI 2012/004	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 3: Einflüsse von Fahrzeugeigenschaften auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1454	SVI 2012/003	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 2: Einflüsse von Situation und Infrastruktur auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1453	SVI 2012/002	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 1: Einflüsse von Mensch und Gesellschaft auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1452	SVI 2012/001	Forschungspaket VeSPA: Synthesebericht Phase 1	2014
1451	FGU 2010/006	Gasanalytik zur frühzeitigen Branddetektion in Tunneln	2013
1450	VSS 2002/401	Kaltrecycling von Ausbausasphalt mit bituminösen Bindemitteln	2014
1449	ASTRA 2010/024	E-Scooter - Sozial- und naturwissenschaftliche Beiträge zur Förderung leichter Elektrofahrzeuge in der Schweiz	2013
1448	SVI 2009/008	Anforderungen der Güterlogistik an die Netzinfrastruktur und die langfristige Netzentwicklung in der Schweiz. Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt C	2014

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1447	SVI 2009/005	Informationstechnologien in der zukünftigen Gütertransportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt E	2013
1446	VSS 2005/454	Forschungspaket Recycling von Ausbauspalt in Heissmischgut: EP3: Stofffluss- und Nachhaltigkeitsbeurteilung	2013
1445	VSS 2009/301	Öffnung der Busstreifen für weitere Verkehrsteilnehmende	2013
1444	VSS 2007/306	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von Anlagen des leichten Zweirad- und des Fussgängerverkehrs	2013
1443	VSS 2007/305	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit des strassengebundenen ÖV	2013
1442	SVI 2010/004	Messen des Nutzens von Massnahmen mit Auswirkungen auf den Langsamverkehr - Vorstudie	2013
1441_2	SVI 2009/010	Zielsystem im Güterverkehr. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz - Teilprojekt G	2013
1441_1	SVI 2009/010	Effizienzsteigerungspotenziale in der Transportwirtschaft durch integrierte Bewirtschaftungsinstrumente aus Sicht der Infrastrukturbetreiber Synthese der Teilprojekte B3, C, D, E und F des Forschungspakets Güterverkehr anhand eines Zielsystems für den Güterverkehr	2013
1440	SVI 2009/006	Benchmarking-Ansätze im Verkehrswesen	2013
1439	SVI 2009/002	Konzept zur effizienten Erfassung und Analyse der Güterverkehrsdaten Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz von Verkehrsmitteln im Güterverkehr der Schweiz TP A	2013
1438_2	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 2. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1438_1	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 1. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1437	VSS 2008/203	Trottoirüberfahrten und punktuelle Querungen ohne Vortritt für den Langsamverkehr	2013
1436	VSS 2010/401	Auswirkungen verschiedener Recyclinganteile in ungebundenen Gemischen	2013
1435	FGU 2008/007_OBF	Schadstoff- und Rauchkurzschlüsse bei Strassentunneln	2013
1434	VSS 2006/503	Performance Oriented Requirements for Bituminous Mixtures	2013
1433	ASTRA 2010/001	Güterverkehr mit Lieferwagen: Entwicklungen und Massnahmen Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B3	2013
1432	ASTRA 2007/011	Praxis-Kalibrierung der neuen mobilen Grossversuchanlage MLS10 für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen in der Schweiz	2013
1431	ASTRA 2011/015	TeVeNOx - Testing of SCR-Systems on HD-Vehicles	2013
1430	ASTRA 2009/004	Impact des conditions météorologiques extrêmes sur la chaussée	2013
1429	SVI 2009/009	Einschätzungen der Infrastrukturnutzer zur Weiterentwicklung des Regulativs Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP F	2013
1428	SVI 2010/005	Branchenspezifische Logistikkonzepte und Güterverkehrsaufkommen sowie deren Trends Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B2	2013
1427	SVI 2006/002	Begegnungszonen - eine Werkschau mit Empfehlungen für die Realisierung	2013
1426	ASTRA 2010/025_OBF	Luftströmungsmessung in Strassentunneln	2013
1425	VSS 2005/401	Résistance à l'altération des granulats et des roches	2013
1424	ASTRA 2006/007	Optimierung der Baustellenplanung an Autobahnen	2013
1423	ASTRA 2010/012	Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP3: Betrieb und Unterhalt lärmarmer Beläge	2013
1422	ASTRA 2011/006_OBF	Fracture processes and in-situ fracture observations in Gipskeuper	2013

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1421	VSS 2009/901	Experimenteller Nachweis des vorgeschlagenen Raum- und Topologiemodells für die VM-Anwendungen in der Schweiz (MDATrafo)	2013
1420	SVI 2008/003	Projektierungsfreiräume bei Strassen und Plätzen	2013
1419	VSS 2001/452	Stabilität der Polymere beim Heisseinbau von PmB-haltigen Strassenbelägen	2013
1418	VSS 2008/402	Anforderungen an hydraulische Eigenschaften von Geokunststoffen	2012
1417	FGU 2009/002	Heat Exchanger Anchors for Thermo-active Tunnels	2013
1416	FGU 2010/001	Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prüfung nach SIA 262/1, Anhang D	2013
1415	VSS 2010/A01	Wissenslücken im Infrastrukturmanagementprozess "Strasse" im Siedlungsgebiet	2013
1414	VSS 2010/201	Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen der Strassenausstattung	2013
1413	SVI 2009/003	Güterverkehrsintensive Branchen und Güterverkehrsströme in der Schweiz Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz Teilprojekt B1	2013
1412	ASTRA 2010/020	Werkzeug zur aktuellen Gangliniennorm	2013
1411	VSS 2009/902	Verkehrstelematik für die Unterstützung des Verkehrsmanagements in ausserordentlichen Lagen	2013
1410	VSS 2010/202_OBF	Reduktion von Unfallfolgen bei Bränden in Strassentunneln durch Abschnittsbildung	2013
1409	ASTRA 2010/017_OBF	Regelung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2013
1408	VSS 2000/434	Viellissement thermique des enrobés bitumineux en laboratoire	2012
1407	ASTRA 2006/014	Fusion des indicateurs de sécurité routière : FUSAIN	2012
1406	ASTRA 2004/015	Amélioration du modèle de comportement individuel du Conducteur pour évaluer la sécurité d'un flux de trafic par simulation	2012
1405	ASTRA 2010/009	Potential von Photovoltaik an Schallschutzmassnahmen entlang der Nationalstrassen	2012
1404	VSS 2009/707	Validierung der Kosten-Nutzen-Bewertung von Fahrbahn-Erhaltungsmassnahmen	2012
1403	SVI 2007/018	Vernetzung von HLS- und HVS-Steuerungen	2012
1402	VSS 2008/403	Witterungsbeständigkeit und Durchdruckverhalten von Geokunststoffen	2012
1401	SVI 2006/003	Akzeptanz von Verkehrsmanagementmassnahmen-Vorstudie	2012
1400	VSS 2009/601	Begrünte Stützgitterböschungssysteme	2012
1399	VSS 2011/901	Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Incentivierung	2012
1398	ASTRA 2010/019	Environmental Footprint of Heavy Vehicles Phase III: Comparison of Footprint and Heavy Vehicle Fee (LSVA) Criteria	2012
1397	FGU 2008/003_OBF	Brandschutz im Tunnel: Schutzziele und Brandbemessung Phase 1: Stand der Technik	2012
1396	VSS 1999/128	Einfluss des Umhüllungsgrades der Mineralstoffe auf die mechanischen Eigenschaften von Mischgut	2012
1395	FGU 2009/003	KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau	2012
1394	VSS 2010/102	Grundlagen Betriebskonzepte	2012
1393	VSS 2010/702	Aktualisierung SN 640 907, Kostengrundlage im Erhaltungsmanagement	2012
1392	ASTRA 2008/008_009	FEHRL Institutes WIM Initiative (Fiwi)	2012
1391	ASTRA 2011/003	Leitbild ITS-CH Landverkehr 2025/30	2012
1390	FGU 2008/004_OBF	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Belchentunnel	2012
1389	FGU 2003/002	Long Term Behaviour of the Swiss National Road Tunnels	2012
1388	SVI 2007/022	Möglichkeiten und Grenzen von elektronischen Busspuren	2012
1387	VSS 2010/205_OBF	Ablage der Prozessdaten bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1386	VSS 2006/204	Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich	2012
1385	VSS 2004/703	Bases pour la révision des normes sur la mesure et l'évaluation de la planéité des chaussées	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1384	VSS 1999/249	Konzeptuelle Schnittstellen zwischen der Basisdatenbank und EMF-, EMK- und EMT-DB	2012
1383	FGU 2008/005	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel	2012
1382	VSS 2001/504	Optimierung der statischen Eindringtiefe zur Beurteilung von harten Gussasphaltsorten	2012
1381	SVI 2004/055	Nutzen von Reisezeiteinsparungen im Personenverkehr	2012
1380	ASTRA 2007/009	Wirkungsweise und Potential von kombinierter Mobilität	2012
1379	VSS 2010/206_OBF	Harmonisierung der Abläufe und Benutzeroberflächen bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1378	SVI 2004/053	Mehr Sicherheit dank Kernfahrbahnen?	2012
1377	VSS 2009/302	Verkehrssicherheitsbeurteilung bestehender Verkehrsanlagen (Road Safety Inspection)	2012
1376	ASTRA 2011/008_004	Erfahrungen im Schweizer Betonbrückenbau	2012
1375	VSS 2008/304	Dynamische Signalisierungen auf Hauptverkehrsstrassen	2012
1374	FGU 2004/003	Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Schweissnähte von KDB	2012
1373	VSS 2008/204	Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung	2012
1372	SVI 2011/001	Verkehrssicherheitsgewinne aus Erkenntnissen aus Datapooling und strukturierten Datenanalysen	2012
1371	ASTRA 2008/017	Potenzial von Fahrgemeinschaften	2011
1370	VSS 2008/404	Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahnen aus Betongranulat	2011
1369	VSS 2003/204	Rétention et traitement des eaux de chaussée	2012
1368	FGU 2008/002	Soll sich der Mensch dem Tunnel anpassen oder der Tunnel dem Menschen?	2011
1367	VSS 2005/801	Grundlagen betreffend Projektierung, Bau und Nachhaltigkeit von Anschlussgleisen	2011
1366	VSS 2005/702	Überprüfung des Bewertungshintergrundes zur Beurteilung der Strassengriffigkeit	2010
1365	SVI 2004/014	Neue Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten dank Data Mining?	2011
1364	SVI 2009/004	Regulierung des Güterverkehrs Auswirkungen auf die Transportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP D	2012
1363	VSS 2007/905	Verkehrsprognosen mit Online -Daten	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung	2012
1360	VSS 2010/203	Akustische Führung im Strassentunnel	2012
1359	SVI 2004/003	Wissens- und Technologientransfer im Verkehrsbereich	2012
1358	SVI 2004/079	Verkehrsanbindung von Freizeitanlagen	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer?	2012
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen	2011
1355	FGU 2007/002	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhang D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis	2011
1354	VSS 2003/203	Anordnung, Gestaltung und Ausführung von Treppen, Rampen und Treppenwegen	2011
1353	VSS 2000/368	Grundlagen für den Fussverkehr	2011
1352	VSS 2008/302	Fussgängerstreifen (Grundlagen)	2011
1351	ASTRA 2009/001	Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels	2011
1350	VSS 2007/904	IT-Security im Bereich Verkehrstelematik	2011
1349	VSS 2003/205	In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Autobahnen	2011
1348	VSS 2008/801	Sicherheit bei Parallelführung und Zusammentreffen von Strassen mit der Schiene	2011
1347	VSS 2000/455	Leistungsfähigkeit von Parkieranlagen	2010
1346	ASTRA 2007/004	Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Rauchabsaugung	2010
1345	SVI 2004/039	Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmittel in Agglomerationen	2011
1344	VSS 2009/709	Initialprojekt für das Forschungspaket "Nutzensteigerung für die Anwender des SIS"	2011
1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr	2011

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1342	FGU 2005/003	Untersuchungen zur Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren	2010
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground	2011
1340	SVI 2004/051	Aggressionen im Verkehr	2011
1339	SVI 2005/001	Widerstandsfunktionen für Innerorts-Strassenabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten	2010
1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit	2009
1337	ASTRA 2006/015	Development of urban network travel time estimation methodology	2011
1336	ASTRA 2007/006	SPIN-ALP: Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors	2010
1335	VSS 2007/502	Stripping bei lärmindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im Labormassstab	2011
1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen	2011
1333	SVI 2007/001	Standards für die Mobilitätsversorgung im peripheren Raum	2011
1332	VSS 2006/905	Standardisierte Verkehrsdaten für das verkehrsträgerübergreifende Verkehrsmanagement	2011
1331	VSS 2005/501	Rückrechnung im Strassenbau	2011
1330	FGU 2008/006	Energiegewinnung aus städtischen Tunneln: Systemevaluation	2010
1329	SVI 2004/073	Alternativen zu Fussgängerstreifen in Tempo-30-Zonen	2010
1328	VSS 2005/302	Grundlagen zur Quantifizierung der Auswirkungen von Sicherheitsdefiziten	2011
1327	VSS 2006/601	Vorhersage von Frost und Nebel für Strassen	2010
1326	VSS 2006/207	Erfolgskontrolle Fahrzeugrückhaltesysteme	2011
1325	SVI 2000/557	Indices caractéristiques d'une cité-vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes.	2010
1324	VSS 2004/702	Eigenheiten und Konsequenzen für die Erhaltung der Strassenverkehrsanlagen im überbauten Gebiet	2009
1323	VSS 2008/205	Ereignisdetektion im Strassentunnel	2011
1322	SVI 2005/007	Zeitwerte im Personenverkehr: Wahrnehmungs- und Distanzabhängigkeit	2008
1321	VSS 2008/501	Validation de l'oedomètre CRS sur des échantillons intacts	2010
1320	VSS 2007/303	Funktionale Anforderungen an Verkehrserfassungssysteme im Zusammenhang mit Lichtsignalanlagen	2010
1319	VSS 2000/467	Auswirkungen von Verkehrsberuhigungsmassnahmen auf die Lärmimmissionen	2010
1318	FGU 2006/001	Langzeitquellversuche an anhydritführenden Gesteinen	2010
1317	VSS 2000/469	Geometrisches Normalprofil für alle Fahrzeugtypen	2010
1316	VSS 2001/701	Objektorientierte Modellierung von Strasseninformationen	2010
1315	VSS 2006/904	Abstimmung zwischen individueller Verkehrsinformation und Verkehrsmanagement	2010
1314	VSS 2005/203	Datenbank für Verkehrsaufkommensraten	2008
1313	VSS 2001/201	Kosten-/Nutzenbetrachtung von Strassenentwässerungssystemen, Ökobilanzierung	2010
1312	SVI 2004/006	Der Verkehr aus Sicht der Kinder: Schulwege von Primarschulkindern in der Schweiz	2010
1311	VSS 2000/543	VIABILITE DES PROJETS ET DES INSTALLATIONS ANNEXES	2010
1310	ASTRA 2007/002	Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2010
1309	VSS 2008/303	Verkehrsregelungssysteme - Modernisierung von Lichtsignalanlagen	2010
1308	VSS 2008/201	Hindernisfreier Verkehrsraum - Anforderungen aus Sicht von Menschen mit Behinderung	2010
1307	ASTRA 2006/002	Entwicklung optimaler Mischgüter und Auswahl geeigneter Bindemittel; D-A-CH - Initialprojekt	2008
1306	ASTRA 2008/002	Strassenglätte-Prognosesystem (SGPS)	2010
1305	VSS 2000/457	Verkehrserzeugung durch Parkierungsanlagen	2009
1304	VSS 2004/716	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen	2008
1303	ASTRA 2009/010	Geschwindigkeiten in Steigungen und Gefällen; Überprüfung	2010

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1302	VSS 1999/131	Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belages?	2010
1301	SVI 2007/006	Optimierung der Strassenverkehrsunfallstatistik durch Berücksichtigung von Daten aus dem Gesundheitswesen	2009
1300	VSS 2003/903	SATELROU Perspectives et applications des méthodes de navigation pour la télématique des transports routiers et pour le système d'information de la route	2010
1299	VSS 2008/502	Projet initial - Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques	2009
1298	ASTRA 2007/012	Griffigkeit auf winterlichen Fahrbahnen	2010
1297	VSS 2007/702	Einsatz von Asphaltbewehrungen (Asphalteinlagen) im Erhaltungsmanagement	2009
1296	ASTRA 2007/008	Swiss contribution to the Heavy-Duty Particle Measurement Programme (HD-PMP)	2010
1295	VSS 2005/305	Entwurfsgrundlagen für Lichtsignalanlagen und Leitfaden	2010
1294	VSS 2007/405	Wiederhol- und Vergleichspräzision der Druckfestigkeit von Gesteinskörnungen am Haufwerk	2010
1293	VSS 2005/402	Détermination de la présence et de l'efficacité de dope dans les bétons bitumineux	2010
1292	ASTRA 2006/004	Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes mit eigener Ölmühle	2010
1291	ASTRA 2009/005	Fahrmuster auf überlasteten Autobahnen Simultanes Berechnungsmodell für das Fahrverhalten auf Autobahnen als Grundlage für die Berechnung von Schadstoffemissionen und Fahrzeitgewinnen	2010
1290	VSS 1999/209	Conception et aménagement de passages inférieurs et supérieurs pour piétons et deux-roues légers	2008
1289	VSS 2005/505	Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen, nationale Umsetzung der EN	2010
1288	ASTRA 2006/020	Footprint II - Long Term Pavement Performance and Environmental Monitoring on A1	2010
1287	VSS 2008/301	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von komplexen ungesteuerten Knoten: Analytisches Schätzverfahren	2009
1286	VSS 2000/338	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit auf Strassen ohne Richtungstrennung	2010
1285	VSS 2002/202	In-situ Messung der akustischen Leistungsfähigkeit von Schallschirmen	2009
1284	VSS 2004/203	Evacuation des eaux de chaussée par les bas-cotés	2010
1283	VSS 2000/339	Grundlagen für eine differenzierte Bemessung von Verkehrsanlagen	2008
1282	VSS 2004/715	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Zusatzkosten infolge Vor- und Aufschub von Erhaltungsmaßnahmen	2010
1281	SVI 2004/002	Systematische Wirkungsanalysen von kleinen und mittleren Verkehrsvorhaben	2009
1280	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit Verkehrspsychologischer Teilbericht	2010
1279	VSS 2005/301	Leistungsfähigkeit zweistreifiger Kreisel	2009
1278	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit - Verkehrstechnischer Teilbericht	2009
1277	SVI 2007/005	Multimodale Verkehrsqualitätsstufen für den Strassenverkehr - Vorstudie	2010
1276	VSS 2006/201	Überprüfung der schweizerischen Ganglinien	2008
1275	ASTRA 2006/016	Dynamic Urban Origin - Destination Matrix - Estimation Methodology	2009
1274	SVI 2004/088	Einsatz von Simulationswerkzeugen in der Güterverkehrs- und Transportplanung	2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1273	ASTRA 2008/006	UNTERHALT 2000 - Massnahme M17, FORSCHUNG: Dauerhafte Materialien und Verfahren SYNTHESE - BERICHT zum Gesamtprojekt "Dauerhafte Beläge" mit den Einzelnen Forschungsprojekten: - ASTRA 200/419: Verhaltensbilanz der Beläge auf Nationalstrassen - ASTRA 2000/420: Dauerhafte Komponenten auf der Basis erfolgreicher Strecken - ASTRA 2000/421: Durabilité des enrobés - ASTRA 2000/422: Dauerhafte Beläge, Rundlaufversuch - ASTRA 2000/423: Griffigkeit der Beläge auf Autobahnen, Vergleich zwischen den Messergebnissen von SRM und SCRIM - ASTRA 2008/005: Vergleichsstrecken mit unterschiedlichen oberen Tragschichten auf einer Nationalstrasse	2008
1272	VSS 2007/304	Verkehrsregelungssysteme - behinderte und ältere Menschen an Lichtsignalanlagen	2010
1271	VSS 2004/201	Unterhalt von Lärmschirmen	2009
1270	VSS 2005/502	Interaktion Strasse Hangstabilität: Monitoring und Rückwärtsrechnung	2009
1269	VSS 2005/201	Evaluation von Fahrzeurückhaltesystemen im Mittelstreifen von Autobahnen	2009
1268	ASTRA 2005/007	PM10-Emissionsfaktoren von Abriebpartikeln des Strassenverkehrs (APART)	2009
1267	VSS 2007/902	MDAinSVT Einsatz modellbasierter Datentransfernormen (INTERLIS) in der Strassenverkehrstelematik	2009
1266	VSS 2000/343	Unfall- und Unfallkostenraten im Strassenverkehr	2009
1265	VSS 2005/701	Zusammenhang zwischen dielektrischen Eigenschaften und Zustandsmerkmalen von bitumenhaltigen Fahrbahnbelägen (Pilotuntersuchung)	2009
1264	SVI 2004/004	Verkehrspolitische Entscheidungsfindung in der Verkehrsplanung	2009
1263	VSS 2001/503	Phénomène du dégel des sols gélifs dans les infrastructures des voies de communication et les pergélisols alpins	2006
1262	VSS 2003/503	Lärmverhalten von Deckschichten im Vergleich zu Gussasphalt mit strukturierter Oberfläche	2009
1261	ASTRA 2004/018	Pilotstudie zur Evaluation einer mobilen Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen	2009
1260	FGU 2005/001	Testeinsatz der Methodik "Indirekte Vorauserkundung von wasserführenden Zonen mittels Temperaturdaten anhand der Messdaten des Lötschberg-Basistunnels	2009
1259	VSS 2004/710	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Synthesebericht	2008
1258	VSS 2005/802	Kaphaltestellen Anforderungen und Auswirkungen	2009
1257	SVI 2004/057	Wie Strassenraumbilder den Verkehr beeinflussen Der Durchfahrtswiderstand als Arbeitsinstrument bei der städtebaulichen Gestaltung von Strassenräumen	2009
1256	VSS 2006/903	Qualitätsanforderungen an die digitale Videobild-Bearbeitung zur Verkehrsüberwachung	2009
1255	VSS 2006/901	Neue Methoden zur Erkennung und Durchsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit	2009
1254	VSS 2006/502	Drains verticaux préfabriqués thermiques pour la consolidation in-situ des sols	2009
1253	VSS 2001/203	Rétention des polluants des eaux de chaussées selon le système "infiltrations sur les talus". Vérification in situ et optimisation	2009
1252	SVI 2003/001	Nettoverkehr von verkehrintensiven Einrichtungen (VE)	2009
1251	ASTRA 2002/405	Incidence des granulats arrondis ou partiellement arrondis sur les propriétés d'adhérence des bétons bitumineux	2008
1250	VSS 2005/202	Strassenabwasser Filterschacht	2007
1249	FGU 2003/004	Einflussfaktoren auf den Brandwiderstand von Betonkonstruktionen	2009
1248	VSS 2000/433	Dynamische Eindringtiefe zur Beurteilung von Gussasphalt	2008
1247	VSS 2000/348	Anforderungen an die strassenseitige Ausrüstung bei der Umwidmung von Standstreifen	2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1246	VSS 2004/713	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Bedeutung Oberflächenzustand und Tragfähigkeit sowie gegenseitige Beziehung für Gebrauchs- und Substanzwert	2009
1245	VSS 2004/701	Verfahren zur Bestimmung des Erhaltungsbedarfs in kommunalen Strassennetzen	2009
1244	VSS 2004/714	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Gesamtnutzen und Nutzen-Kosten-Verhältnis von standardisierten Erhaltungsmassnahmen	2008
1243	VSS 2000/463	Kosten des betrieblichen Unterhalts von Strassenanlagen	2008
1242	VSS 2005/451	Recycling von Ausbaus asphalt in Heissmischgut	2007
1241	ASTRA 2001/052	Erhöhung der Aussagekraft des LCPC Spurbildungstests	2009
1240	ASTRA 2002/010	L'acceptabilité du péage de congestion : Résultats et analyse de l'enquête en Suisse	2009
1239	VSS 2000/450	Bemessungsgrundlagen für das Bewehren mit Geokunststoffen	2009
1238	VSS 2005/303	Verkehrssicherheit an Tagesbaustellen und bei Anschlüssen im Baustellenbereich von Hochleistungsstrassen	2008
1237	VSS 2007/903	Grundlagen für eCall in der Schweiz	2009
1236	ASTRA 2008/008_07	Analytische Gegenüberstellung der Strategie- und Tätigkeitsschwerpunkte ASTRA-AIPCR	2008
1235	VSS 2004/711	Forschungspaket Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen - Standardisierte Erhaltungsmassnahmen	2008
1234	VSS 2006/504	Expérimentation in situ du nouveau drainomètre européen	2008
1233	ASTRA 2000/420	Unterhalt 2000 Forschungsprojekt FP2 Dauerhafte Komponenten bitumenhaltiger Belagsschichten	2009
676	AGB 2011/002	Modelling the corrosion initiation of reinforced concrete exposed to deicing salts	2016
674	AGB 2010/006	Einfluss des Asphaltbelages auf die Dynamik von Fussgängerbrücken aus Beton und Stahl	2015
673	AGB 2006/017	Dynamic structural capacity of reinforced concrete slabs due to rockfall	2015
671	AGB 2009/008	Résistance à l'effort tranchant de dalles de roulement sous actions statiques et de fatigue	2015
670	AGB 2012/013	Optimierung und Validierung von Verfahren zur Bestimmung der Korrosionsgeschwindigkeit in Stahlbeton	2015
669	AGB 2008/007	Zentrale Dokumentation der mechanischen Eigenschaften alter Bewehrungen	2015
668	AGB 2009/004_OBF	Multifunktionaler Hochleistungssoberflächenschutz für Kunstbauten	2015
667	AGB 2008/004	Résistance au déversement des poutres métalliques de pont	2015
666	AGB 2012/015	Structural Identification for Condition Assessment of Swiss Bridges	2015
665	AGB 2011/001	Wirksamkeit und Prüfung der Nachbehandlungsmethoden von Beton	2014
664	AGB 2009/005	Charges de trafic actualisées pour les dalles de roulement en béton des ponts existants	2014
663	AGB 2003/014	Seismic Safety of Existing Bridges	2014
662	AGB 2008/001	Seismic Safety of Existing Bridges - Cyclic Inelastic Behaviour of Bridge Piers	2014
661	AGB 2010/002	Fatigue limit state of shear studs in steel-concrete composite road bridges	2014
660	AGB 2008/002	Indirekt gelagerte Betonbrücken - Sachstandsbericht	2014
659	AGB 2009/014	Suizidprävention bei Brücken: Follow-Up	2014
658	AGB 2006/015_OBF	Querkraftwiderstand vorgespannter Brücken mit ungenügender Querkraftbewehrung	2014
657	AGB 2003/012	Brücken in Holz: Möglichkeiten und Grenzen	2013
656	AGB 2009/015	Experimental verification of integral bridge abutments	2013
655	AGB 2007/004	Fatigue Life Assessment of Roadway Bridges Based on Actual Traffic Loads	2013
654	AGB 2005-008	Thermophysical and Thermomechanical Behavior of Cold-Curing Structural Adhesives in Bridge Construction	2013
653	AGB 2007/002	Poinçonnement des pontsdalles précontraints	2013
652	AGB 2009/006	Detektion von Betonstahlbrüchen mit der magnetischen Streufeldmethode	2013
651	AGB 2006/006_OBF	Instandsetzung und Monitoring von AAR-geschädigten Stützmauern und Brücken	2013
650	AGB 2005/010	Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Betonstählen	2012
649	AGB 2008/012	Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
648	AGB 2005/023 + AGB 2006/003	Validierung der AAR-Prüfungen für Neubau und Instandsetzung	2011
647	AGB 2004/010	Quality Control and Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges	2011
646	AGB 2005/018	Interactin sol-structure : ponts à culées intégrales	2010
645	AGB 2005/021	Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton aus Betongranulat	2010
644	AGB 2005/004	Hochleistungsfähiger Faserfeinkornbeton zur Effizienzsteigerung bei der Erhaltung von Kunstbauten aus Stahlbeton	2010
643	AGB 2005/014	Akustische Überwachung einer stark geschädigten Spannbetonbrücke und Zustandserfassung beim Abbruch	2010
642	AGB 2002/006	Verbund von Spanngliedern	2009
641	AGB 2007/007	Empfehlungen zur Qualitätskontrolle von Beton mit Luftpermeabilitätsmessungen	2009
640	AGB 2003/011	Nouvelle méthode de vérification des ponts mixtes à âme pleine	2010
639	AGB 2008/003	RiskNow-Falling Rocks Excel-basiertes Werkzeug zur Risikoeermittlung bei Steinschlagschutzgalerien	2010
638	AGB2003/003	Ursachen der Rissbildung in Stahlbetonbauwerken aus Hochleistungsbeton und neue Wege zu deren Vermeidung	2008
637	AGB 2005/009	Détermination de la présence de chlorures à l'aide du Géoradar	2009
636	AGB 2002/028	Dimensionnement et vérification des dalles de roulement de ponts routiers	2009
635	AGB 2004/002	Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales	2008
634	AGB 2002/007	Untersuchungen zur Potenzialfeldmessung an Stahlbetonbauten	2008
633	AGB 2002/014	Oberflächenschutzsysteme für Betontragwerke	2008
632	AGB 2008/201	Sicherheit des Verkehrssystem Strasse und dessen Kunstbauten Testregion - Methoden zur Risikobeurteilung Schlussbericht	2010
631	AGB 2000/555	Applications structurales du Béton Fibré à Ultra-hautes Performances aux ponts	2008
630	AGB 2002/016	Korrosionsinhibitoren für die Instandsetzung chloridverseuchter Stahlbetonbauten	2010
629	AGB 2003/001 + AGB 2005/019	Integrale Brücken - Sachstandsbericht	2008
628	AGB 2005/026	Massnahmen gegen chlorid-induzierte Korrosion und zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit	2008
627	AGB 2002/002	Eigenschaften von normalbreiten und überbreiten Fahrbahnübergängen aus Polymerbitumen nach starker Verkehrsbelastung	2008
626	AGB 2005/110	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Baustellensicherheit bei Kunstbauten	2009
625	AGB 2005/109	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen bei Kunstbauten	2009
624	AGB 2005/108	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Risikobeurteilung für Kunstbauten	2010
623	AGB 2005/107	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Tragsicherheit der bestehenden Kunstbauten	2009
622	AGB 2005/106	Rechtliche Aspekte eines risiko- und effizienzbasierten Sicherheitskonzepts	2009
621	AGB 2005/105	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Szenarien der Gefahrenentwicklung	2009
620	AGB 2005/104	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen	2009
619	AGB 2005/103	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Ermittlung des Netzrisikos	2010
618	AGB 2005/102	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung	2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
617	AGB 2005/100	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Synthesebericht	2010
616	AGB 2002/020	Beurteilung von Risiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierter Risiken in Folge aussergewöhnlicher Einwirkungen bei Kunstbauten	2009