



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la
communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle
comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Pilotstudie zur Evaluation einer mobilen Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslast- simulation auf Strassenbelägen

**Étude de pilote pour l'évaluation d'une machine mobile
à vrai grandeur qui permet de simuler le trafic sur les
routes dans une manière accélérée**

**Pilot-Study for the Evaluation of a Mobile Full-Scale
Accelerated Pavement Testing Equipment)**

**Empa, Eidgenössische Materialsprüfungs- und
Forschungsanstalt
Abteilung Strassenbau/Abdichtungen
Martin Arraigada, dipl. Ing.
Alexis Kalogeropoulos, dipl. Geophysiker; Msc
Johannes Hugenschmidt, dipl.-Geophysiker; MBA
Manfred N. Partl, Prof. Dr., dipl. Ing. ETH**

**ETH, Eidgenössische Technische Hochschule
Markus Caprez, Dr., dipl. Ing. ETH
Carlo Rabaiotti, Dr., dipl. Ing.**

**Forschungsauftrag ASTRA 2004/018 auf Antrag der
ASTRA OFROU USTRA UVIAS**

Juni 2009

1261

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en).
Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes.
Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade.
Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) appointed by the Swiss federal roads office.
Supply: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la
communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle
comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Pilotstudie zur Evaluation einer mobilen Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslast- simulation auf Strassenbelägen

**Étude de pilote pour l'évaluation d'une machine mobile
à vrai grandeur qui permet de simuler le trafic sur les
routes dans une manière accélérée**

**Pilot-Study for the Evaluation of a Mobile Full-Scale
Accelerated Pavement Testing Equipment**

**Empa, Eidgenössische Materialsprüfungs- und
Forschungsanstalt
Abteilung Strassenbau/Abdichtungen
Martin Arraigada, dipl. Ing.
Alexis Kalogeropoulos, dipl. Geophysiker; Msc
Johannes Hugenschmidt, dipl.-Geophysiker; MBA
Manfred N. Partl, Prof. Dr., dipl. Ing. ETH**

**ETH, Eidgenössische Technische Hochschule
Markus Caprez, Dr., dipl. Ing. ETH
Carlo Rabaiotti, Dr., dipl. Ing.**

**Forschungsauftrag ASTRA 2004/018 auf Antrag der
ASTRA OFROU USTRA UVIAS**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Manfred N. Partl, Prof. Dr., dipl. Ing. ETH

Markus Caprez, Dr., dipl. Ing. ETH

Mitglieder

Martin Arraigada, dipl Ing.

Carlo Rabaiotti, Dr, dipl Ing.

Alexis Kalogeropoulos, dipl Geophysiker; Msc

Johannes Hugenschmidt, dipl.-Geophysiker; MBA

Begleitkommission

Präsident

Andreas Gantenbein (ASTRA)

Mitglieder

Hans-Peter Beyeler (ASTRA)

Luzia Seiler (ASTRA)

Carlo Mariotta (FOKO)

Bernhard Meier (KI)

Rolf Meier (KI)

Hermann Fritz (VSS)

Alain Jacot (VSS)

Martin Horat (VSS)

Rainer Good (Infra)

Thomas Arn (Infra)

Manfred N. Partl (Betreiber)

Markus Caprez (Betreiber)

Peter Richner (Betreiber)

Antragsteller

Bundesamt für Strassen (ASTRA)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von www.astra.admin.ch herunter geladen werden.

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	4
	Zusammenfassung	7
	Résumé	8
	Summary	9
1	Einleitung	11
2	Zielsetzung	14
2.1	Allgemeine Zielsetzung	14
2.2	Technische Anforderungen an die Grossversuchsanlage	14
2.2.1	Qualitative Grundanforderungen.....	14
2.2.2	Quantitative Anforderungen	15
3	Vorgehen	17
4.1	Besichtigung und Beurteilung der „Stellenbosch-Anlage“ MLS10	19
4.1.1	Allgemeines.....	19
4.1.2	Beurteilung	20
4.2	Besichtigung und Beurteilung der „LCPC-Anlage“ FABAC	24
4.2.1	Allgemeines.....	24
4.2.2	Beurteilung	24
4.3	Vorentscheid bezüglich MLS10 und FABAC	28
4.3.1	Vergleichende Bewertung	28
4.3.2	Folgerung	30
5	Evaluation	31
5.1	Funktionsdemonstration der MLS10 Maschine in Mozambique	31
5.1.1	Allgemeines.....	31
5.1.2	Versuchsfelder	31
5.1.3	Betrieb der Maschine	32
5.1.4	Relevante Punkte und Fragen zur Maschine.....	33
5.1.5	Beurteilung	34
5.2	Lärmschutzverkleidung: Inspektion und Messungen in Johannesburg	36
5.2.1	Allgemeines.....	36
5.2.2	Lärmmessung.....	37
5.2.3	Messkonzept und Messraster	39
5.2.4	Beurteilung	43
5.3	Entscheid betreffend Pilotversuchen in der Schweiz.....	44
6	Eignungstest in Betzholz/Hinwil	45
6.1	Vorarbeiten und Methodik	45
6.1.1	Situationsplan Standort	45
6.1.2	Belagsaufbau	46
6.1.3	Verkehrsdaten	46
6.1.4	Generelles Versuchsprogramm	47
6.2	Transport nach Hinwil	48
6.3	Untersuchungen an der MLS10	48
6.3.1	Lastmessungen MLS10 auf Brückenwaage in Betzholz/Hinwil	48
6.3.2	Dynamische Lastmessung mit einem WIM Sensor	51
6.3.3	Folgerungen	56
6.4	Untersuchungen des Belagszustandes	56
6.4.1	Zustandserfassung am Belag	56
6.4.2	Spurrinnenbildung, gemessen mit Querprofilmessung.....	58
6.4.3	Georadar Messungen	59
6.4.4	Deflektionsmessung mit dem ETH DELTA Gerät	67
6.4.5	Dynamische Belagsverformung unter den Rädern.....	72
6.4.6	Seismischer Modul des Belags ermittelt mit dem Portable Seismic Pavement Analyzer (PSPA)	75
	Schlussfolgerungen	82
	Abkürzungen	85
	Literaturverzeichnis	87
	Projektabschluss	89
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	94

Zusammenfassung

Auf dem Gelände der Empa Dübendorf wurde während fast 30 Jahren vom IGT der ETH eine Grossversuchsanlage zur Untersuchung des Verhaltens verschiedener Oberbaustrukturen und Typen erfolgreich betrieben. Diese stationäre Rundlaufanlage, die ursprünglich auf dem freien Feld weitab von Wohnsiedlungen lag, hatte über all die Jahre wertvolle Erkenntnisse für die Strassenbautechnik und das Normenwesen in der Schweiz geliefert. Infolge Umnutzung des Geländes für andere Zwecke und der siedlungsbedingt immer stärker eingeschränkten Nutzung der Anlage war ein Abbruch der Rundlaufanlage unvermeidlich.

In der vorliegenden Forschungsarbeit wurde ein Ersatz für diese Rundlaufanlage evaluiert und hinsichtlich praktischer Eignung untersucht. Modernen Entwicklungen auf dem Gebiet der beschleunigten Verkehrslastsimulation entsprechend wurde anstelle einer stationären Anlage eine mobile Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen im Massstab 1:1 evaluiert und praktischen Eignungsprüfungen unterzogen. Die neue Anlage sollte eine Ergänzung der bestehenden stationären Anlage in Lausanne (Halle Fosse) und des kleinen, mobilen Verkehrslastsimulators der Empa zur in situ Ermittlung des Spurrinnenwiderstandes (Model Mobile Load Simulator MMLS3) darstellen.

Nach einer Vorevaluation geeigneter Geräte fiel der Fokus auf den sogenannten Model Load Simulator MLS10 aus Südafrika, weil dieses Gerät den gesetzten Erwartungen und Anforderungen am besten entsprach. Das Gerät beruht auf einem neuartigen Konzept mit vier schienengeführten, vertikal umlaufenden Belastungsschemeln und zeichnet sich durch eine hohe Leistungsfähigkeit von 6'000 unidirektionalen Überrollungen pro Stunde (22km/h) aus. Da es sich im Gegensatz zu bestehenden Anlagen um einen Prototyp handelte, wurde die Anlage zunächst im Rahmen von Projekten in Mozambique und in Südafrika Langzeittests mit über 3 Mio. Überrollungen unterzogen und anschliessend nach einigen Anpassungen in die Schweiz überführt, um dort die eigentlichen Eignungstests auf einem Autobahnbelag mit Zementstabilisierung bei Hinwil durchzuführen. Dabei wurden insgesamt 1 Mio. Überrollungen mit 65kN Halbachlasten aufgebracht. Die Versuche wurden durch verschiedene Zusatzmessungen zur Erfassung des Verhaltens der MLS10 und der Veränderung des Belagszustandes begleitet.

Querprofilmessungen, Deflektionsmessungen mit dem ETH DELTA Gerät sowie Vertikalverformungsmessungen mittels Beschleunigungs- und magnetostriktiven Sensoren einschliesslich Messungen des seismischen dynamischen Moduls mit dem Portable Seismic Pavement Analyzer (PSPA) zeigten in guter Übereinstimmung, dass die MLS10 Grossversuchsanlage schon nach relativ kurzer Zeit eine Veränderung des Belagsverhaltens erzeugte, die nach Abschluss der Versuche zu einem weitgehenden Verlust der Tragfähigkeit des Belages führten. Tatsächlich wurde unter den Doppelrädern der gesamte Asphaltbelag ohne wesentliche Dickenänderung in die erste Schicht der Zementstabilisierung durchgestanzt. Dabei wurde die Zementstabilisierung derart zerstört, dass keine Bohrkernentnahme mehr möglich war und zwischen Deck- und Binderschicht ein vollständiger Verlust des Schichtenverbundes stattfand.

Aufgrund der in dieser Forschungsarbeit gewonnenen, positiven Resultate der Eignungstests und basierend auf dem gemeinsam von Empa und ETH/IGT vorgeschlagenen Forschungs- und Beschaffungskonzept wurde schliesslich die Anschaffung der MLS10 für die Schweiz als geeigneter Ersatz für die abgebrochene, stationäre Rundlaufanlage empfohlen. Beispiel Aufzählungszeichen.

Résumé

Depuis près de 30 ans en Suisse, différents types de routes et structures de chaussée ont été étudiés avec succès à l'aide d'un simulateur de trafic de taille réelle situé sur les terrains de l'Empa Dübendorf et exploité par IGT à l'ETH. Cette voie circulaire d'essais stationnaire construite en plein champ à une distance raisonnable des lotissements avoisinants, a fourni de précieuses connaissances techniques et les règles régissant le domaine de la construction de routes, au cours de nombreux projets de recherche. Toutefois la fermeture définitive et la démolition de cette dernière était inévitable, contrainte par l'augmentation des restrictions d'utilisation concomitantes à une densification continue de la zone, ainsi que par la nécessité de réutilisation des terres occupées par piste d'essai.

Ce rapport présente les recherches et les essais évaluant une alternative à la piste d'essai. Au lieu d'une installation fixe et, ce en suivant les tendances actuelles de la recherche, un équipement mobile d'essai accéléré de chaussée, à l'échelle a été évalué et testé. Ce nouvel équipement complète un dispositif existant à Lausanne (Halle Fosse) et un petit simulateur de modèle de mobile, le MMLS3, utilisés pour les essais d'orniérage.

Après une pré-évaluation de l'ensemble des équipements possible, l'attention a été portée sur le Model Load Simulator MLS10, fabriqué en Afrique du Sud, cette machine se trouvant être la plus proche des attentes et des exigences d'utilisation. Le MLS10 est basé sur un nouveau concept qui utilise quatre bogies qui se déplacent sur des rails, fermés, guidés verticalement, permettant jusqu'à 6'000 cycles de charge unidirectionnels par heure (22 km/h). À la différence des différents dispositifs existants, cette machine est un prototype. Elle a donc été testée dans des projets au Mozambique et en Afrique du Sud grâce à la mise en œuvre de plus de 3 millions de cycles de charge, avant d'être envoyé en Suisse pour un essai sur route à chaussée de ciment stabilisé, à Hinwil. Un million de cycles de charge ont été appliqués par essieu de 65kN. Plusieurs mesures ont été effectuées au cours de l'essai afin de déterminer le comportement du MLS10 ainsi que les modifications des propriétés de la surface chargée.

Les mesures du profil transversal et de la déflexion ont été réalisées à l'aide de l'appareil de contrôle ETH-DELTA, ainsi qu'avec des accéléromètres et des capteurs magnétostrictifs mesurant la déformation verticale de la chaussée. En prenant compte du module sismique dynamique, le Portable Seismic Pavement Analyzer (PSPA) a montré que le dispositif d'essai accéléré de chaussées MLS10 a été en mesure de modifier la réponse de la chaussée dans un court laps de temps. Ces changements ont conduit à une perte totale de capacité de charge de la chaussée à la fin de l'essai. En fait, il a été constaté que les couches d'asphalte ont pénétré dans la partie supérieure de la couche stabilisée, sans modification significative de son épaisseur. Au cours de ce processus, la couche de stabilité était si endommagé qu'il n'était pas possible d'en extraire des échantillons intacts après l'essai. En outre, nous avons observé une perte complète de cohésion au niveau de la jonction entre la couche de roulement et la couche de liaison.

Sur la base des résultats positifs de cette étude et en tenant compte des méthodes de recherche et d'évaluation combinés de l'Empa et de l'IGT/ETH, il a finalement été conclu de proposer le MLS10 comme une alternative appropriée à la fermeture de la précédente piste circulaire d'essais stationnaire.

Summary

Different road structures and pavements types have been investigated successfully in Switzerland for almost 30 years using a full-scale testing facility that was located at Empa Dübendorf and operated by IGT at ETH. This stationary circular test track, build in the open range in reasonable distance of housings, has provided valuable knowledge for Swiss road construction technology and standardization in many research projects. However, due to the fact that the site of the test track had to be used for other purposes and forced by demands of an increasingly denser populated neighborhood requiring more and more restrictions to the operation of the test track, a final shutdown and demolition of the test track became inevitable.

This report presents the research and practical proof testing that was conducted to evaluate an alternative for this circular test track. Instead of a stationary installation and following modern research trends, a mobile full-scale accelerated pavement testing equipment was evaluated and practically tested. The new equipment is complementary to both an existing device in Lausanne (Halle Fosse) and a small model mobile load simulator MMLS3 at Empa for rut resistance evaluation.

After pre-evaluation of suitable equipment, focus was given to the so-called Model Load Simulator MLS10, made in South Africa, because this machine met closest expectations and requirements. The MLS10 is based on a new concept with four rail guided vertically circulating load bogies that allow 6'000 unidirectional wheel passings per hour (22km/h). Other than existing devices the machine is a prototype. Therefore it was first tested in projects in Mozambique and South Africa by applying more than 3 mio passings before being shipped to Switzerland for proof testing in Hinwil on a motorway pavement with cement stabilization. Here, in total, 1 mio passings with 65kN half-axle load were imposed. Tests were accompanied with different follow-up measurements for determining both the behavior of the MLS10 and the change of pavement properties.

Measurements of the transversal profile and monitoring of the deflections with the ETH DELTA device as well as measurements of the vertical deformation of the pavement with accelerometers and magnetostrictive sensors were performed. Supported by measurements of the seismic dynamic modulus with the Portable Seismic Pavement Analyzer (PSPA), all these measurements showed in good agreement that the MLS10 full-scale accelerated pavement testing device was able to change the pavement behavior in a comparatively short period of time. These changes led to a complete loss of bearing capacity of the pavement at the end of the tests. In fact, it was found that the asphalt layers were punched into the upper stabilization layer without significant change of thickness. During this process the stabilization was damaged such that it was not possible to take core of this layer after testing. In addition, a complete loss of interlayer bond between wearing and binder course was observed.

Based on the positive results of this research and taking into account the joint Empa-ETH/IGT research and evaluation concept it was finally concluded to propose the commissioning of the MLS10 as a suitable alternative for the shut-down Swiss stationary circular track accelerated pavement testing facility.

1 Einleitung

Grossversuche unter realen, definierten Verkehrs- und Klimabedingungen werden praktisch in allen Schlüsseländern der Strassenbauentwicklung als unerlässliches Instrument angesehen, um einerseits Bau- und Unterhaltskosten zu reduzieren und andererseits die Gebrauchstauglichkeit und Nachhaltigkeit von Strassenbelägen (Schonung der Ressourcen und des Volksvermögens) weiter zu verbessern.

Insbesondere sind Grossversuche mit beschleunigter Verkehrslastsimulation (Accelerated Pavement Tests, APT) auf Belägen ein wesentliches Element, um die Errungenschaften der angewandten Forschung und Entwicklung im Bereich Baustoffe, Belagsaufbauten und Dimensionierungen hinsichtlich ihrer praktischen Tauglichkeit und Umsetzung ohne Behinderung von Verkehrsteilnehmern in sicherer und rascher Weise validieren und optimieren zu können. Dies belegen nicht zuletzt die intensivierten, internationalen Anstrengungen auf diesem Gebiet (z.B. die Serie internationaler Konferenzen Accelerated Pavement Testing, 1999 in Reno, 2004 in Minneapolis und 2008 in Madrid) sowie der Erfolg der bisher durchgeführten Untersuchungen und Versuchsanlagen im In- und Ausland, z.B. NCHRP Synthesis 325 Significant Findings From Accelerated Pavement Testing ([1] Hugo et al. (2004)) oder COST 347 Improvements in Pavement Research with Accelerated Load Testing (diverse Berichte herunterladbar via <http://www.pave-test.org>). Beispiele solcher Anlagen, gegliedert nach mobilen und stationären Anlagen, zur Prüfung von Strassen oder speziell gefertigter Teststrecken enthält Abb. 4.1.

Abb. 4.1 Beispiele und Klassierung von APT Anlagen

Stationär	Test-Strassen	 MnRoad.us	 NCAT.us	 Westrack.us	 CERl.jp
	Test-Strecken (Linear)	 HalleFosse,LAVOC.ch	 LINTRACK.nl	 ATLaS,ATREL.us	 CEDEX.es
	Test-Strecken (Rundlauf)	 CAPTIF.nz	 Manège,LCPC.fr	 JHRI.jp	 Rundlauf,ETHZ.ch
Mobil	Strassen	 TxMLS.us	 ALF.FHWA.us	 HVS, CSIR.za	 FABAC, LCPC.fr

Zwar konzentrierte sich die bisherige Belagsforschung aus Kostengründen hauptsächlich auf den Labormassstab oder aber auf vereinzelte in situ Erfassungen, doch sind beide Erfahrungshintergründe (Laborpraxis) ohne das Schliessen der Erkenntnislücke mit definierten Grossversuchen letztlich nicht sicher zu beherrschen. Zu einer raschen Aussage, zur Validierung sowie zur Steigerung des praktischen Nutzens von Forschungsergebnissen sind daher Verkehrssimulationen unter definierten Bedingungen un-

erlässlich (Abb. 4.2).

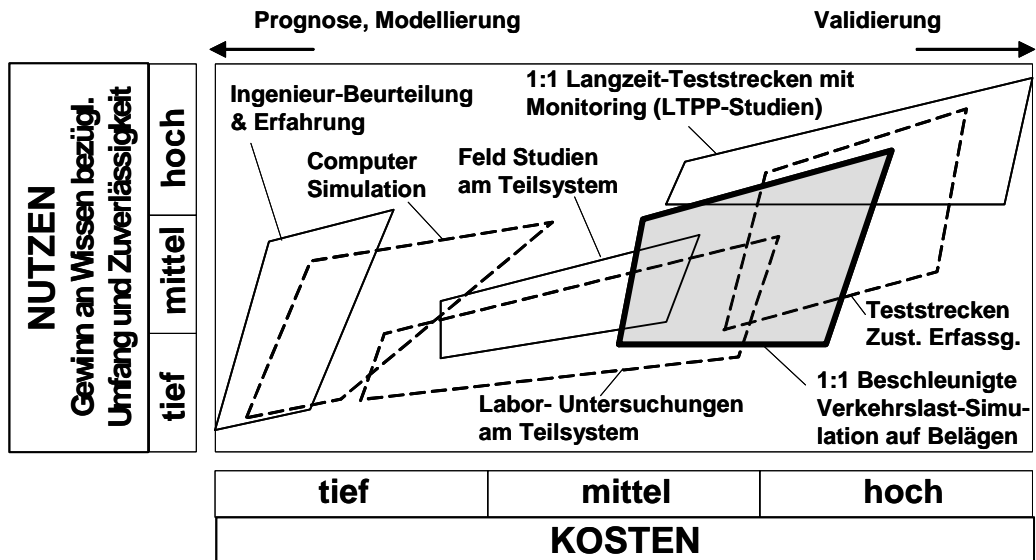


Abb. 4.2 Anwendungsbereich und Nutzen von Grossversuchen zur beschleunigten Verkehrslastsimulation APT auf Belägen (nach [1] Hugo et al (2004))

Von beschleunigten Verkehrslastsimulationen werden rasche, zuverlässige und praxisgerechte Antworten zur Abschätzung der strukturellen Tragfähigkeit erwartet, insbesondere in den Bereichen:

- Planung und Bemessung - Dauerhaftigkeit,
- Zustand - Resttragfähigkeit, Erhaltungsmaßnahmen
- Einbauqualität
- Innovation:
 - neue Beläge fördern (Lärm, Warmasphalt)
 - teure Fehlentwicklungen vermeiden (kleineres Risiko)

Eine Einschätzung der Bedeutung von APT für einzelne Forschungsgebiete wurde im Rahmen der europäischen Forschungsinitiative COST 347 erhoben. Demnach kommt APT mit Ausnahme der Entwicklung von Belags- und Leistungsfähigkeitsmodellen, verglichen mit den anderen Methodologien, jeweils die grösste Bedeutung zu (Abb. 4.3).

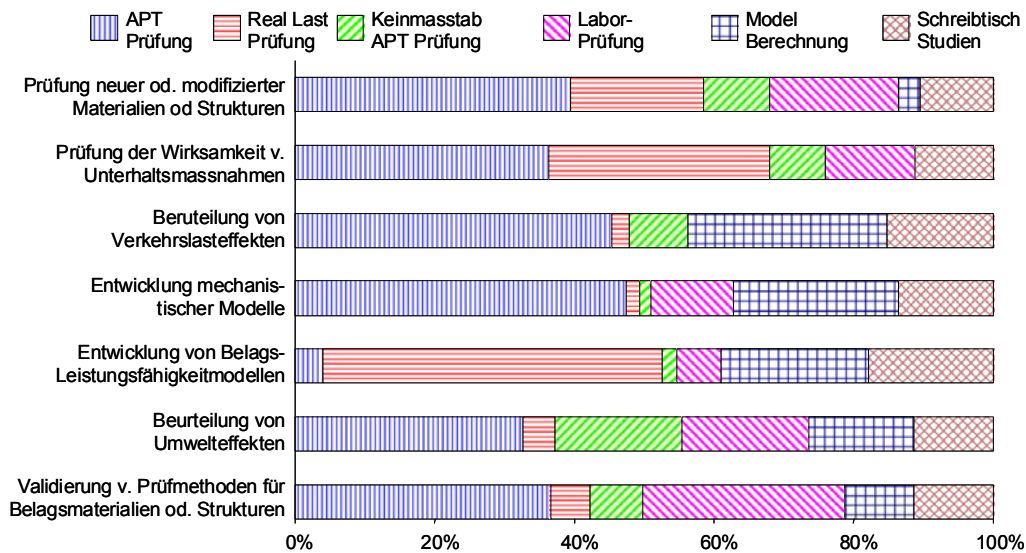


Abb. 4.3 Rolle von APT für einzelne Forschungsgebiete, gemäss COST 347 WP5 „Common Code of Good Practice for the Application of ALT“ (nach [2] Van Dommelen (2004))

Tatsächlich hat auch die Schweiz dank solch relativ aufwendiger APT-Einrichtungen, wie namentlich des Rundlaufs der ETHZ auf dem Gelände der Empa sowie der Halle Fosse der EPFL, zum Wohle des Strassenbenutzers und der Volkswirtschaft recht erfolgreich eine punktuelle auf die Schweiz zugeschnittene Baustoffforschung und Systementwicklung betreiben können, die es ermöglichte, bezüglich Gebrauchstauglichkeit, Sicherheit und optimalem, massvollem Materialeinsatz technologisch mit den dramatisch steigenden Verkehrsbeanspruchungen und Zusatzbedürfnissen (z.B. Umwelt), aber auch mit den technischen Neuentwicklungen, bis dato weitgehend Schritt zu halten. Entsprechende Publikationsbeispiele finden sich im Literaturverzeichnis.

Die Grossversuchsanlage „Rundlauf“ hat das Forschungswesen im Bereich der strukturellen Dimensionierung von Oberbauten von Verkehrswegen in den letzten dreissig Jahren wesentlich beeinflusst. Aufgrund von Versuchen im Grossmassstab 1:1 auf mehr als 35 Versuchsfeldern wurden im Rundlauf die heute gültigen Schweizer Normen für die Dimensionierung von Oberbauten und die Beurteilung von Rezepturen für die Materialherstellung massgebend beeinflusst. In diesem Zusammenhang sei auch die letzte mit dem Rundlauf der ETHZ durchgeführte Arbeit im Rahmen des Projektes Unterhalt 2000 von [3] Rabaiotti et al (2007) hervorgehoben.

Der vom IGT der ETH auf dem Areal der Empa erstellte Rundlauf war ursprünglich praktisch auf der „grünen Wiese“ erstellt worden. Durch die intensive Bautätigkeit der letzten Jahrzehnte hat sich die Umgebung in ein stark genutztes, städtisches Gebiet gewandelt, woraus erhebliche Einschränkungen im Betrieb resultierten. Da das Areal zudem anderweitig genutzt werden musste, war ein Abbruch der Rundlaufanlage unvermeidlich und musste auf Ende 2005 anderen Baumassnahmen im Rahmen der räumlichen Konzentration der vorhandenen Institutionen des ETH-Bereichs weichen.

Um einen zeitgemässen Ersatz für die abgebrochene Rundlaufanlage zu schaffen, wurde daher von der Empa und der IGT/ETHZ gemeinsam ein Forschungsvorhaben an das ASTRA eingereicht.

2 Zielsetzung

2.1 Allgemeine Zielsetzung

Das Ziel dieses Forschungsprojektes ist die Evaluation und praktische Eignungsprüfung einer mobilen Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen im Massstab 1:1 als Ersatz der abgebrochenen stationären Rundlaufanlage des Instituts für Geotechnik der ETHZ-IGT auf dem Areal der EMPA gemäss gemeinsam von Empa und IGT vorgeschlagenen Forschungs- und Beschaffungskonzept ([12] Partl und Caprez (2004)).

Auf Basis dieser Evaluation sind konkrete Vorschläge für die Beschaffung einer neuen Anlage zu unterbreiten. Installation und Inbetriebnahme sind Gegenstand eines Anschlussprojektes. Die neue Anlage soll eine Ergänzung der bestehenden stationären Anlage in Lausanne (Halle Fosse) und des kleinen mobilen Verkehrslastsimulators der EMPA zur in-situ Ermittlung des Spurbildungswiderstandes (Model Mobile Load Simulator MMLS3) darstellen.

Im oben erwähnten Beschaffungskonzept wird festgestellt, dass das Konzept eines stationären Rundlaufs aus verschiedenen Gründen als überholt anzusehen ist. Insbesondere werden heute wegen der vielseitigeren Einsatzmöglichkeiten, der grösseren Mobilität sowie der belagsseitig besseren Praxisbezogenheit mobile Verkehrslastsimulatoren eingesetzt. Solche Geräte können sowohl im Labor auf Versuchsfeldern als auch in-situ auf tatsächlichen Strassenbelägen eingesetzt werden. Sie können nicht nur für Forschung und Entwicklung sondern auch für die praktische Bewertung und Beurteilung von Baumassnahmen in Spezialfällen (z.B. Abnahme) eingesetzt werden. Es wurde festgestellt, dass verschiedene Geräte auf dem Markt oder in Entwicklung begriffen sind (vgl. Abb. 4.1), dass jedoch nur wenige für den Einsatz in der engen Geografie der Schweiz geeignet sind.

2.2 Technische Anforderungen an die Grossversuchsanlage

Die EMPA und die ETHZ streben ein ca. 10m langes, 3.5m hohes und 2.5m breites mobiles Gerät mit einer Überrollstrecke von 4m an, welches auf unseren engen Strassen noch relativ leicht zu transportieren ist und unidirektional etwa 7200 Überrollungen pro Stunde (ca. 2Hz) sowie halbe Achslasten von 60kN mit LKW Doppel- oder Einzelrädern erlaubt. Das Gerät soll eine seitliche Spurrinnendrift ermöglichen. Das Gerät ist so zu konzipieren, dass es relativ einfach transportiert werden kann und muss sich am Prüfort selbstständig von einer Prüfstelle zur anderen fortbewegen können. Selbstantrieb der Räder sowie Temperierbarkeit der Anlage sind keine zwingenden Vorgaben. Standort des Gerätes ist die EMPA.

Im Folgenden werden die wichtigsten Anforderungen zusammengefasst, wie sie im Pflichtenheft vom Mai 2007 definiert wurden.

2.2.1 Qualitative Grundanforderungen

2.2.1.1 Funktion

- Mobile selbstfahrende Anlage zur Simulation von Achslasten des Schwerverkehrs, welche geeignet ist, die in der Schweiz für Schwerverkehr üblichen Oberbauten mit starren und flexiblen Bauweisen vor Ort hinsichtlich struktureller Tragfähigkeit und Schädigung durch Überrollen mit effektiven Lastwagenpneus wirksam zu beanspruchen.
- Geeignet für den Dauereinsatz im Freien unter schweizerischen Klimabedingungen (Korrosions- Feuchte- und Hitzeschutz) und unter den engen Schweizer Platzverhältnissen (z.B. Kreisel) im bewohnten ländlichen bzw. städtischen Gebiet

- Transportabel via Bahn und via Strasse ohne Sondertransport.
- Selbstfahrend und leicht und sicher manövrierbar für kurze Strecken (auf der Prüfstrecke) bis zu einer Steigung von 10% und zum Aufladen auf Transporter (z.B. Tieflader)
- Möglichkeit zum Betreiben mit Zwillingsreifen oder Supersingle, leicht auswechselbar
- Erfüllen aller in der Schweiz geltenden gesetzlichen Bestimmungen, die maschinenseitig für Betrieb, Transport, Stationierung und Unterhalt einer solchen Anlage notwendig sind (d.h. Arbeitssicherheit, Umwelt-Lärm, elektrische Vorschriften, Lichtraumprofile, Luftreinhalteverordnung, Verwendung umweltkompatibler Materialien, Feuersicherheit)
- Antrieb (Motor, Treibstoff) geeignet für den Betrieb sowohl im Freien als auch in geschlossenem Raum (Tunnel, Prüfhalle)
- Unabhängige, eigene Energieversorgung entsprechend der Luftreinhalteverordnung (im Falle von Diesel mit Partikelfilter)

2.2.1.2 Belastungssystem

- Halbe Achse mit Lastwagen-Bereifung mit welcher die Last einer halben Achslast durch unidirektionale Rollbewegungen aufgebracht werden kann
- Pneumatische oder hydraulische Radaufhängung entsprechend moderner LKWs
- Sanftes und stossfreies Aufsetzen der Last und gleichmässige Lastaufbringung während des Überrollens (innerhalb von 2% der Achslast)
- Simulation der seitlichen Spurbewegungen von 300mm beidseitig (Lateral Wandering)
- Messung des Lastverlaufes während des Überrollens

2.2.1.3 Bedienung, Handling

- Im bewegungslosen Zustand, leichte Zugänglichkeit der Überrollstrecke zwecks Installation von Messgeräten, Messung und Wartung (Bodenfreiheit ca. 1m)
- Einsichtmöglichkeit für visuelle Inspektion während dem Versuch
- Übersichtliche einfache Bedienung durch einen Operateur sowohl des Selbstfahrmechanismus als auch des Belastungsmechanismus.
- Zweckmässige Sicherheitsvorkehrungen für Lagerung, Transport und Einsatz der Maschine,
- Zuverlässiges unterhaltarmes Gerät mit möglichst wenigen, jedoch einfach auszuwechselnden Verschleissteilen.
- Hebevorrichtung zum Anheben der Maschine mit Kran

2.2.1.4 Optionale Funktionen, später ausbaubar

- Möglichkeit des Aufbringens von Horizontalschub als Option (upscaling möglich)
- Raum und Möglichkeit zur Installation eines geeigneten Messsystems zur kontinuierlichen Beobachtung und Erfassung der Riss- und Spurbildung (z.B. optisches System)
- Möglichkeiten der Installation einer Heizung bzw. Sprengleranlage zur Regensimulation

2.2.1.5 Support, technische Unterlagen

- Rasche technische Unterstützung innerhalb von 48h, Service möglichst in der Standortnähe der Maschine
- Vollständige Dokumentation und Pläne (Elektrische Pläne, Stromlaufpläne, mechanische Pläne, Konstruktionspläne, Hydraulikpläne, etc.), einschliesslich Unterhalt und Wartungspläne
- Ausführliche Betriebsanleitung und Betriebsreglement (Sicherheit) sowie Sourcecode von Software
- Ausbildung und Training von Fach- und Bedienungspersonal

2.2.2 Quantitative Anforderungen

- Belastungsgeschwindigkeit: Überroll-Lastzyklen 2 Hz (unidirektional)
- Dauerbetrieb ohne Unterbruch: 10h
- Maximale Last (halbe Achslast) mindestens 65kN, steuerbar
- Abmessungen im Transportzustand:

- Breite: max. 2.55m, entsprechend der maximal ohne Sondertransport auf der Strasse zugelassenen Fahrzeugbreite
- Länge: max. 12m
- Höhe: geeignet für Transport auf der Strasse und mit der Bahn ohne Sondertransport
- Länge des Überroll- und Prüfweges für Messungen: mind. 4m
- Pnautypen: R22.5 295/65 und Supersingle 385/65
- Lärmentwicklung: in 7.5m Abstand von der Maschine und in 1.2m Höhe $\leq 85\text{dB(A)}$
- Gewicht $\leq 35\text{t}$
- Versorgungsspannung 230/400V; Frequenz 50Hz
- Leistungsbedarf im Betrieb weniger als 70kWh

3 Vorgehen

Die zur Evaluation der Anlage gewählte Vorgehensweise gliederte sich in folgende drei Schritte:

Vorevaluation

1. Erstellung eines Pflichtenhefts
2. Auf Basis des Standes der Technik, der vorhandenen Literatur, der bisherigen Erfahrungen mit Grossversuchen in der Schweiz sowie der Bedürfnisse entsprechend der Forschungsstrategie des ASTRA unter Berücksichtigung des Forschungs- und Beschaffungskonzepts für die neue mobile Grossversuchsanlage ([12] Partl und Caprez (2004)) ist ein auf die schweizerischen Bedürfnisse zugeschnittenes detailliertes Pflichtenheft zu erstellen und die darin aufgeführten Daten mit allenfalls in Frage kommenden Verkehrslastsimulatoren zu vergleichen.
3. Product-Screening
4. Kontaktaufnahme mit Herstellern und das Einholen von Offerten
5. Besichtigung und Beurteilung möglicher Verkehrslastsimulatoren vor Ort und Augenschein bezüglich Kompatibilität mit dem Pflichtenheft
6. **Vorentscheid:** Welches Produkt bzw. welche Produkte sollen in spezifischen Tests vor Ort bzw. im Werk weiterverfolgt werden?

Evaluation

7. spezifische Betriebstests und Funktionsdemonstrationen im Werk und anlässlich konkreter Feldeinsätze vor Ort
8. Beurteilung der Eignung für den Einsatz in der Schweiz, einschliesslich notwendiger Anpassungen und Modifikationen
9. **Entscheid:** Mit welchem Produkt bzw. welchen Produkten sollen praktische Pilotversuche zwecks Eignungstest in der Schweiz durchgeführt werden?

Praktische Pilotversuche in der Schweiz

10. Planung und Konzipierung:

Planung und Konzipierung von gezielten Versuchen zwecks Eignungsprüfung im Massstab 1:1 mit Blick insbesondere auch bezüglich struktureller Ermüdung des Belagssystems (Rissverhalten). Dazu soll das zu untersuchende Belagssystem mit entsprechenden Messsonden bestückt und untersucht werden.

11. Durchführen der Eignungsprüfung in zwei Schritten:

- praktische Erprobung und Funktionsdemonstration (Bedienung und Betrieb durch den Hersteller) an einem konkreten Beispiel und Durchführung ausgedehnter, praktischer Messungen am Standort des Herstellers
- Falls der erste Schritt befriedigend ausfällt, allfällige Anpassungen vornehmen und praktische Eignungstests durch Miete und Installation der Anlage in der Schweiz während mindestens zwei Monaten an einer geeigneten schweizerischen Teststrecke durchführen. Die Bedienung und der Betrieb erfolgt durch den Hersteller, doch werden die Versuche und Messungen durch die eigenen

Sachbearbeiter begleitet, um die Anlage auch seitens der praktischen Bedienerseite beurteilen zu können.

12. **Entscheid:** Falls die Eignungsprüfung erfolgreich ausfällt, Einleitung des üblichen Beschaffungsverfahrens (WTO-Ausschreibungsverfahren), ansonsten neue Lagebeurteilung

4 Vorevaluation

Bei der Realisierung dieser Vorgehensweise zeigte sich relativ rasch, dass die Auswahl möglicher Anlagen sehr limitiert war. In die engere Wahl gezogen wurden die FABAC Anlage (Fatigue du Béton Armé Continue), welche am Laboratoire Central des Ponts et Chaussées in Nantes-Bouguenais (F) entwickelt worden war (Abb. 4.1) sowie der unter Prof. Fred Hugo in Konstruktion und Entwicklung begriffene Mobile Load Simulator MLS10 an der University of Stellenbosch (Südafrika). Über die einzelnen Inspektionen wurden gesonderte Aktennotizen verfasst:

- [14] Aktennotiz zu Besprechungen und Besichtigungen der „Stellenbosch-Anlage“ MLS10 vom 13. bis 16. Januar 2006; Empa / ETH-IGT; Feb. 2006
- [12] Aktennotiz zu Besprechungen und Besichtigungen der „LCPC-Anlage“ FABAC vom 24. Februar 2006; Empa / ETH-IGT; März 2006

Die Beurteilungen, welche sich aus den Diskussionen und Beobachtungen während dieser Inspektionen ergaben, sind in den folgenden Abschnitten zusammengefasst wiedergegeben.

4.1 Besichtigung und Beurteilung der „Stellenbosch-Anlage“ MLS10

4.1.1 Allgemeines

Bei der sogenannten MLS10 Maschine handelt es sich um eine Grossversuchseinrichtung, welche an der Universität Stellenbosch von Prof. Fred Hugo und seiner Mannschaft bzw. weiteren Beteiligten entwickelt wurde. Die Funktionsweise der Anlage beruht auf dem ähnlichen Prinzip wie bei der kleineren MMLS3 (vgl. [4] Raab et al (2005)). Vier schienengeführte Belastungsschemel, die jeweils entsprechend einer halben Achslast mit Lastwagenreifen zur dynamischen Lastaufbringung bestückt und zu einer vertikal umlaufenden Kette zusammengekoppelt sind, werden unidirektional von elektromagnetischen Linearmotoren - ähnlich wie bei einer Kettensäge - kreisförmig angetrieben (Abb. 4.1). Diese Lasträder werden somit über die Prüfstrecke gezogen und sind nicht angetrieben. Der Kraftrahmen wird aus der Maschinenkonstruktion, die sich mit Eigengewicht und Ballasttanks auf der Strassenoberfläche abstützt, gebildet.

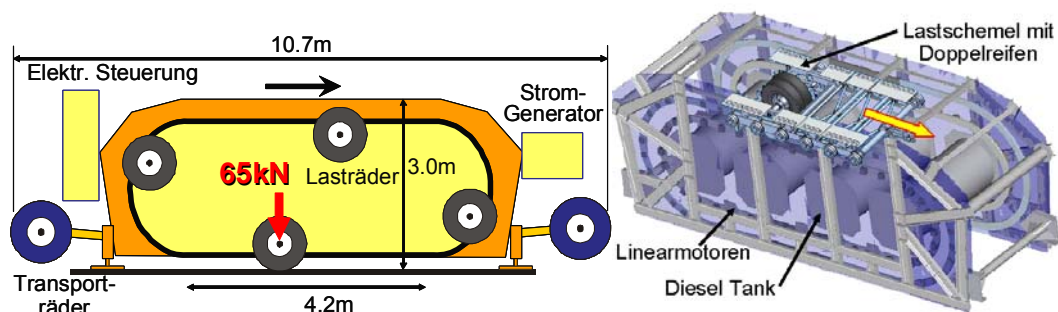


Abb. 4.1 Prinzip der MLS10

Die nachstehend beschriebene Beurteilung bezieht sich auf den aktuellen Stand der Entwicklung und des Baus der Maschine im Zeitpunkt des Augenscheins vor Ort durch

die Herren Partl und Caprez vom 13. bis 16. Januar 2006. Die Beurteilung umfasst die Punkte, welche zum damaligen Zeitpunkt besonders relevant erschienen. Viele prospektive Erwartungen und Angaben konnten zwar mehr oder weniger zuverlässig prognostiziert werden, jedoch war es zum damaligen Zeitpunkt nicht möglich, genaue Angaben über verschiedene Eigenschaften der Maschine zu machen, da diese noch nicht unter Betriebsbedingungen gefahren werden konnte.

4.1.2 Beurteilung

4.1.2.1 Zeitplan

Der Zeitplan, wie er einst festgelegt wurde und allen Beteiligten bekannt war, konnte und kann nicht eingehalten werden. In der untenstehenden Abb. 4.2 ist der geraffte Zeitplan aus dem Statusbericht der Forschungsstellen vom 25.6.2005 im Anschluss an die Sitzung beim ASTRA vom 17. Juni 2005 zur Vorbereitung eines Nutzerbeirates und Festlegung des weiteren Vorgehens bezüglich Auftragserteilung für das Projekt wiedergegeben.

Abb. 4.2 Tabelle aus „Status-Dokument“ vom 25.6.2005 betreffend Grossversuche zum Forschungsantrag ASTRA 2004/018“

Aug. 05.	Zusammenstellen von Bauteilen und erste Tests bei Firma Petrel & Stellenbosch
1 W. Sept 05	erste Funktions- und Abnahmeteste der kompletten MLS10 in Stellenbosch (gleichzeitig findet das unabhängige Audit durch staatliche Berater statt)
Bis Ende Sept.05	Fehlerbehebung und Optimierung während ca. 2..3 Wochen
1 W. Okt. 05	einsatzbereit in Mozambique
Bis Mitte Jan. 06	Durchführung des Versuchsprogramms in Mozambique
Ende Jan 06	bei Erfolg Transport in die Schweiz möglich
Feb 06...März06	bei Erfolg Pilotversuche in der Schweiz

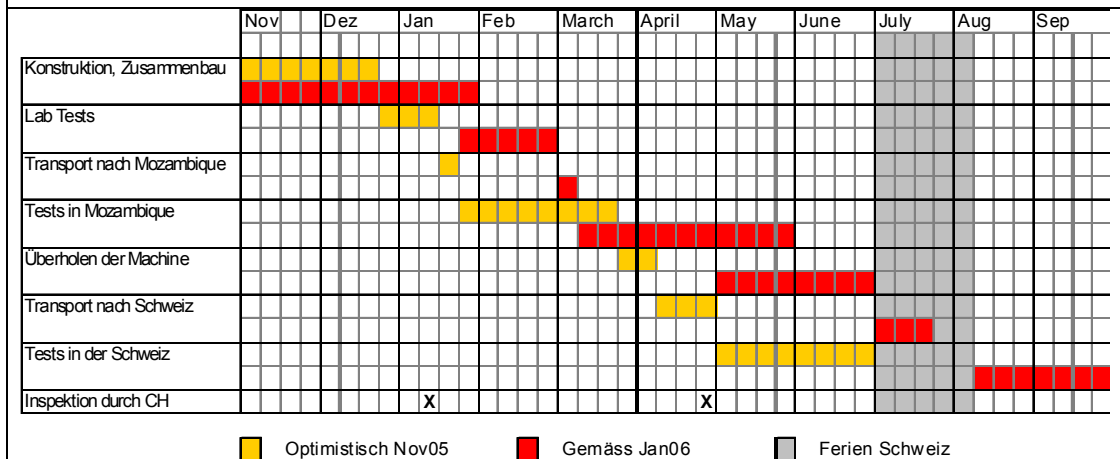
Die Maschinenhersteller hatten dannzumal ganz offensichtlich ein viel zu optimistisches Zeitbudget für die einzelnen Stages angenommen. Aufgrund der Inspektion vor Ort vom 13. bis 16 Januar 2006 ist anzunehmen, dass die Maschine frühestens im Laufe des Monats Februar für erste Funktionstests und für Nachbesserungen von unerwarteten und nicht projektierten Änderungen betriebsfähig sein wird.

Aufgrund der Einschätzung der Vertreter der Forschungsstellen war damit zu rechnen, dass die Maschine gegen Ende des Monats Februar oder im Verlaufe des Monats März 2006 operativ hätte werden können. Erst in diesem Stadium sollte die Maschine für die Beurteilung der Tauglichkeit auf ein zu prüfendes Versuchsfeld disloziert werden.

Da die Prämisse der Forschungsstellen klar davon ausgeht, dass ein Prototyp mit „Kinderkrankheiten“ nicht in Frage kommt, wird der erste Einsatz des Gerätes in einem afrikanischen Land vor sich gehen.

Für den Zeitplan würde dies heissen, dass mit einer Verfügbarkeit der Maschinen nicht vor September/Oktober 2006 gerechnet werden kann; immer unter den relativ optimistischen Annahmen, was die „Kinderkrankheiten“ anbelangt. Der wahrscheinlichste Zeitplan aufgrund der Angaben des Herstellers sieht wie folgt aus (Abb. 4.3):

Abb. 4.3 Zeitplan nach Angaben des Herstellers aufgrund der Inspektion vom 13 bis 16 Januar 2006



4.1.2.2 Kompetenzen der Beteiligten

Die Entwickler des Gerätes, dies sind vor allem Prof. Fred Hugo von der Universität Stellenbosch und seine Mitarbeiter, weisen eine grosse Kompetenz in der Entwicklung und in der Herstellung von Geräten dieser Art auf. Allerdings ist die Grösse des in Betracht stehenden Gerätes auch für die Entwickler eine neue Erfahrung. Die Bemessung und die dynamischen Berechnungen wurden von spezialisierten Ingenieuren vorgenommen. Anlässlich der Besprechungen, der Begehungen und Besichtigung konnten die Forschungsstellen den Eindruck gewinnen, dass die Leute die nötige Kompetenz aufweisen.

Allerdings ist aus der Erfahrung, insbesondere des IGT, mit so grossen, neuen Geräten klar zu stellen, dass Überraschungen, welche in der Projektierung und Herstellung nicht vorhersehbar oder zumindest nicht offensichtlich waren, eintreten können.

Manager

Prof. Fred Hugo ist ein ausgewiesener Experte in der Planung und im Management solcher Geräte. Grundsätzlich liegt sein Interesse in der Planung und Herstellung, aber auch in der wissenschaftlichen Anwendung solcher Geräte. Auf dem internationalen Parkett ist er bekannt für seine Geräte, vor allem der vorhergehenden Generation, des Model Mobile Simulators MMLS, welcher wesentlich kleiner ist und an der Empa bereits seit einigen Jahren vor allem zur Untersuchung von Fahrbahnübergängen eingesetzt wird. In den USA, insbesondere in Texas, hat Prof. Hugo seine Erkenntnisse in der ersten Phase des Baus des grossen Texas Model Load Simulators TxMLS umgesetzt. Prof. Fred Hugo arbeitet in verschiedenen nationalen und internationalen Gremien zum Thema mit. Er wird von Herrn Floris Petrus Johannes Müller unterstützt, welcher als erfahrener Entwickler mit guten prüftechnischen Kenntnissen gilt.

Entwickler

Bei den Entwicklern und Designern scheint vor allem der Part des Experten für die dynamische Bemessung von grosser Bedeutung zu sein, da Beschleunigungen in der Grössenordnung von 6 G auftreten. Gemäss Prof. F. Hugo wurden diese Berechnungen von zuverlässigen Ingenieuren durchgeführt. Die statische Bemessung und Entwicklung sowie die Erstellung der Werkstattzeichnungen wurden von Herrn Jan Andries Wium, welcher bei Prof. Badoux in Lausanne promoviert hat und Mitglied des SIA ist, durchgeführt.

Werkstatt

Das Gerät wird von der Firma PETREL, eine Unternehmung, welche Grossgeräte für die Nautik und andere mechanische Geräte herstellt, gebaut. Die Werkstatt macht einen se-

im Feld herauskristallisieren.



Abb. 4.6 elektrisch induzierte Linearmotoren

Elektrische Ausrüstung

Die elektrische Ausrüstung ist erst teilweise montiert. Der Hauptschrank zur Verteilung der elektrischen Energie sowie der Sicherungen und mit den nötigen Steuerelementen ist montiert und teilweise verdrahtet. Die elektrische Installation soll mit einer Arbeitsspannung von 440 Volt laufen. Das weicht von der standardisierten Versorgungsspannung von 230/400 Volt ab, wie sie in den festen Installationen (auch in Südafrika) angewendet wird. Der Grund für diese Abweichung ist, dass die Anlage besser ausgenutzt werden kann. Es ist den Autoren dieses Berichtes nicht bekannt, ob die Tatsache, dass eine höhere Versorgungsspannung installiert wird zu Abnahmeproblemen mit den entsprechenden Zulassungsbehörden führen könnte. Der Produzent der Anlage wurde darauf aufmerksam gemacht, dass er sich entsprechend erkundigt.

Die bis jetzt eingebaute elektrische Installation und die Kabelführung machen einen guten Eindruck. Die Techniker, welche die elektrischen Installationen unter der Leitung von Herrn Frans Modricky durchführen, scheinen über gute Kompetenzen zu verfügen.

Hydraulisch-pneumatische Ausrüstung

Es sind erst ansatzweise hydraulisch-pneumatische Installationen eingebaut. Es ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich, eine genauere Beurteilung vornehmen zu können. Ein spezielles Augenmerk erfordert die sorgfältige Verlegung der entsprechenden Versorgungsleitungen und die gute Fixierung der Elemente, um gegen die auftretenden Erschütterungen während des Betriebs der Maschine standhalten zu können.

Steuerung

Die Steuerung ist erst ansatzweise vorhanden. Sie kann noch nicht beurteilt werden.

4.1.2.4 Neuestes zum Stand der Arbeiten während der Berichterstattung

Seit der Inspektion durch die Forschungsstellen im Januar 2006 und während der Verfassung des Berichtes sind nach Angaben des Herstellers folgende Schritte erfolgt:

- partielles Aufbringen eines zusätzlichen Korrosionsschutzes
- komplette Montage des Gesamtsystems

Ein erster Testlauf fand im Werk am 14. Februar 2006 statt und verlief zufriedenstellend.

4.2 Besichtigung und Beurteilung der „LCPC-Anlage“ FABAC

4.2.1 Allgemeines

Die sogenannte FABAC (Fatigue du Béton Armé Continue), welche am Laboratoire Central des Ponts et Chaussées in Nantes-Bouguenais (F) entwickelt wurde, wurde von einer privaten mechanischen Werkstätte nach den Plänen des LCPC gebaut. Es wurden zwei baugleiche Anlagen hergestellt. Zum Zeitpunkt der Besichtigung befanden sich beide Anlagen nebeneinander auf der institutseigenen Versuchsstrecke des LCPC in Nantes-Bouguenais. Grundsätzlich wäre es möglich, eine Anlage für einen Versuch zu mieten und in die Schweiz zu transportieren.

Die Herren Partl und Caprez haben die FABAC-Maschinen am 24. Februar 2006 in Nantes-Bouguenais besichtigt und mit den Anwendern und Technikern der Anlage über die Einsätze sowie die gemachten Erfahrungen gesprochen. Die Maschine konnte vor Ort sowohl während des Stillstands als auch unter Betrieb besichtigt werden.

Die nachstehend beschriebene Beurteilung bezieht sich auf den aktuellen Zustand der Maschinen zum Zeitpunkt des Augenscheins vor Ort. Sie umfasst die Punkte, welche zum damaligen Zeitpunkt besonders relevant erschienen.

4.2.2 Beurteilung

4.2.2.1 Allgemeine Beurteilung

Die FABAC-Anlagen des LCPC sind vor ca. 10 Jahren gebaut worden. Mit den Anlagen wurden verschiedene Versuche durchgeführt. Ursprünglich wurden die Anlagen eingesetzt, um die Fugenbewegungen und das Fugenverhalten zwischen benachbarten Betonplatten und bei Rissen in kontinuierlich bewehrten Betonbelägen zu untersuchen. Die Maschinen haben sich gemäss Aussagen der Verantwortlichen nach der Behebung von anfänglichen „Kinderkrankheiten“ bewährt. In der Zeit nach der Entwicklung und dem Bau wurden verschiedene Änderungen und Anpassungen nötig und durchgeführt. Man kann davon ausgehen, dass es sich beim französischen FABAC um ein bewährtes „ausgereiftes“ Produkt handelt.

Bei der Besichtigung vor Ort konnten sich Partl und Caprez überzeugen, dass die Anlage Strukturrisse zu erzeugen vermag und damit augenscheinlich ein geeignetes Hilfsmittel zur praktischen Bearbeitung von Dimensionierungsfragen bei Asphaltoberbauten darstellt.

4.2.2.2 Zeitplan und Realisierung einer allfälligen Beschaffung von FABAC

Falls eine Beschaffung einer FABAC-Einrichtung ins Auge gefasst würde, würde das eine starke Verzögerung des Zeitplanes, wie ihn die Forschungsstellen ursprünglich ins Auge gefasst haben, bedeuten.

Es ist davon auszugehen, dass für Planung und Herstellung einer FABAC eine Zeit von 12 bis 18 Monaten beansprucht würde. Zwar könnte bei den Plänen auf die bestehenden Unterlagen und Maschinen des LCPC zurückgegriffen werden, trotzdem müssten Anpassungen und Modernisierungen neu geplant und entwickelt werden.

Das LCPC wäre grundsätzlich an einer Weiterentwicklung der FABAC interessiert und wäre bereit, Hand zu Synergien zu bieten (z.B. Up-dating der LCPC-eigenen Maschinen parallel zur Herstellung einer neuen Maschine für die Schweiz, das Einbringen bisheriger Erfahrungen).

Allerdings müsste gemäss Empfehlung des LCPCs die Frage des Herstellers neu angegangen werden. Dies ist nicht ganz risikolos, insbesondere auch bezüglich Zeitmanagement und Kosten sowie möglicher kleinerer neuer „Kinderkrankheiten“.

4.2.2.3 Kosten

Da es sich um die Entwicklung eines Prototyps handelt, die sukzessive zum heutigen Stand der Anlagen geführt hat und auf erheblichen Eigenleistungen des LCPC im Laufe der Jahre beruht, sind die Kosten schwer abzuschätzen und bilden im gegenwärtigen Zustand eine relativ grosse Unsicherheit. Aufgrund der Gespräche mit den Technikern des LCPC sowie der eigenen augenscheinlichen Beurteilung ist jedoch nicht zu erwarten, dass sich die Kosten wesentlich von jenen für die MLS10 Maschine von Fred Hugo unterscheiden. Genaue Auskünfte sind nur über konkrete Offerten von möglichen Herstellern erhältlich.

4.2.2.4 Erfahrungen mit der Anlage

Die beiden FABAC-Anlagen stehen seit nunmehr bald 10 Jahren in Betrieb. In dieser langen Zeit konnten viele Erfahrungen gewonnen werden. Die Verantwortlichen des LCPC haben eine ganze Anzahl Verbesserungen und Änderungen an den Maschinen vorgenommen. Insbesondere wurden Anpassungen in der Aufhängung der beweglichen Radachsen vorgenommen.

4.2.2.5 Maschine

Grösse und Gewicht

Abb. 4.7 vermittelt einen optischen Eindruck der Maschine. Das Gerät hat eine Masse von gegen 20 Tonnen. Die Grössen und Abmessungen entsprechen aber in etwa denjenigen der MLS10 von Fred Hugo.



Abb. 4.7 Bild der beiden FABAC-Maschinen. Im Inneren befinden sich die vier Belastungsräder mit dem Tarierungs-Rahmen. Deutlich sichtbar sind die unter Strassen-niveau tiefer gesetzten Gleitkufen.

Mechanische Ausrüstung

Die mechanische Ausrüstung mit den verschiedenen Laufrädern und Motoren etc. macht einen kompakten, guten Eindruck. Die FABAC besteht aus zwei steif konstruierten Rahmen (Abb. 4.8). Der innere Rahmen, an welchem die Belastungsräder aufgehängt sind, ist durch ein ausgeklügeltes System (Parallelogrammprinzip) am äusseren Rahmen beweglich aufgehängt und kann über einen pneumatischen Kolben tariert werden. Das System wurde entwickelt, um Unebenheiten der Strassenoberfläche ausgleichen zu können. Durch diese Konstruktion können die dynamischen Einflüsse infolge unebener Oberflächen begrenzt werden.

Die Belastungsräder werden nicht direkt angetrieben, sondern über eine Kette in einem Schmel gezogen (Abb. 4.9). Die Achsen der Belastungsräder sind mit Laufrädern ver-

sehen, die sich beim Belasten auf den Schienenflächen des Schemels abstützen und diesem entlang rollen (Abb. 4.9). Der Antrieb erfolgt mittels 30kW Elektromotoren, welche die Antriebskette antreiben. Zwischen die Elektromotoren und Antriebskette ist ein Eckgetriebe montiert. Mit diesem Getriebe kann die Geschwindigkeit auf die gewünschte Belastungsgeschwindigkeit angepasst werden. Die stark belasteten Laufräder sind mit Kunststoff überzogen, was sich ungünstig auf den Verschleiss, jedoch günstig auf die Lärmentwicklung auswirkt. Die FABAC erlaubt das Überrollen einer Lauffläche von 2m Länge. Davon wird für die Messung 1m (in der Mitte) als massgebend erachtet.

Die FABAC verfügt über kein eigenes Fahrwerk. Sie steht auf Gleitkufen, die eine Längsverschiebung ermöglichen, jedoch im gegenwärtigen Konstruktionszustand unter die Strassenoberfläche reichen, weshalb bei einem Feldeinsatz die zu prüfende Strasse in Längsrichtung entsprechend eingefräst werden muss. Änderungen der Konstruktion scheinen jedoch möglich. Für den Transport der Anlage muss das Gerät auf Lastwagen verladen werden. Das Gerät lässt in seiner jetzigen Ausrüstung auch keine laterale Verschiebung (Lateral Wandering) der Belastungsräder zu. Allerdings könnte diese Möglichkeit durch den Anbau von Schienen nachgerüstet werden. Als praktisch wird empfunden, dass die FABAC zum Auswechseln der Räder über einen integrierten Kran verfügt.

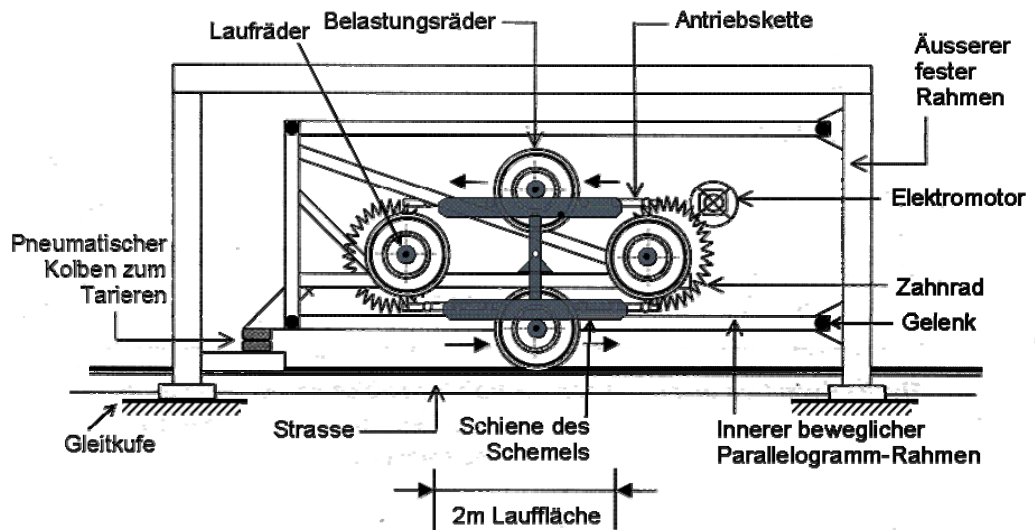


Abb. 4.8 Prinzipskizze der FABAC mit äusserem festen Rahmen und innerem beweglichen Parallelogramm-Rahmen einschliesslich Aufhängung und Antrieb der Belastungsräder



Abb. 4.9 Aufhängung der Belastungsräder mit Laufrädern, Schemel, Schiene des Schemels und Antriebskette

Elektrische Ausrüstung

Die elektrische Ausrüstung ist in einem Schaltschrank seitlich an der Anlage montiert. Die nötigen Elemente wie Anfahrstrombegrenzung, Sicherungen und Schalter sind im Schaltschrank untergebracht. Zusätzlich wurde später eine Sicherungseinrichtung rund um die gesamte Maschine installiert. Diese Sicherung führt zu einer Abschaltung der Belastungseinrichtung, sobald eine Verkleidungswand geöffnet wird.

Die elektrische Ausrüstung der FABAC enthält keinen Stromgenerator. Falls die Anlage nicht an einem bestehenden Netz angeschlossen werden kann, muss ein separater Generator vorgehalten werden.

Hydraulisch-pneumatische Ausrüstung

Die Radlasten werden durch pneumatische Kissen, welche an allen vier Ecken des Hauptrahmens der Anlage angreifen, gesteuert. Diese pneumatischen Be- und Entlastungseinrichtungen werden von einem gesteuerten Kleinkompressor angetrieben. An der Belastungseinrichtung wurden im Laufe der Versuche verschiedene Anpassungen gemacht. Die geänderte Belastungseinrichtung funktioniert gemäss Aussagen der Betreiber einwandfrei.

Steuerung

Die Steuerung der Anlage ist relativ einfach und pragmatisch aufgebaut. Die Anlage wird über einen Hauptschalter in Betrieb gesetzt und kann durch Notschalter an verschiedenen Stellen abgeschaltet werden. Grundsätzlich könnten verschiedene Steuerungselemente wie variable Geschwindigkeit, Belastungssensoren der Motoren usw. problemlos nachgerüstet werden.

Die technischen Angaben sind in Abb. 4.10 dargestellt.

Abb. 4.10 Technische Angaben zu FABAC Anlagen

<p>Technische Angaben:</p> <p>Länge: 11.20m Breite: 2.50m Höhe: 3.24m Gewicht: 173kN Leistung Motor: 50kW Last Doppelbereifung: 30...70kN Last grosse Einzelreifen: 30...45kN Rolllänge: 2m überrollte Messlänge: 1m Geschwindigkeit: 0.5...7km/h maximale Lastfrequenz: 50 Überrollungen/Minute wöchentliche Überrollzahl: 200'000...320'000</p> <p>Transport:</p> 	<p>Bezugspersonen beim LCPC:</p> <p>Division Matériaux et Structures de Chaussées ; Section Manège de Fatigue des Structures routières (MFSR) ; Route de Bouaye - BP 4129 - 44341 Bou- guenais Cedex Tél: 33 (2) 40 84 58 11 (59 23) Fax: 02 40 84 59 94</p> <p>Herr Jean-Maurice BALAY jean-maurice.balay@lcpc.fr tel +33 (0) 24084 5817</p> <p>Herr Jean-Pierre KERZREHO jean-pierre.kerzreho@lcpc.fr tel +33 (0) 24084 5858</p> <p>Herstellerfirma (gemäss Angaben LCPC):</p> <p>La Société de Matériels Techniques Industriels (SMTI) ;Route de Vergisson 71 960 PIERRECLOS - FRANCE Tel. 33 (0)3 85 35 71 70 – Fax. 33 (0)3 85 35 73 76 smti.pierreclos@machinespeciale.fr</p> <p>Gemäss Angaben aus dem Internet gilt jedoch: De- puis le 13-04-2007 Clôture pour insuffisance d'actif http://www.societe.com/cgi- bin/recherche?rnscs=318166055&vu=1</p>
--	---

4.3 Vorentscheid bezüglich MLS10 und FABAC

4.3.1 Vergleichende Bewertung

Die FABAC-Versuchsanlage des LCPCs ist eine bewährte Einrichtung, welche aufgrund von Erfahrungen im Einsatz mit den nötigen Verbesserungen nachgerüstet wurde. Die Technik ist weniger modern als diejenige der MLS10 aus Südafrika. Die maximale Anzahl Überrollungen pro Zeiteinheit und die überrollte Lauffläche ist geringer. Dafür ist der Fragenkomplex der dynamischen Bemessung besser abgeklärt. Für die Modernisierung der elektrischen Steuerung und anderer Komponenten müsste ein nicht allzu grosser Aufwand betrieben werden. Probleme könnte die Lösung der Frage des Herstellers bieten. Der Zeitaufwand für die Beschaffung einer neuen FABAC scheint in der Grössenordnung von 12 bis 18 Monaten zu liegen.

Abb. 4.11 vergleichende Bewertung wichtiger Punkte von MLS10 und FABAC

Merkmal/Kriterium	MLS10	FABAC	Vorteil für
Prototyp	ja, aber ausgiebige Einführungstests in Mozambique geplant (> 3.0 mio Zykl)	ja, aber 10 Jahre bewährt	FABAC ++
Mobilität im Testgelände	selbstfahrend	Gleitkuven vertieft unter Fahrbahn erfordern konstruk. Modifikation	MLS10 +
Transport	Tieflader; mit Rampe selbstfahrend	Tieflader mit Kran	MLS10 +
Gewicht	32t (urspr ca 20t), Inkl. Generator und Dieseltanks	17.2t	FABAC +
Höhe	3.3m	3.24m	=
Breite	2.4m	2.5m	=
Länge	10.7m	11.2m	=
Überrolllänge	4.2m	2m	MLS10 +
max. Belastungsgeschwindigkeit	22km/h	7km/h	MLS10 ++
Anzahl unidirektionale Belastungen / Stunde	6000	3000	MLS10 ++
Maximale Rad-Last	65kN	70kN	FABAC +
seitl. Spurbewegung (lateral Wandering)	±400	nein, konstruktive Modifikation möglich	MLS10 +
Doppel- & Einzelreifen?	ja	ja	=
Hersteller	definiert	nicht mehr existent, daher sehr unsichere Lieferzeit	MLS10 ++
Unterhalt in Europa	unsicher, da noch nicht definiert	ja, (vermutlich wegen LCPC)	FABAC +
Kosten	definiert	unsicher, da Prototyp	MLS10 +

4.3.2 Folgerung

Aufgrund der in Abb 4.11 aufgeführten Punkte sowie den Besichtigungen der beiden Anlagen vor Ort wird folgendes empfohlen:

- Das gegenüber der FABAC modernere Konzept der MLS10 bietet trotz gewisser Unsicherheiten klare Vorteile. Daher sollte die Phase der Evaluation mittels spezifischer Betriebstests, Funktionsdemonstrationen und konkreter Feldeinsätze an der MLS10 durchgeführt werden.
- Falls Preis und Verhalten der MLS10 zu befriedigen vermögen, sollte die MLS10 angeschafft werden. Falls sich konstruktive Mängel an der MLS10 zeigen, kann grundsätzlich auf die FABAC ausgewichen werden. Allerdings ist dann die Frage des Herstellers und die Notwendigkeit geeigneter Anpassungen sorgfältig zu prüfen.

Letzteres gilt unter dem Vorbehalt, dass sich anlässlich der durchzuführenden WTO-Ausschreibung keine anderen vorteilhafteren Lösungen ergeben.

5 Evaluation

5.1 Funktionsdemonstration der MLS10 Maschine in Mozambique

5.1.1 Allgemeines

Die hier beschriebene Funktionsdemonstration in Mozambique bezieht sich auf den aktuellen Zustand der Maschine zum Zeitpunkt des Augenscheins auf Versuchsfeldern in Mozambique durch die Herren Partl und Caprez vom 21. bis 25 Juni 2006. Bis zu diesem Datum wurden mit der Maschine verschiedene Versuche mit insgesamt über einer Million Lastzyklen in Stellenbosch und in Mozambique bei Manhica, ca. 80 km nördlich von Maputo, gefahren. Die Versuchsfelder bei Manhica befanden sich auf der zentralen Verbindungsstrasse, welche Mozambique von Süden nach Norden erschliesst. Eine detaillierte Beschreibung, Resultate für die Versuchsfelder in Mozambique sowie weitere diesbezügliche Literaturangaben finden sich bei [5] Hugo et al (2008).

Die Maschine war zwar fertig gebaut und einsatzfähig, trotzdem wurden laufend noch verschiedene, kleinere Verbesserungen getätigt. Dies war auch grundsätzlich die Idee der Probeläufe unter Praxisbedingungen. Solche Anpassungen wurden in einer gesonderten, detaillierten Aktennotiz zu diesem Besuch zwar aufgeführt, der definitive Erfolg konnte aber naturgemäss während des Augenscheines nicht festgestellt werden.

Die Maschine stand zu dieser Zeit auf dem zweiten Versuchsfeld im Einsatz. Die Anzahl der Überfahrten, bzw. der Achslasten, welche von der Maschine bis dann auf dem Feld gefahren wurden, betragen einige hunderttausend mit Radlasten von 50...60kN, was Achslasten von 10 bis 12 Tonnen entspricht.

Die nachstehend beschriebenen Feststellungen und Beurteilungen beziehen sich auf den aktuellen Zustand der Maschine zum Zeitpunkt des Augenscheins vor Ort, wie sie in der erwähnten Aktennotiz aufgeführt wurden. Sie umfassen die Punkte, welche zum damaligen Zeitpunkt besonders relevant erschienen.

5.1.2 Versuchsfelder

Die Versuchsfelder, auf welchen die MLS10 Maschine in Mozambique eingesetzt wird, dienen der staatlichen Strassenbauverwaltung zur Evaluation einer ökonomischen Struktur. Die ursprüngliche Dimensionierung der Standardbauweise für hochbelastete Strassen entstammt der ehemaligen portugiesischen Bauweise: Foundationstragschicht aus ca. 200mm stabilisiertem, gelbem Sand, PC-stabilisiert mit 7% Zement, und darüber eine ca. 40mm dicke Asphaltdecke (Abb. 4.12 a)). Der zementstabilisierte Sand ist in diesen Gegenden, wo natürlicher Kiessand Mangelware ist, häufig eingesetzt. Der neu zu prüfende Aufbau besteht aus einer Foundationstragschicht aus ca. 200 mm stabilisiertem, rotem Sand, PC- und kalkstabilisiert mit 2.5% Zement und 2.5% Kalk und darüber eine ca. 40mm dicke Deckschicht aus Asphalt. Beide Aufbauten liegen auf einem gut tragfähigen Planum. Die alternative Bauweise würde erhebliche Ersparnisse generieren.

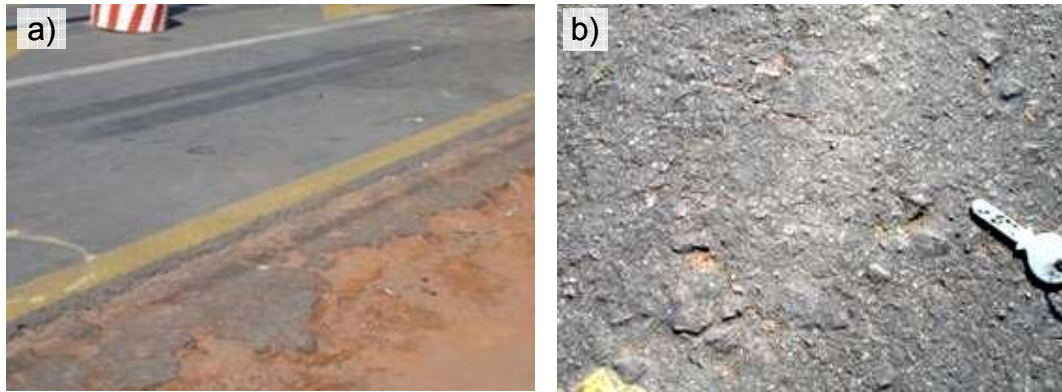


Abb. 4.12 a) Versuchsfeld 1 nach Belastung mit MLS10 mit Reifenspuren; b) Detail mit Rissen in Deckschicht quer zur Fahrtrichtung

Mit der MLS10 konnten die realen, strukturellen Eigenschaften dieser beiden Aufbauten sehr eindrücklich gezeigt werden. Insbesondere war es möglich, in den Versuchsfeldern Risse in der Deckschicht zu erzeugen (Abb. 4.12 b)) sowie Spurbildungen von mehreren Millimetern. Abb. 4.12 a) zeigt die Spuren der Doppelbereifung nach der Belastung des Versuchsfeldes 1. Die Länge der Spuren - und somit die Kontaktlänge - beträgt 4.3m und die Doppelspurbreite 62cm.

Die Maschine wurde bei beiden bisher untersuchten Versuchsfeldern typischerweise mit folgenden Achslastzahlen eingesetzt:

- 400'000 Achslasten bei trockener Fahrbahn
- 150'000 Achslasten bei nasser Fahrbahn (dauernde Bewässerung mit Wassersprüher)



Abb. 4.13 nasse Prüfung: a) Installation der Wassersprüher, b) Überrollvorgang

5.1.3 Betrieb der Maschine

Die Maschine wird von 3 bis 5 Leuten der Universität Stellenbosch in Betrieb genommen und gewartet. Diese Mannschaft ist in der Lage, Schwachstellen oder verbesserungswürdige Punkte zu orten und zu reparieren. Verschiedene Anpassungen, Kalibrierarbeiten und Verbesserungen konnten vor Ort vorgenommen werden.

Das für den Generator benötigte Dieselöl wird in drei der ursprünglich als Wassertank konzipierten Querversteifungsrohre gefüllt (Abb. 4.14). Dadurch kann ein langandauernder Betrieb ermöglicht werden. Ein Tank wird nach wie vor als Wassertank benützt, z.B. für die Prüfung mit Sprühwasser.



Abb. 4.14 *Wartung durch Mechaniker (Hydraulik für den Radanpressdruck) im Arbeitsraum unter der ca. 1m hydraulisch angehobenen und durch feste Stahlstützen gesicherten Maschine*

5.1.4 Relevante Punkte und Fragen zur Maschine

Anlässlich des Augenscheins wurden folgende Punkte thematisiert und den Herstellern zur Stellungnahme unterbreitet

- Verschleissteile und Wartungsplan (Laufflächen der Führungsräder der Belastungsschemel sowie der Führungsschiene, Elektromotoren, Ventilatoren, Langzeitversagen von Leitungsbriden, Dichtungen, Schmierung etc.)
- Treibstoffverbrauch
- Anzahl und Kompetenz des Bedienpersonals
- Lateral Wandering
- Transportierbarkeit
- Sicherheitselemente (Sicherheitsstützen, Notstopp, Blockierung der Belastungsschemel bei Wartung, etc.)
- Lärmquellen (Generator, Stahl-Führungsräder der Belastungsschemel auf Führungsschienen, Vibrationen der Seitenabdeckungen, etc.)
- Baupläne
- Pläne für die Elektronik
- Stromlaufpläne
- Software und Updates
- Lastkalibration
- Manövrierfähigkeit und Motorenstärke (Selbstfahrmodus mit Steuerung)
- Konzept Reifenwechsel
- korrosionsanfällige Teile und Spritzwasserabdeckung
- Zugänglichkeit der höhergelegenen Maschinenteile
- Stromversorgung der Belastungsschemel mit den Reifen
- Horizontalschub
- Super Singles
- Schulung und technische Einarbeitung

Der Lärm, welcher von der Maschine unter Vollast und bei Maximalgeschwindigkeit erzeugt wird, beträgt in unmittelbarer Nähe und im Abstand bis 5 Metern mehr als 100 dB. Dies schränkt den Einsatz der MLS10 in überbautem Gebiet und in der Nähe von Ortschaften wesentlich ein.

Es wurde mit den Herstellern die Notwendigkeit diskutiert, Lärmschutzmassnahmen zu ergreifen. Neben der Möglichkeit von Auskleidungsmassnahmen wurde die Notwendigkeit einer Einhausung erörtert, wobei sich hier das Problem des Hitzestaus und der beschränkten Platzverhältnisse stellt.

5.1.5 Beurteilung

5.1.5.1 Zeitplan

Zusätzlich zu den Bemerkungen in der Aktennotiz vom Februar 2006 unter Kapitel „Zeitplan“ kann folgendes festgestellt werden: Zum jetzigen Zeitpunkt - Juni 2006 - ist die Maschine einsatzbereit und operativ. Die Zeitverzögerung gegenüber des ursprünglichen Zeitplans hat zu Verbesserungen in der Konstruktion der Anlage, zur Behebung von „Kinderkrankheiten“ und zu gewünschten, eingehenden Kalibrierarbeiten geführt.

Der heutige Stand der Arbeiten lässt den Schluss zu, dass die Maschine nach Abschluss der Forschungsarbeiten in Mozambique, das ist gegen Mitte August 2006, für weitere Einsätze operativ sein wird. Für einen allfälligen Einsatz in der Schweiz wäre die Anlage unter Einrechnung eines Monats Transportzeit und eines halben Monats Wartung und Verbesserung ca. Anfang Oktober einsatzbereit; immer unter relativ optimistischen Annahmen, was die „Kinderkrankheiten“ anbelangt.

5.1.5.2 Kompetenzen der Beteiligten

Die Kompetenzen der beteiligten Entwickler, Erbauer und Betreiber im Ersteinsatz des Gerätes wurden bereits in der Aktennotiz vom Feb. 2006 dargelegt. Es kann wiederholt werden, dass alle Beteiligten über eine grosse Kompetenz und die nötige Sachkenntnis verfügen.

5.1.5.3 Maschine

Grösse und Gewicht

Die Abb. 4.15 gibt die optischen Eindrücke der Maschine. Das Gerät wiegt im jetzigen einsatzbereiten Zustand 29 Tonnen. Im Endzustand wird das Gerät noch eine bis zwei Tonnen mehr wiegen, wenn die Einrichtung für die laterale Verschiebung und allenfalls weitere Elemente angebaut werden. Die Grössen und Abmessungen können der Prinzipskizze entnommen werden.



Abb. 4.15 MLS10 im Einsatz in Mozambique

Mechanische Ausrüstung

Wie bereits im ersten Bericht zur MLS10, Aktennotiz zu Besprechungen und Besichtigungen der „Stellenbosch-Anlage“ vom Feb. 2006, dargelegt, macht die mechanische Ausrüstung, dazu gehören die verschiedenen Laufräder sowie die Motoren etc., einen guten Eindruck. Die Belastungsräder werden nicht direkt angetrieben, sondern in einem Schemel (engl. Bogie=Laufwagen bzw. Lastschemel) gezogen (vgl. Abb. 4.1, Abb. 4.4 und Abb. 4.5). Der Rahmen mit den Wasser- bzw. als Dieselöltanks konzipierten Quer- versteifungsrohren macht im Betriebszustand unter Vollast und voller Geschwindigkeit (7.2m/s) einen sehr stabilen Eindruck.

Der Antrieb der Belastungsschemel erfolgt mittels elektrisch induzierten Linearmotoren, eine moderne Art des Antriebs, welche viele Vorteile aufweist. Die Kühlung der Antriebsteile wurde gut gelöst. Die Versuche haben gezeigt, dass diese Art des Antriebes mittels der elektromagnetischen Linearmotoren sehr effizient in der Nutzung der Energie ist. Die Kühlung ist deshalb eher überdimensioniert.

Die MLS10 ist mit einem Selbstfahrssystem ausgerüstet, mit welchem sie über eine Rampe selbständig sowohl auf ein Transportfahrzeug hinauffahren als auch am Testort herummanövriert werden kann. Der Motor ist eher unterdimensioniert, und der Wende-kreis ist noch zu gross. Entsprechende Anpassungen sind vorgesehen.

Die Führungsschienen für die Belastungsschemel werden besonders in den Umlenkpunkten beschleunigungsbedingt stark beansprucht. Nach über 1 Million Lastzyklen konnte kein sichtbarer mechanischer Verschleiss auf den Laufflächen der Führungsschienen festgestellt werden. An der Optimierung der Schmierung wird noch gearbeitet.

Für Wartungsarbeiten, aber auch zur Durchführung von Messungen, wird die Maschine hydraulisch um ca. 1m angehoben, durch feste Stahlstützen gesichert und seitlich stabilisiert. Das Montieren dieser Sicherheitsstützen ist etwas aufwendig und kann nur mit Mühe von einer Person bewerkstelligt werden. Hier wird noch nach einer bedienerfreundlicheren Lösung gesucht.

Elektrische Ausrüstung

Die elektrische Ausrüstung ist zur Hauptsache in zwei Elektroschränken am Heck der Anlage montiert. Die elektrische Installation wird mit einer Arbeitsspannung von 440 Volt betrieben. Das weicht von der standardisierten Versorgungsspannung von 230/400 Volt ab, wie sie in den festen Installationen (auch in Südafrika) angewendet wird. Der Grund für diese Abweichung ist, dass die Anlage besser ausgenützt werden kann. Es ist den Autoren dieses Berichtes nicht bekannt, ob die Tatsache, dass eine höhere Versorgungsspannung installiert wird, zu Abnahmeproblemen mit den entsprechenden Zulassungsbehörden in der Schweiz führen könnte. Der Produzent der Anlage wurde darauf aufmerksam gemacht, dass er sich entsprechend erkundigt.

Die elektrische Installation und die Kabelführung machen einen guten Eindruck. Die einzelnen Elemente sind übersichtlich und zweckdienlich montiert und angeschrieben. Es ist aber sicherzustellen, dass sich bei allfälligem, alterungsbedingtem Versagen der elektrischen Kabelbriden die Kabel der bewegten Teile nicht verheddern können. Zudem bleibt noch sicherzustellen, dass die zugehörigen Stromlaufpläne mit den bezeichneten elektrischen Elementen auch sorgfältig gefertigt werden.

Hydraulisch - pneumatische Ausrüstung

Die hydraulisch-pneumatischen Installationen gehören mit zu den heikelsten Teilen dieser Anlage. Die Bemessung, Konstruktion und Fertigung dieser Anlagen sind für eine realistische Belastung der Versuchsräder verantwortlich. Die Radlasten müssen gleichmässig und ohne Stösse aufgebracht werden können. Durch die grosse Dynamik, welche während des Betriebs dieser Maschine herrscht, ist das Bemessen der Aufhängung und die Belastung der Räder eine grosse Herausforderung. Gemäss der jetzt möglichen Beurteilung wurde diese Aufgabe sehr gut gelöst. Während des Betriebes auf den Ver-

suchsfeldern zeigten sich einige Dinge an den Aufhängungen, welche geändert oder angepasst werden mussten. Die bewegten Elemente machen den Eindruck, dass sie gut für den Widerstand gegen die dynamischen Einflüsse beim Betrieb der Maschine ausgerüstet sind. Die bewegten Belastungsschemel sind mit Drucksensoren für das Messen des hydraulischen Druckes der Belastungszylinder ausgerüstet. Die Signale werden drahtlos auf den stationären PC übertragen, damit die Krafteinwirkung auf die Belastungsachsen gemessen werden kann. Die dafür erforderliche lokale Stromversorgung auf den beweglichen Teilen ist noch zu verbessern.

Steuerung

Die Steuerung ist ein in sich geschlossenes Element, welches sich in einem eigenen Schaltschrank befindet. Offenbar funktioniert diese gut, zumal bis jetzt keine Ausfälle oder Anomalitäten festgestellt wurden. Die Steuerung kann mittels eines kleinen Bedienteils ausserhalb der Maschine erfolgen. Es können Anfahr-, Stopp- und Geschwindigkeit der Linearmotoren geregelt werden.

Lärmentwicklung

Die Lärmentwicklung des Gerätes ist enorm hoch. Die Belastung der Umgebung ist bis in eine Entfernung von schätzungsweise 500m für Arbeitsplätze oder Wohnungen unzumutbar. Das Lärmproblem scheint uns eines der zentralen Probleme zu sein, welche noch gelöst werden müssen. Ob dies durch Einhausung oder durch andere Massnahmen bewerkstelligt werden kann, ist uns nicht bekannt. Eine Lösung ist noch nicht in Sicht.

5.1.5.4 Folgerungen und weiteres Vorgehen

Der Besuch in Mozambique hat generell eine positive Beurteilung der Maschine ergeben. Es handelt sich um ein Gerät das - obwohl ein Prototyp - offenbar die zugeordneten Funktionen erfüllt und nach einer Erprobungsphase von mehreren Wochen, bzw. über einer Million Lastzyklen, in einem Zustand vorgefunden werden konnte, in dem die grössten „Kinderkrankheiten“ als ausgeremert gelten können und zumindest im kurzzeitigen Betrieb eines Pilotversuches in der Schweiz keine „bösen“ Überraschungen mehr erwartet werden dürfen.

Einziger negativer Punkt bezüglich Anwendung in der Schweiz ist die Lärmproblematik, wo noch nach Lösungen zu suchen ist. Wir haben den Hersteller darauf hingewiesen, dass uns dieser Punkt neben der technischen Funktionalität ein grosses Anliegen ist.

Unter der Voraussetzung, dass auch die weiteren Versuche in Mozambique hinsichtlich Betrieb und Funktionsweise erfolgreich verlaufen und die notwendigen Anpassungen (Ausmerzen weiterer „Kinderkrankheiten“) sowie die Behandlung der unter 4.3.4 aufgeführten relevanten Punkte zufriedenstellend erfolgt oder verbindlich zugesichert wird, empfehlen wir die temporäre Überführung der Maschine in die Schweiz zur Durchführung der im Projekt vorgesehenen Pilotversuche zur Abklärung der funktionellen Eignung der Maschine unter den hiesigen Bedingungen. Diese Pilotversuche können nach heutigem Stand der Erkenntnisse ab Oktober 2006 durchgeführt werden. Bis zu diesem Datum ist eine geeignete Versuchsstrecke in der Schweiz zu definieren.

5.2 Lärmschutzverkleidung: Inspektion und Messungen in Johannesburg

5.2.1 Allgemeines

Die dritte Überprüfung des Standes der Entwicklung und des Baus sowie der Einsatzbereitschaft der Maschine durch die Herren Partl und Caprez bezieht sich auf den aktuellen Zustand der Maschine im Zeitpunkt des Augenscheins vom 31. März bis 5. April 2007. Bis zu diesem Datum wurden mit der Maschine verschiedene Versuche mit insgesamt über drei Millionen Lastzyklen in Stellenbosch und auf verschiedenen Versuchsfeldern in Mozambique, ca. 80km nördlich von Maputo, gefahren.

Da der Lärm, welcher in Mozambique von der Maschine unter Vollast und bei Maximalgeschwindigkeit erzeugt wurde, mehr als 100 dB in unmittelbarer Nähe und im Abstand bis 5m betrug und dies den Einsatz der Maschine in überbautem Gebiet und in der Nähe von Ortschaften wesentlich einschränken würde, wurde anlässlich der letzten Inspektion in Mozambique mit den Herstellern die Notwendigkeit diskutiert, Lärmschutzmassnahmen zu ergreifen. Neben der Möglichkeit von Auskleidungsmassnahmen wurde die Notwendigkeit einer Einhausung diskutiert, wobei sich hier das Problem des Hitze-staus und der beschränkten Platzverhältnisse stellen könnte. In der Zwischenzeit haben die Hersteller der Maschine dieses Problem in Angriff genommen.

Der hier beschriebene Augenschein und die Lärmmessungen erfolgten auf dem Werkge-lände der Konstruktionsfirma LMT (Land Mobility Technologies) <http://www.lmt.co.za/website.swf> in Pretoria. Er war notwendig, die Wirksamkeit der Lärmschutzmassnahmen sowie die Liste der Fragen und Pendenzen hinsichtlich der be-sprochenen Änderungen und Anpassungen hinsichtlich eines Transportes für die prakti-schen Eignungstests und Pilotversuche in der Schweiz durchzuchecken.

Im Sitzungszimmer der Firma LMT fanden eingehende Besprechungen aufgrund einer Check-Liste, welche Partl/Caprez vorbereitet hatten, mit aktuellen Fragen zu Fertigstel-lungsterminen, Art und Stand der Lösungen, Qualität und Details zu Verpackung und Versand der Maschine statt. Die Resultate dieser Besprechung sind detailliert in der er-wähnten Aktennotiz tabellarisch wiedergegeben. Im folgenden wird nur auf die Lärm-schutzmassnahmen und die Lärmmessungen eingegangen, die von den Forschungsstel-len an der noch nicht fertig eingekleideten Maschine vorgenommen wurden.

Es war erst eine Seite mit den vorgesehenen Lärmschutzpanelen und den Dämmatten verkleidet. Dies hatte den Vorteil, dass die Wirksamkeit der Lärmschutzmassnahme (mit und ohne) in vergleichbarer Weise erfasst werden konnte. Da die Maschine noch nicht vollständig eingekleidet war, konnten aber die endgültigen Lärmeigenschaften der Ma-schine nicht in vollem Umfang erfasst werden.

5.2.2 Lärmmessung

5.2.2.1 Lokalität und Messmittel

Die Lärmmessungen erfolgten auf dem Werksgelände der Firma LMT Holdings, welche anstelle von Petrel künftig für den Bau weiterer Maschinen zuständig sein wird. Der Standplatz der Maschine war von ein- bis zweistöckigen Backsteinbauten, teilweise in weniger als 12m Entfernung, umgeben. Damit wurde eine besiedelte Situation simuliert, welche auch gewisse gebäudeseitige Reflektionen zulässt. Der Boden war abschüssig und mit Betonformsteinen gepflastert (Abb. 4.16).



Abb. 4.16 Situationsübersicht mit Werksgebäuden. Die linke Vorderseite der Maschine wird gerade verkleidet. Die Oberseite ist abgedeckt, und vorne am Boden liegt ein Element mit Lärmschutzmatte zur Montage bereit.

5.2.2.2 Messobjekt, Randbedingungen

Um noch allfällige Anpassungen für die definitive Lösung vornehmen zu können, aber auch aus terminlichen Gründen, wurde die MLS10 für die Messungen anlässlich der Inspektion provisorisch mit einem Lärmschutz versehen. Durch das Provisorium waren drei Seiten und die Oberseite isoliert, d.h. die Hinterseite und rechte Seitenfläche der Maschine vollständig, die Frontseite und Oberseite nur teilweise, und die linke Seitenfläche blieb noch offen. Letzteres erlaubte den direkten Vergleich des Effektes mit und ohne Massnahme. Allerdings war nicht auszuschliessen, dass dadurch Reflektionen bei ca. 30m entfernten Nachbargebäuden sich mit den Messdaten ungünstig überlagerten. Auch war festzustellen, dass einerseits die Lärmschutzmatten nur provisorisch als Abdeckung der Oberseite aufgebracht wurden und noch nicht wie vorgesehen an die Unterseiten der Deckplatten geklebt waren und andererseits auch die diversen Isolations-spalten an den Kanten noch nicht optimal geschlossen waren. Somit konnte davon ausgegangen werden, dass nach vollständiger Einhausung noch eine gewisse Verbesserung der Wirkung erzielt werden kann. Mit der vollständigen Einhausung wird die Breite der Maschine 2.55m betragen (Abb. 4.17 a)).

Für die Lärmessungen war die MLS10 wegen der Revisionsarbeiten betrieblichen Einschränkungen unterworfen. Wegen der Umprogrammierung der Software und Anpassung der Steuerung auf die neue maximale Überrollgeschwindigkeit von 6.1m/s, war mit der vorhandenen Steuerung nur eine maximale Geschwindigkeit von 5.1m/s und durch manuelle „Klimmzüge“ eine solche von ca. 5.7m/s möglich. Eine weitere Einschränkung bestand darin, dass die MLS10 wegen Revision des eigenen Generators mit einem externen Generator betrieben wurde (Abb. 4.17 b)). Es wurde festgestellt, dass die Maschine, inkl. Lärmschutz, die Breite von 2.55m nicht überschreitet. Dies ist für den Betrieb in der Schweiz von Bedeutung.

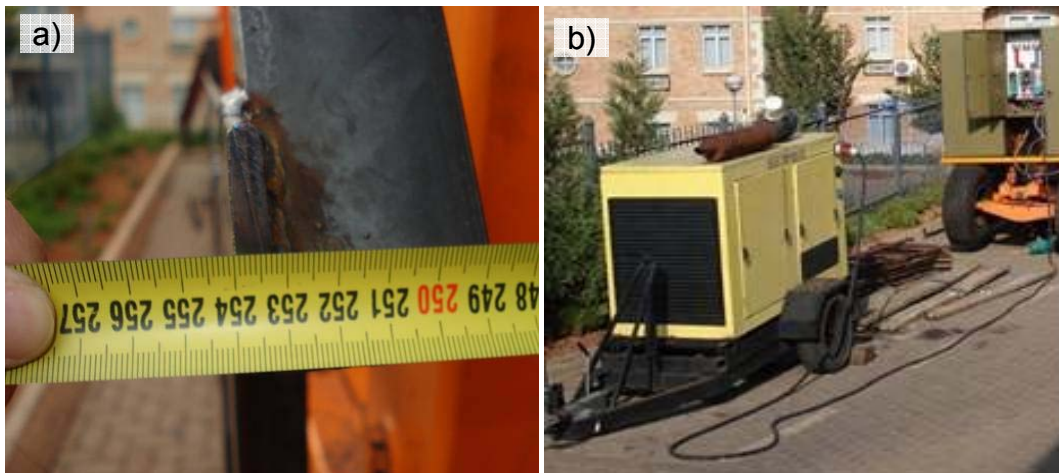


Abb. 4.17 a) Messung MLS10 Breite; b) externer Generator

5.2.2.3 Messgeräte

Die Messungen erfolgten mit einem Empa-eigenen, integrierenden Impuls Sound Level Meter der Firma Bruel & Kjaer Typ 2226 (Empa Nr. M21807), welches zuvor an der Empa ordnungsgemäss kalibriert worden war. Das Gerät erlaubt sowohl die schnelle dB(A) Messung (fast mode) durch Ermittlung eines Maximalwertes als auch die Bestimmung des 60s Leq Wertes (letzterer wurde als massgebend erachtet).

Zusätzlich zur Empa-Messung wurden parallel auch noch durch den Hersteller Lärmmessungen mit einem eigenen Gerät durchgeführt.

5.2.3 Messkonzept und Messraster

5.2.3.1 Messkonzept

Die Messungen wurden auf einer Höhe von 1.2m, bzw. im ersten und im zweiten Stock der Werksgebäude der Firma LMT durchgeführt (Abb. 4.18).

Folgende Messkampagnen wurden durchgeführt:

Messkampagne 1: mit Metallverkleidung der rechten Seitenfläche; ohne Gummischurz und Verkleidung von Hinter-, Front- und Oberseite sowie mit freier linker Seitenfläche, Geschwindigkeit 5.1m/s

Messkampagne 2: mit provisorischer, vollständiger Verkleidung der Hinterseite und der rechten Seitenfläche (inkl. Polsterung mit Lärmschutzmatten sowie Gummischurz), der teilweisen Verkleidung der Front- und Oberseite sowie mit freier, linker Seitenfläche, Geschwindigkeit 5.1m/s

Messkampagne 3: wie 2., aber mit ca. 5.7m/s (manuelle Einstellung)



Abb. 4.18 links: Messung in Messachse D in 7.5m Entfernung; rechts: Messung aus dem zweiten Stock des Werksgebäudes

5.2.3.2 Messraster

Als Basis für die Messung diente ein definiertes Messraster (Abb. 4.20). Bei allen Messkampagnen wurde in der Achse D gemessen. Im Falle der Messkampagne 2, wurden in den Messachsen A, B, C, D und F Messungen vorgenommen. Aus Zeit-gründen, aber auch wegen Hindernissen (parkierte Lastwagen, Gartenzaun etc.), konnten nicht alle geplanten Messpunkte des Rasters erfasst werden. Angegeben ist die Numerierungssystematik der Messpunkte sowie der Status der Lärmschutzmassnahme an der MLS10.

5.2.3.3 Resultate der Lärmmessung

Die Resultate der Lärmmessungen sind in Abb. 4.19 und Abb. 4.20 angegeben. Eine Gegenüberstellung der Werte in Messachse D enthält Abb. 4.21. Wie ersichtlich konnte bei einer Überrollgeschwindigkeit von 5.1m/s auf dem Boden mit Betonformsteinpflasterung durch die blosse Blechverkleidung der rechten Seitenfläche bei der Messkampagne 1 in 2m Abstand eine Reduktion des 60s Leq Wertes um ca. 4dB(A) auf neu 99dB(A) erreicht werden. In der bebauten Umgebung des Werksareals wurde in 7.5m Entfernung eine weitere Abnahme um 5dB(A) auf 94 dB(A) festgestellt.

Mit provisorischer, vollständiger Verkleidung der Hinterseite und der rechten Seitenfläche (inkl. Polsterung mit Lärmschutzmatten sowie Gummischurz) sowie teilweiser Verkleidung der Front- und Oberseite, jedoch mit freier linker Seitenfläche gemäss Messkampagne 2, war im 2m Abstand infolge Verkleidung eine markante Reduktion des 60s Leq Wertes um ca. 18dB(A) auf neu 87dB(A) festzustellen. In der bebauten Umgebung des Werksareals wurde in 7.5m Entfernung in der Messachse D eine weitere Abnahme um 4dB(A) auf 83 dB(A) festgestellt. Inwieweit sich diese Werte mit der Reflexion des Lärms der unverkleideten, linken Seitenfläche an den Gebäuden überlagert, kann nicht schlüssig beurteilt werden. Fest steht, dass mit dem Messgerät in Richtung bzw. Gegenrichtung zur unverkleideten Seitenfläche 105 dB(A) bzw. 98 dB(A) gemessen wurden. Im zweiten Stock bzw. ersten Stock der Werksgebäude wurden Werte von 84 dB(A) bzw. 83 dB(A) gemessen. In der Verkehrsachse A der Maschine wurden in 7.5m Entfernung mit 89 dB(A) verglichen mit der Messachse D höhere Lärmpegel gemessen. Diese entsprechen in etwa dem Geräuschpegel des externen Generators (Abb. 4.17).

Die Messkampagne 3 mit ca. 5.7m/s (manuell) ergab in 7.5m Entfernung auf der Achse D keinen Unterschied zum Lärmpegel der Messung bei einer Geschwindigkeit von 5.1m/s.

Die Lärmschutzmassnahmen bewirken, dass der durch die Maschine verursachte Lärm subjektiv als eher dumpfes, stampfendes Geräusch empfunden wird. Unterhaltungen in unmittelbarer Nähe der Maschine (2m Abstand) ohne Kopfhörer sind gut möglich.

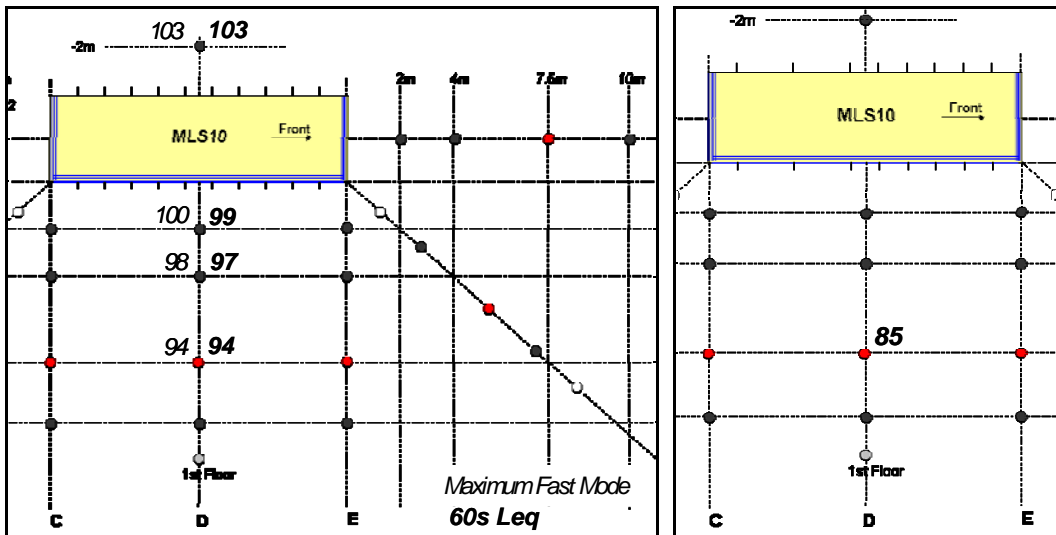


Abb. 4.19 Resultate Messkampagne 1 (links) und Messkampagne 3 (rechts)

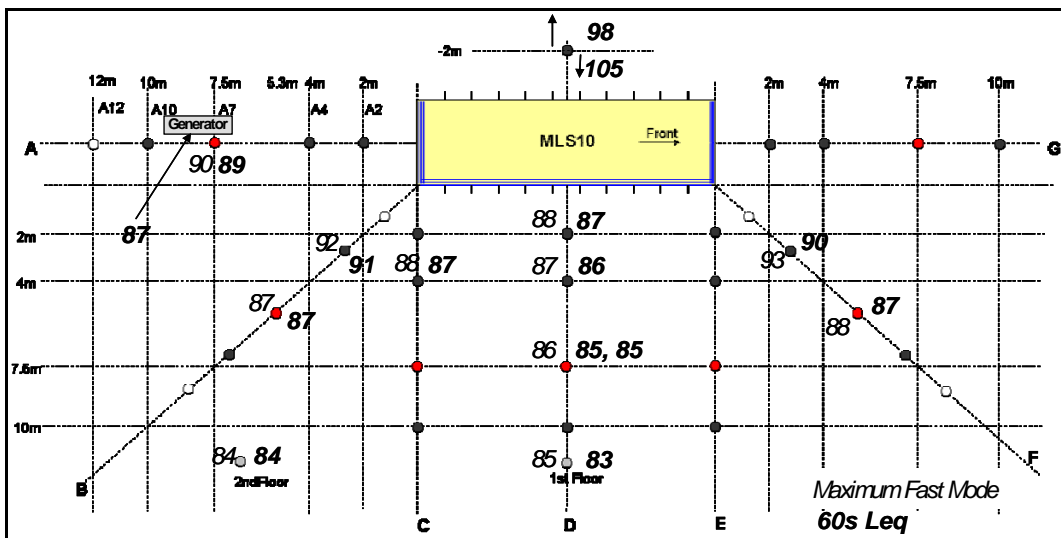


Abb. 4.20 Resultate Messkampagne 2

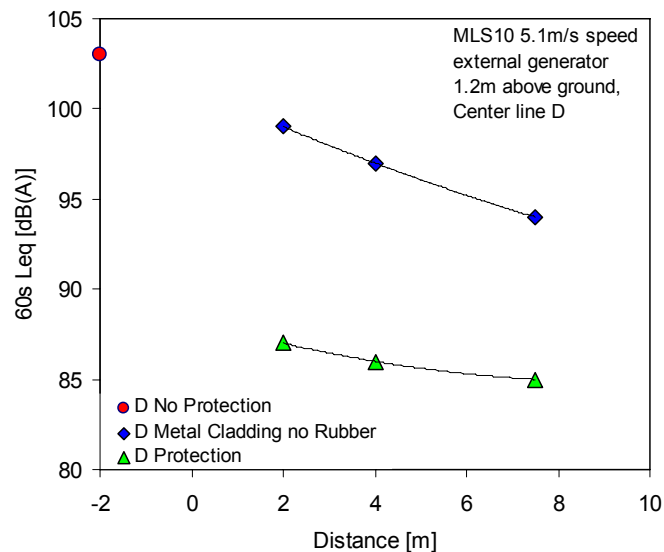


Abb. 4.21 Vergleich der Messungen in Achse D mit und ohne Stahlverkleidung (Messkampagne 1) sowie mit provisorischer Verkleidung mit Lärmschutzmatten (Messkampagne 2)

5.2.3.4 Folgerungen aus den Resultaten der Lärmmessung

Generell darf festgestellt werden, dass sich die Lärmschutzmassnahmen als wirksam erwiesen haben, auch wenn berücksichtigt werden muss, dass die Messungen erst einen provisorischen Zustand erfassen konnten. Dabei dürfte sich die Tatsache, dass die Messungen nicht bei maximaler Geschwindigkeit von 6.1m/s durchgeführt werden konnten, eher günstig, jene, dass keine allseitige Verkleidung mit Lärmschutz an den Gerätekanten aufgebracht war und die Messungen auf einem bebauten Werksgelände durchgeführt wurden, sich eher ungünstig ausgewirkt haben. Leider konnte die Messung nicht mit dem Originalgenerator durchgeführt werden. Technisch darf aber erwartet werden, dass dieser einen ähnlichen Geräuschpegel wie der externe Generator aufweist.

Der im Abstand von 7m auf 1.2m Höhe erreichte Wert von **83dB(A)** ist zwar nicht ideal, doch liegt er deutlich im unteren Bereich, wie er Baumaschinen oder Rasenmähern zugebilligt wird. Die Leistung der Maschine wird mit 24x3kW angegeben. Trotzdem liegt der Lärmpegel unterhalb von Kompressoren mit P<15kW bzw. von Rasenmähern mit P<55kW, der mit einem max. Wert=97dB(A) bzw. 94dB(A) angegeben wird (*Quelle: Baulärm-Richtlinie Richtlinie 2000/14/EG1 des Europäischen Rates vom 8. Mai 2000 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über umweltbelastende Geräuschemissionen von zur Verwendung im Freien vorgesehenen Geräten und Maschinen (ABl. L 162 03.07.2000 S.1)*).

Aufgrund unserer Interpretation und der durchgeführten Messungen entspricht das Gerät auch den Vergabegrundlagen für lärmarme Baumaschinen RAL-UZ 53, Feb. Ausgabe 2005. Die dort angegebenen Grenzwerte für den Schalleistungspegel Lwa für Kompressoren bewegen sich im Bereich 88-93 dB(A).

Der beim Verkehrslastsimulator MLS10 gemessene Wert liegt im Bereich 80...85 dB(A). Dieser Wert ist gemäss österreichischer TSI Richtlinie für Eisenbahnrollmaterial als „State of the Art“ festgelegt. Er liegt über dem Alarmwert des Belastungsgrenzwertes für Strassenverkehrslärm von 75dB(A) bei Tag für die Empfindlichkeitsstufe IV gemäss Lärm-

schutzverordnung LSV, 814.41. Es ist jedoch fraglich, ob für diese jeweils nur kurzfristig stationär eingesetzte Maschine dieser Wert als massgebend erachtet werden kann.

Fazit: Die getroffenen Lärmschutzmassnahmen an der Maschine rechtfertigen die Überführung der Maschine für die geplanten Vorversuche in der Schweiz zwecks allfälliger späterer Anschaffung.

5.2.4 Beurteilung

Folgende bei diesem Augenschein noch aufgetretenen wichtigen Punkte verdienen besondere Erwähnung:

5.2.4.1 Elektrische Ausrüstung

Der Produzent der Anlage wurde darauf aufmerksam gemacht, dass sicher zu stellen ist, dass die Farbwahl der Elektrokabel und die Frequenz der Versorgungsspannung nicht zu Schwierigkeiten bei den entsprechenden Zulassungsbehörden in der Schweiz führen kann. Er wurde angehalten, sich entsprechend zu erkundigen. Dasselbe gilt für die Frequenz der Versorgungsspannung. Letztere beträgt in der Schweiz normalerweise 50 Hz. Die Maschine wurde mit 60 Hz betrieben, weil dadurch bessere Auslastungen des Generators erzielt werden konnten. Gemäss Hersteller ist es kein Problem für die gesamte Installation der Maschine, auf 50 Hz zu fahren.

5.2.4.2 Lärmentwicklung

Die Lärmentwicklung des Gerätes konnte massiv reduziert werden.

5.2.4.3 Performance

Die Belastungsgeschwindigkeit der Anlage wurde anfänglich mit 7'200 Achslasten pro Stunde veranschlagt und konstruiert. Aufgrund der Versuche, der ersten über drei Millionen Lastdurchgänge, haben die Hersteller zu einer Reduktion der maximalen Belastungsgeschwindigkeit auf 6'100 Achslasten pro Stunde geraten. (Reduktion der Laufgeschwindigkeit von 7.2m/s auf 6.1m/s). Durch die Reduktion der Geschwindigkeit werden der Verschleiss der Schienen und Rollen erheblich reduziert und die Stabilität erhöht.

Die Autoren dieses Berichtes erachten diese Reduktion der Leistungsfähigkeit nicht als Killer-Kriterium für den Einsatz in der Schweiz, obwohl aufgrund der ursprünglichen Angaben des Herstellers die höhere Belastungsgeschwindigkeit erwartet wurde, zumal andererseits die Achslasten entgegen der ursprünglich 60kN neu bis auf 70kN erhöht werden können. Die endgültige Beurteilung kann anlässlich des Einsatzes in der Schweiz vorgenommen werden.

5.2.4.4 Sicherheitsvorkehrung

Anlässlich des Augenscheins wurde dem Hersteller der MLS10 gegenüber nochmals betont, dass grosser Wert auf zweckmässige Sicherheitsvorkehrungen für Lagerung, Transport und Einsatz der Maschine zu legen ist.

In den Besprechungen vor Ort wurden entsprechende Massnahmen mit dem Hersteller erörtert und auf einige Punkte, welche aufgefallen waren, hingewiesen. Es wurde davon ausgegangen, dass die Aufzählung der Sicherheitsvorkehrungen nicht abschliessend und vollständig war und der Hersteller bereit war, das Beste zu machen. Die Kompetenz und die Verantwortung für die Planung und Konstruktion lag klar beim Hersteller.

Wie dem Hersteller gegenüber mitgeteilt wurde, sollten die Antriebs- und Bremsen an Bord der Maschine so ausgelegt werden, dass diese ein gefahrloses Manövrieren der Maschine auch bei Steigungen und Gefälle sicherstellen. Dies betrifft insbesondere das Be- und Entladen auf entsprechende Transportfahrzeuge (Tiefelader). Aber auch im Einsatz steht die Maschine nicht immer auf den Stahlstützen, sondern muss gefahrlos auch in Steigungen und Gefällen manövriert werden können.

Ein wesentlicher Teil des Sicherheitskonzeptes muss im Betriebsreglement abgehandelt

werden. Da sollte unter anderem definiert sein, wer, wann und unter welchen Bedingungen die verschiedenen Teile in Bewegung setzen darf. Das Betriebsreglement muss auch beschreiben, wieviele Bediener für den Einsatz und Betrieb der Maschine notwendig sind und welche Verantwortung mit welcher Kompetenz diese wahrnehmen müssen.

5.3 **Entscheid betreffend Pilotversuchen in der Schweiz**

Der Besuch in Pretoria hat generell eine positive Beurteilung der Maschine ergeben. Es handelt sich um ein Gerät, das - obwohl ein Prototyp - offenbar die zugeordneten Funktionen erfüllt und nach einer Erprobungsphase von mehreren Wochen bzw. über drei Millionen Lastzyklen in einem Zustand vorgefunden werden konnte, in dem die grössten „Kinderkrankheiten“ als ausgeremert gelten können und zumindest im kurz-zeitigen Betrieb eines Pilotversuches in der Schweiz keine „bösen Überraschungen“ mehr erwartet werden dürfen. Der einzige negative Punkt bezüglich Anwendung in der Schweiz, die Lärmproblematik, konnte nach eigenen Feststellungen erheblich verbessert werden. Es darf mit einiger Zuversicht angenommen werden, dass die Maschine die schweizerischen Lärmanforderungen erfüllt, sobald die Lärmschutzmassnahmen durch den Hersteller fertiggestellt werden.

Es wird daher entschieden, eine temporäre Überführung der Maschine in die Schweiz zur Durchführung der im Projekt vorgesehenen Pilotversuche zur Abklärung der funktionellen Eignung der Maschine unter den hiesigen Bedingungen vorzunehmen. Diese Pilotversuche können nach heutigem Stand der Erkenntnisse ab August 2007 durchgeführt werden. Bis zu diesem Datum ist eine geeignete Versuchsstrecke in der Schweiz zu definieren.

Für die Evaluation von Versuchsfeldern in der Schweiz wurden bereits Vorabklärungen getroffen. Es zeichnet sich eine optimale Möglichkeit auf einem noch nicht in Betrieb stehenden Autobahnstück in der Umgebung von Hinwil ZH ab. Die zuständigen Stellen der kantonalen Baudirektion haben bereits ihr Interesse und ihre Unterstützung bekundet.

6 Eignungstest in Betzholz/Hinwil

6.1 Vorarbeiten und Methodik

6.1.1 Situationsplan Standort

Für die Eignungstests wurde das Anschlussstück der Oberlandautobahn im Bereich Betzholz/Hinwil ausgewählt (Abb. 4.22). Zunächst soll der Simulator in Position 1 aufgestellt werden. Beim Strassenstück handelt es sich um eine alte Strecke, die bisher nur für die Schneeräumung zwecks Ablagerung von Schnee im Winter befahren wurde. Sie besitzt denselben Aufbau mit Zementstabilisierung und Asphaltbeton wie die Originalausführung der Oberlandautobahn, die vor etwa 10 Jahren hinsichtlich Deckschicht erneuert werden musste. Die Strecke weist ein Quergefälle von 3% in Richtung Strassenmitte auf und ist durch zahlreiche klimabedingte Risse charakterisiert (Abb. 4.23). Die Strecke eignet sich vorzüglich zur Untersuchung des Resttragfähigkeitsverhaltens.



Abb. 4.22 Situationsplan Betzholz/Hinwil mit den beiden vorgesehenen Positionen des Verkehrslastsimulators MLS10



Abb. 4.23 Situation Anschlussstück mit Position 1 der ersten Prüfung und typischen Rissen

6.1.2 Belagsaufbau

Da es sich um eine relativ alte Strecke im Endbereich des Belagseinbaus handelte, war der genaue Belagsaufbau, einschliesslich verwendeten Materials, samt charakteristischen Eigenschaften nicht im gewünschten Detaillierungsgrad bekannt. Der genaue Aufbau und die Verkehrsdaten werden gegenwärtig noch ermittelt. Die Bohrkern hinter der Simulatorposition 1 sind in Abb. 4.24 dargestellt.



Abb. 4.24 links: Bohrkern hinter der Simulatorposition 1 in Rollachse entnommen; rechts: Details der Bohrkern 2 (oben) und 5 (unten)

6.1.3 Verkehrsdaten

Aufgrund der in Abb. 4.25 dargestellten Daten der Verkehrszählung dürfte die während der letzten 20 Betriebsjahre auf der Oberlandautobahn zwischen Rapperswil und Betzholtz/Hinwil aufgetretene Verkehrsbelastung in der Grössenordnung von etwa 5.5...6.5 Millionen Einheitsachslasten à 81.6kN liegen; dies unter der Annahme eines Lastwagenanteils von 6.3% und einer jährlichen Zuwachsrates von 4.45%.

Die vor 10 Jahren erneuerte Deckschicht weist in der befahrenen Normalspur starke Risse auf. Dies deutet darauf hin, dass eine Verkehrsbelastung in der erwähnten Grössenordnung tatsächlich einen Grenzwert für die Tragfähigkeit der Strecke darstellt. Somit war im Eignungstest mit der MLS10 bei einer halben Achslast von 65kN (entsprechend einer Achslast von 130kN) mit einer strukturellen Schädigung nach ca. 0.75 Mio. Überrollungen zu rechnen.

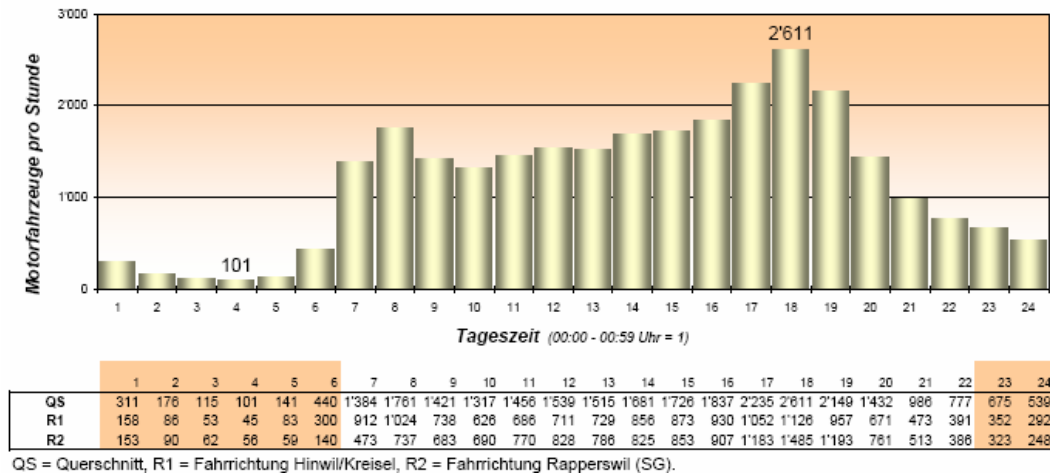


Abb. 4.25 Verkehrszählung Hinwil, Oberland Autobahn (A53) Daten 2006, Baudirektion Kanton Zürich; Tagesganglinie mittlerer Stundenwert der Anzahl Motorfahrzeuge über alle Tage des Jahres

6.1.4 Generelles Versuchsprogramm

Die Untersuchungen auf der Versuchsstrecke sollen so lange durchgeführt werden, bis klar eine Schädigung bzw. Veränderung der Tragwirkung des Gesamtaufbaues messbar wird. Dabei sollen möglichst viele Untersuchungsmethoden angewandt werden. Nicht alle Untersuchungen werden am selben Überrollstück durchgeführt, um den Belag durch Sensoren nicht übermässig zu schwächen und um unnötige Verzögerungen der Versuche zu vermeiden. Beispielsweise werden die WIM-Messungen separat in der Verlängerung der Rollachse realisiert.

Untersuchungen an der Maschine

- Lärm
- Radlasten (kN) – Lastmessungen an einer Brückenwaage/dynamische Last mit einem Weigh in motion (WIM) Sensor
- Belastungsdynamik der Belastungsschemel und der Lastachsen (Bluetooth)
- an strukturell kritischen Maschinenteilen Messung der Dehnungsermüdung mit Dehnmessstreifen DMS
- visuelle Inspektion der Grossversuchsanlage während der Versuche

Untersuchungen am Belagsmaterial

- Zustandserfassung der Oberfläche
- Spurrinnenbildung mittels Profilometermessung
- Oberflächenprofile in Längs- und Querrichtung
- Georadar (GPR)
- Verformungsmulde des Belags mit ETH Delta Messsystem
- Vertikalbeschleunigung in den Belagsschichten
- Vertikalverformung in den Belagsschichten mit magnetostruktivem Sensor
- seismischer dynamischer Modul mit dem Portable Seismic Pavement Analyzer (PSPA)
- Ausbildung von Oberflächenrissen durch visuelle Inspektion
- Untersuchung des Belagsmaterials und komplexer Schicht-Modul mit koaxialem Schubtest (CAST)
- Belagtemperatur

Die Versuche und Manipulationen an der Anlage waren durch den Hersteller im Auftrag

der Empa durchzuführen, um die fachlich korrekte Handhabung sicherzustellen und kein Sicherheitsrisiko für Dritte zu schaffen.

Im folgenden werden jene Untersuchungsergebnisse präsentiert und diskutiert, welche für die Evaluation der MLS10 von Bedeutung waren.

6.2 Transport nach Hinwil

Die MLS10 wurde an der Empa vorbereitet und mittels Tieflader nach Betzholz transportiert. Das Aufladen erwies sich als schwierig, da die Rampe 25% betrug und für die MLS10 zu steil war. Es musste eine Seilwinde beigezogen werden (Abb. 4.26). Eine Seilwinde an der MLS10 selbst wäre daher hilfreich.



Abb. 4.26 MLS10 Verlad an der Empa

6.3 Untersuchungen an der MLS10

Eignung und Funktionsweise der Maschine wurden während der Versuchsdurchführung vor Ort evaluiert. Die Routinekontrollen an der Maschine bestanden aus der Messung der Verformungen am Rahmen der Belastungsschemel während des Überrollvorganges mittels Bluetooth System. Damit wurde überprüft, ob die Belastungsschemel zu stark oder zu wenig belastet wurden. Weitere Routinekontrollen umfassten periodische, visuelle Inspektionen der Maschine hinsichtlich loser oder gebrochener Teile (z.B. Schrauben und Bolzen) oder Ermüdungsrissen in der Maschinenstruktur.

Während der Eignungstests wurden die strukturell kritischen Maschinenteile mit Dehnmessstreifen DMS hinsichtlich Dehnungsermüdung überwacht. Die DMS wurden an die Maschinenteile geklebt, und die Signale wurden via Bluetooth übermittelt. Die maximalen Messwerte zwischen Beginn und Ende der Testphase wurden durch den Hersteller mit den kritischen Werten von Stahl verglichen.

Vor dem Start der Verkehrssimulation auf dem Belagsstück, wurden die Lasten der MLS10 mit statischen Brückenwaagen der Kantonspolizei in Betzholz und einem vor Ort applizierten Weigh in Motion WIM-Sensor (Typ Lineas der Firma Kistler), wie nachstehend beschrieben, überprüft.

6.3.1 Lastmessungen MLS10 auf Brückenwaage in Betzholz/Hinwil

6.3.1.1 Messanordnung

Die Messungen erfolgten statisch und bei einer Geschwindigkeit von ca. 2.13m/s (7.7km/h) auf der Brückenwaage (IWS AG Küssnacht am Rigi) der Kantonspolizei Betz-

holz/Hinwil nach vorgängiger Einstellung des Anpressdruckes für jede Achse auf 17.2 MPa (Abb. 4.27). Die Brückenwaage bestand aus drei hintereinander angeordneten Einzelwaagen. Die MLS10 wurde so aufgestellt, dass die Stützteller jeweils auf der vorderen (Nr. 1), bzw. hintersten Waage (Nr. 3) standen und die mittlere Waage (Nr. 2) die Überrolllasten aufnahm. Die Überrollrichtung verlief von Waage 1 zu Waage 3. Die Plazierung zeigen die

Abb. 4.28 und Abb. 4.30 (Deutlich sichtbar ist das Gesamtgewicht von 32,4t auf der Anzeige.).



Abb. 4.27 Einstellen des Anpressdruckes



Abb. 4.28 Einfahren der MLS10 auf die Brückenwaage der Kantonspolizei Betzholz/Hinwil

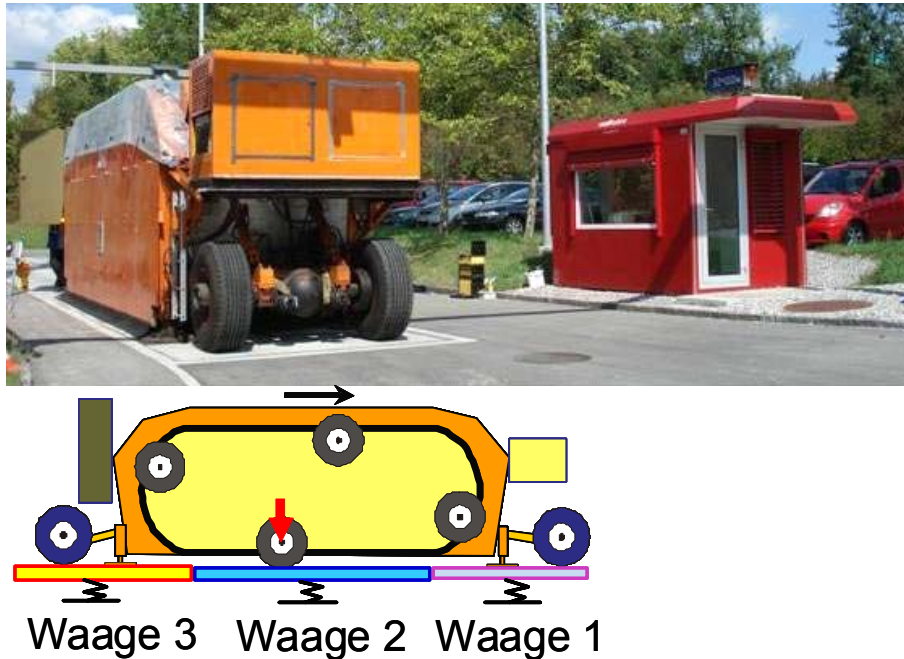


Abb. 4.29 MLS10 auf der Brückenwaage der Kantonspolizei Betzholz

6.3.1.2 Messergebnisse

Die Waage reagierte relativ langsam. Ca. alle 0.27s erfolgte eine Messung. Eine Zusammenstellung der Daten, wie sie von einer kurzen Videosequenz für 6 Überrollungen aufgenommen wurde, ist in Abb. 4.30 aufgeführt. Sie sind darauf zurückzuführen, dass kurzzeitig zwei Doppelräder auf den Boden bzw. die Waage aufsetzen.

Die in Abb. 4.30 zusammengestellten Messwerte zeigen beim Überrollvorgang deutlich etwa alle 1.63s (ca. 2.5m) auftretenden Lastspitzen (Peaks). Die mittlere Last zwischen den Peaks beträgt 67.92kN; das Minimum bzw. Maximum zwischen den Peaks beträgt 66.2kN bzw. 69.2kN. Dies bedeutet eine Schwankung von total 3kN (ca. 5%).

Auffällig ist, dass sich auch die Gesamtlast bei den Last-Peaks erhöht (vermutlich Massenträgheitseffekte). Bemerkenswert ist zudem die zyklische Lastzunahme auf der vordersten Waage, die beim Überrollen zuerst befahren wird, und die gleichzeitige Entlastung der hinteren Waage. Dies lässt auf eine zyklische Kippbewegung der Maschine in Längsrichtung schliessen.

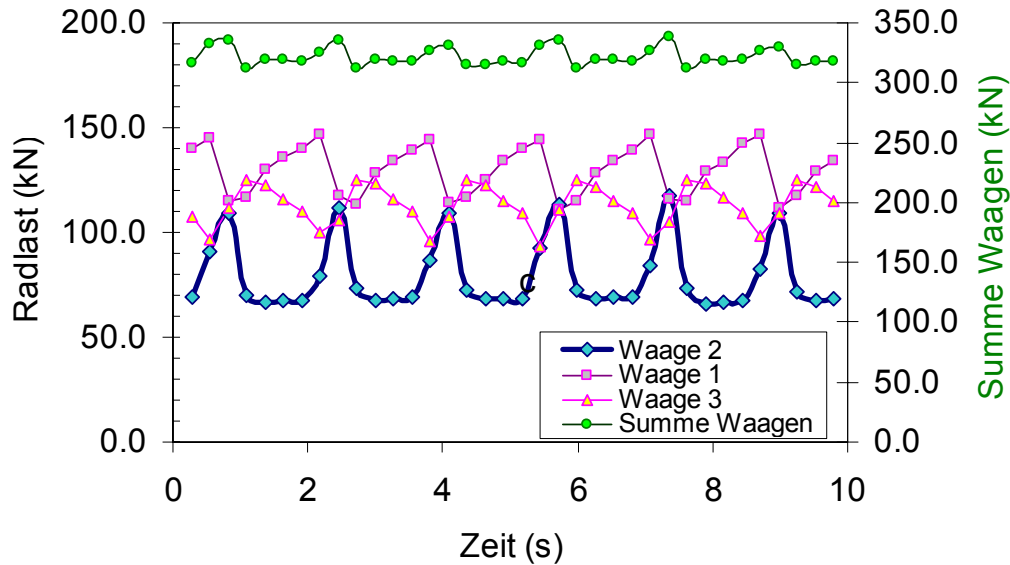


Abb. 4.30 MLS10 auf der Brückenwaage der Kantonspolizei Betzholz

6.3.2 Dynamische Lastmessung mit einem WIM Sensor

Die Kontaktkräfte zwischen Rad und Belag, die unter realen Verkehrsbedingungen durch einzelne Fahrzeuge in situ dynamisch erzeugt werden, können mit dynamischen Lastmessungen, sog. WIM (Weigh in Motion) Sensoren, erfasst werden. Entsprechend wurden auch bei Beginn der Verkehrslastsimulation auf dem instrumentierten Versuchsfeld in Hinwil die von der MLS10 erzeugten dynamischen Lasten bestimmt. Ziel war ein Vergleich zwischen tatsächlich auftretenden Kontaktkräften und den gewählten Soll-Lasten sowie die Untersuchung der Gleichmässigkeit der Lastaufbringung in Länge des Rollweges. Die Messungen wurden etwas ausserhalb der eigentlichen Teststrecke in der Verlängerung des Rollweges durchgeführt, um die eigentlichen Belastungsversuche nicht durch zusätzliche Einbauten zu beeinflussen.

WIM Sensor

Diese Sensoren werden üblicherweise auf Strassen verwendet, um direkt das Gewicht und die Achslasten vorbeifahrender Fahrzeuge zu messen. Sie werden niveaugleich mit der Belagsoberfläche installiert (Abb. 4.31), meist unter Verwendung von zwei oder mehr Sensoren hintereinander. Dadurch können Informationen über die Fahrzeuggeometrie gewonnen und die Messgenauigkeit erhöht werden.



Abb. 4.31 Installierter WIM Sensor

Kommerziell erhältliche WIM Sensoren basieren heutzutage häufig auf piezoelektrischen Effekten, die bei zahlreichen Stoffen, namentlich aber Quarz, auftreten. Rollt ein Rad über einen WIM Sensor, werden auf die Quarzkristalle des Sensors vertikale Kräfte aufgebracht, welche eine kleine praktisch vernachlässigbare Kristalldeformation erzeugen. Dies führt im Kristall zu einer elektrischen Polarisierung, die eine elektrische Spannung erzeugt, welche proportional zur aufgebrachten Kraft ist. Der piezoelektrische Effekt ist praktisch unabhängig von der Temperatur, Zeit und Geschwindigkeit des Fahrzeuges. Die elektrische Spannung wird durch einen Verstärker in genau proportionale Spannungswerte umgewandelt, die nach Bedarf weiter verarbeitet werden können. Üblicherweise werden Spannungswerte, die über einem bestimmten Grenzwert liegen (Triggerwert), erfasst und digital in einem PC gespeichert. Anschliessend werden die Spannungssignale in Rad-Kontaktkräfte mit folgender Formel umgerechnet:

$$P = v \cdot \Delta t \cdot \frac{1}{b} \cdot C_{CF} \cdot \sum_{i=n}^m vI_i$$

Hierin bezeichnet:

- P : berechnete Rad-Kontaktkraft, in [kN]
- v : Radgeschwindigkeit, in [m/s]
- b : Sensorbreite (= 0.05m)
- vI_i : Spannungswert bei der i^{ten} Messung
- Δt : Zeitinkrement zwischen Messungen ($t_{(i)} - t_{(i-1)}$)
- C_{CF} : Umwandlungsfaktor von V zu kN (6.4 [kN/V])
- n, m : Anfangs- und Endwert von Messungen über einem Grenzwert

6.3.2.1 Versuchsanordnung

Der WIM Sensor wurde etwas ausserhalb der eigentlichen Teststrecke in Verlängerung des Rollweges eingebaut, wo der eigentlichen Eignungstests durchgeführt wurden, die ja

bis zur strukturellen Schädigung bzw. bis zum Tragfähigkeitsverlust des Belages durchgeführt werden sollten.

Die Soll-Lasten der MLS10 wurden mit dem hydro-pneumatischen Radaufhängungssystem der vier Belastungsschemel für jedes einzelne Doppelrad der MLS10 eingestellt. Um die Gleichmässigkeit der Lastaufbringung zu kontrollieren, wurde ausgehend von der Maschinenmitte die Länge des Rollweges in 11 Messpositionen im Abstand von 400mm aufgeteilt. Dabei wurden jene Messpunkte, die gegen die Laufrichtung lagen, mit einem negativen und jene in Laufrichtung mit einem positiven Vorzeichen versehen. Entsprechend lautet die Liste der Messpositionen: -2000, -1600, -1200, -0800, -0400, 0, +0400, +0800, +1200, +1600 and +2000.

Um den WIM Sensor in jeder Messposition mit der MLS10 mit verschiedenen Geschwindigkeiten und Lasten belasten zu können, wurde die MLS10 sukzessive über den WIM Sensor verschoben. Entsprechend befand sich die MLS10 zu Beginn in der Messposition -2000 über den WIM Sensor, danach auf Position -1600, usw. Um die Soll-Lasten zu variieren, wurde für jeden Lastschemel eine unterschiedliche Soll-Last eingestellt, d.h. 40kN, 50kN, 60kN und 65kN. In jeder Messposition wurden die WIM Signale während je einer Minute bei den Lastgeschwindigkeiten von 3m/s, 4m/s, 5m/s und 6m/s aufgezeichnet (vgl. Abb. 4.32). Auf diese Weise wurden an den 11 Messpositionen insgesamt 44 Versuche durchgeführt.

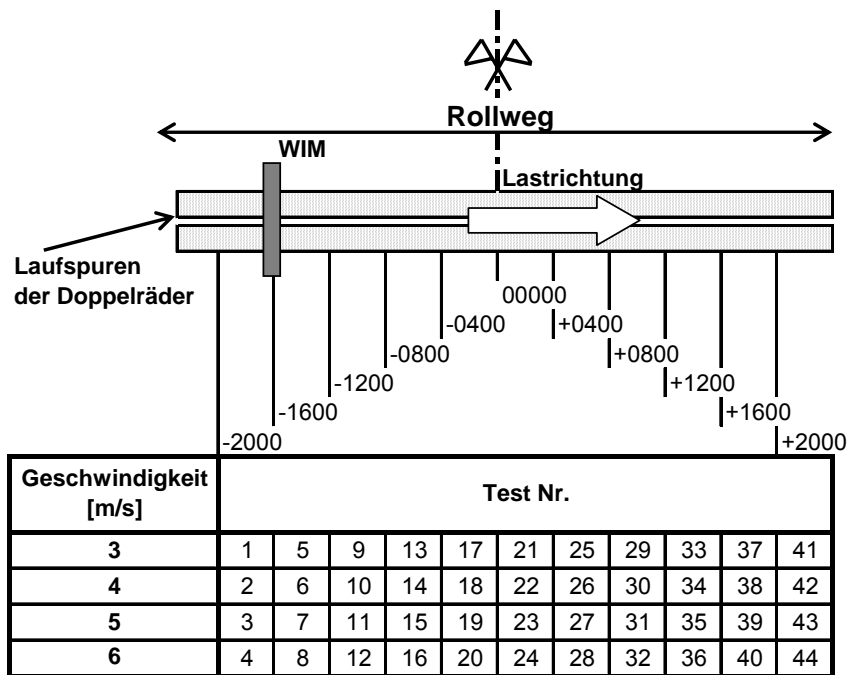


Abb. 4.32 Schema der Versuchsanordnung

6.3.2.2 Versuchsergebnisse

Abb. 4.33 zeigt typische WIM Daten (in Volt) für die Lastgeschwindigkeiten von 3m/s und 6m/s. Dargestellt ist ein 2.2s Ausschnitt einer insgesamt 60s dauernden kontinuierlichen Aufzeichnung. Die vier roten Impulssignale entsprechen den vier mit Soll-Lasten von 65kN, 60kN, 50kN und 40kN unterschiedlich beaufschlagten Doppelrädern bei 6m/s. Die blaue Kurve weist wegen der Fahrgeschwindigkeit von 3m/s nur zwei Peaks auf.

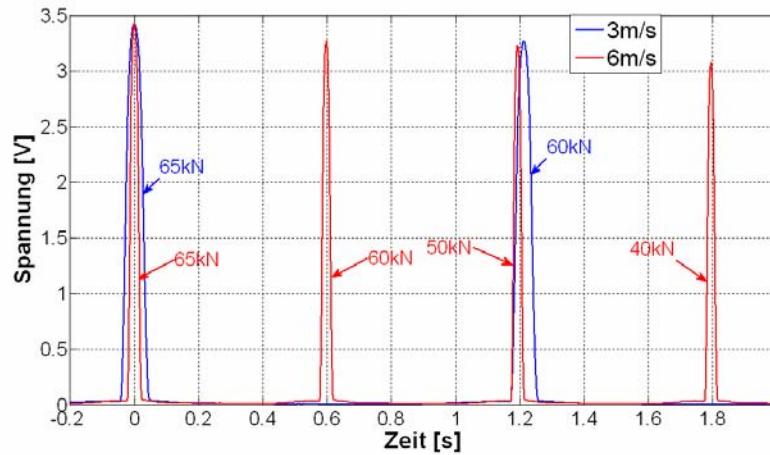


Abb. 4.33 WIM Daten bei MLS10 Geschwindigkeiten von 3m/s and 6m/s

Die WIM Spannungssignale können mittels obiger Umrechnungsformel in Kraftwerte umgewandelt werden. Als Grenzwert (Triggerwert) zum Auffinden der massgebenden Datenimpulse bei der Überfahrt der MLS10 Räder wurde ein Wert von 0.05V gewählt. Die linke Seite von Abb. 4.34 enthält zwei Beispiele berechneter WIM Lasten für 5m/s und 6m/s. Auf der rechten Seite sind die statistischen Charakteristika der einzelnen Lasten in Kastengrafiken dargestellt, wobei die oberen und unteren Kastenwerte die 25% bzw. 75% Perzentile der Messungen bezeichnen. Die Abstände zwischen oberen und unteren Kastenwerten geben die interquartilen Bereiche an und umfassen somit jeweils 50% der Daten. Die Linie in der Mitte jedes Kastens markiert den Median der Messungen. Die schnurförmigen Linien (Whiskers), die aus den einzelnen Kasten nach oben und unten laufen, verbinden jene extremen Messpunkte, die höchstens 1.5-mal die Länge des interquartilen Bereiches vom Median entfernt liegen. Punkte, die aufgrund dieser Definition nicht mit der schnurförmigen Linie erreicht werden können, werden als Ausreisser bezeichnet und sind rot markiert.

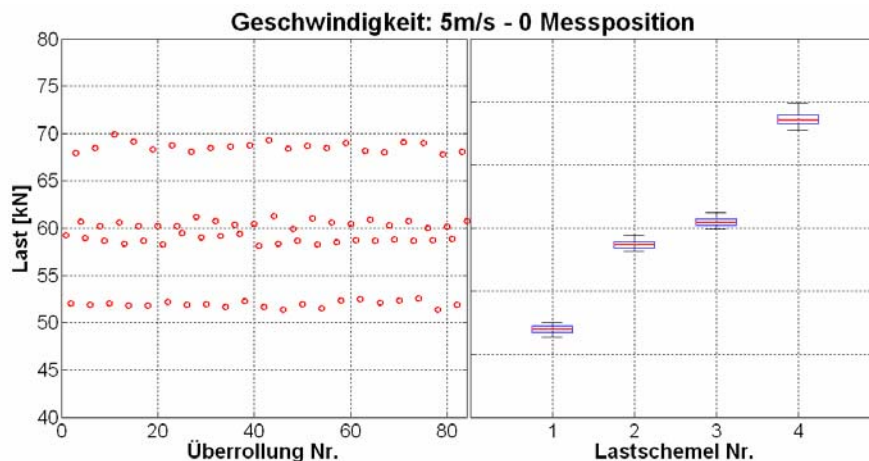
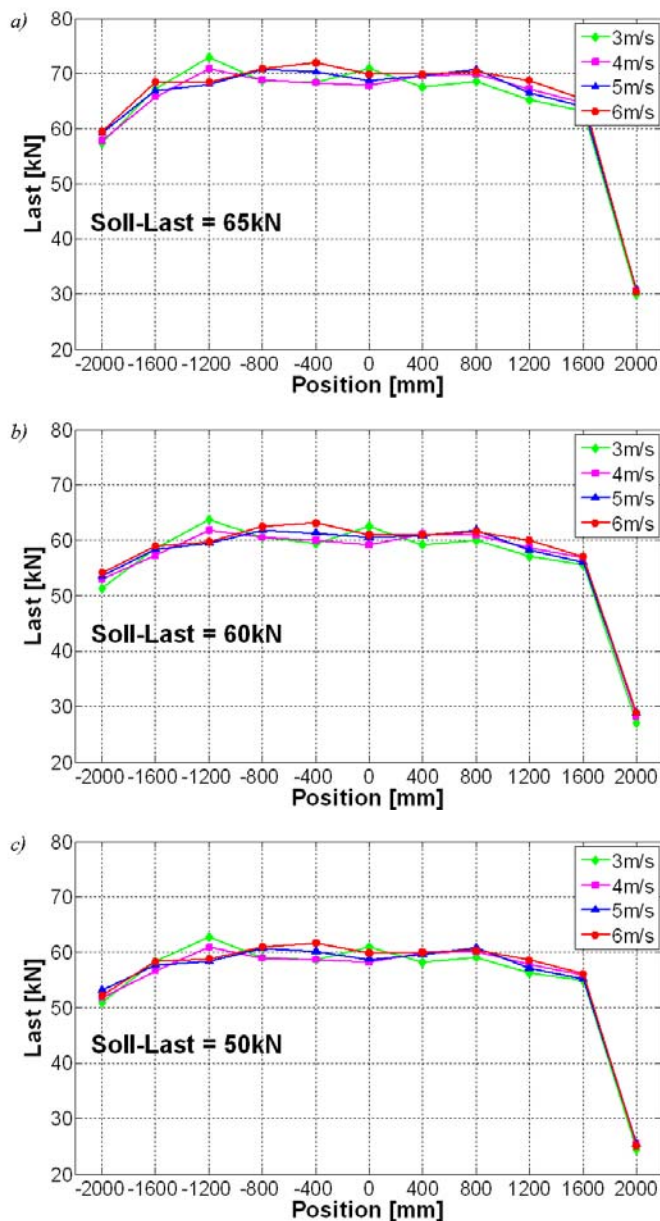


Abb. 4.34 Die roten Markierungen links zeigen die mit WIM gemessenen MLS10 Lasten; rechts sind die statistischen Charakteristika in Form von Kastendiagrammen dargestellt.

Die Analyse der Kastendiagramme aller 44 Versuche mit dem WIM Sensor liefert Aufschlüsse über die Wiederholbarkeit der MLS10 Lasten. Es zeigt sich, dass die statistische Verteilung kompakt um den Median herum verteilt ist und relativ wenige Ausreisser auftreten. Somit können die Mittel- oder Medianwerte der Lasten als charakteristische Grössen zur Beurteilung der Gleichmässigkeit der Lastaufbringung in Laufrichtung angesehen werden. Andererseits ist zwischen den Soll-Lasten und den über WIM gemessenen Kontaktkräften eine relativ grosse Abweichung festzustellen. Obwohl beispielsweise die

Soll-Last auf 40kN festgelegt wurde, ergaben die WIM Messungen an der 0-ten Position eine Kontaktkraft von 52.2kN. Dies bedeutet, dass die Soll-Lasten lediglich als Orientierungswerte für die dynamisch aufgebracht Lasten angenommen werden dürfen, und dass im konkreten Fall eine durch dynamische Kalibration zu ermittelnde Korrektur vorzunehmen ist.

In Abb. 4.35 sind die mittels WIM bestimmten mittleren Lasten aller Geschwindigkeiten, Messpositionen und theoretisch festgelegten Belastungen gegenübergestellt. Demzufolge sind die Lasten in Laufrichtung nicht konstant, sondern gewissen Variationen unterworfen. Allerdings scheinen die Lasten zwischen den Messpositionen -1600 und +1600mm relativ konstant zu sein. Ausserhalb dieses Bereiches nimmt die Wirkung der Lasträder deutlich ab. Beispielsweise wird in Position +2000mm (d.h. kurz vor dem Abheben der Räder) etwa die Hälfte der Lasten in der Laufspurmitte gemessen.



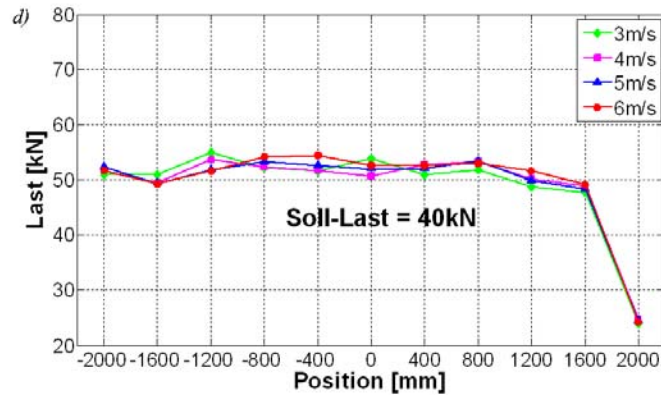


Abb. 4.35 MLS10 Lasten gemessen mit WIM in allen Messpositionen. Soll-Lasten: 65kN, 60kN, 50kN, 40kN

6.3.3 Folgerungen

Die Messungen der MLS10 Lasten zeigen, dass das hydraulische System zur Einstellung der Soll-Lasten an den einzelnen Belastungsschemeln nicht ausreicht, um sicherzustellen, dass die Soll-Lasten tatsächlich mit den effektiv wirkenden Kontaktkräften zwischen Rad und Belag übereinstimmen. Die WIM Messungen zeigen ausserdem, dass die Kontaktkräfte auf dem 4m langen Rollweg in den mittleren 3m als konstant angenommen werden dürfen.

6.4 Untersuchungen des Belagszustandes

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Resultate der verschiedenen Messungen zur Zustandsanalyse der Belagsstruktur während und nach der Belastung durch die MLS10. Diese Messungen sollten Aufschluss darüber geben, ob die MLS10 nach kurzzeitiger, intensiver Verkehrslastsimulation eine Belagsschädigung erzeugen kann, welche jener durch jahrelange tatsächliche Verkehrsbelastung hervorgerufenen entspricht.

6.4.1 Zustandserfassung am Belag

Vor Beginn der Verkehrslastsimulation mit der MLS10 wurde die Ebenheit der Belagsoberfläche durch das Tiefbauamt des Kantons Zürich ermittelt. Wie in

Abb. 4.36 dargestellt, wurden drei Längs- und elf Querprofile gemessen. Nach Abschluss der MLS10 Tests wurden die Längsprofile erneut bestimmt. Ein Vergleich der Ebenheit in Längsrichtung vor und nach den Versuchen ist in Abb. 4.37 dargestellt. Die entsprechenden Abnahmewerte gemäss Norm SN 640 521c sind in Abb. 4.38 aufgeführt.

Schema Feld 1

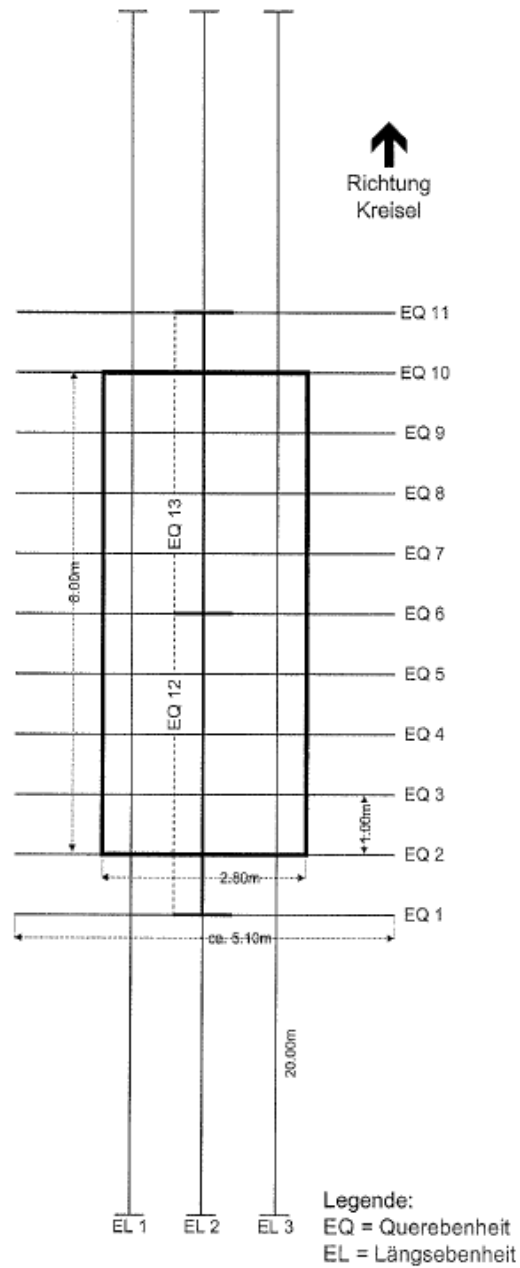
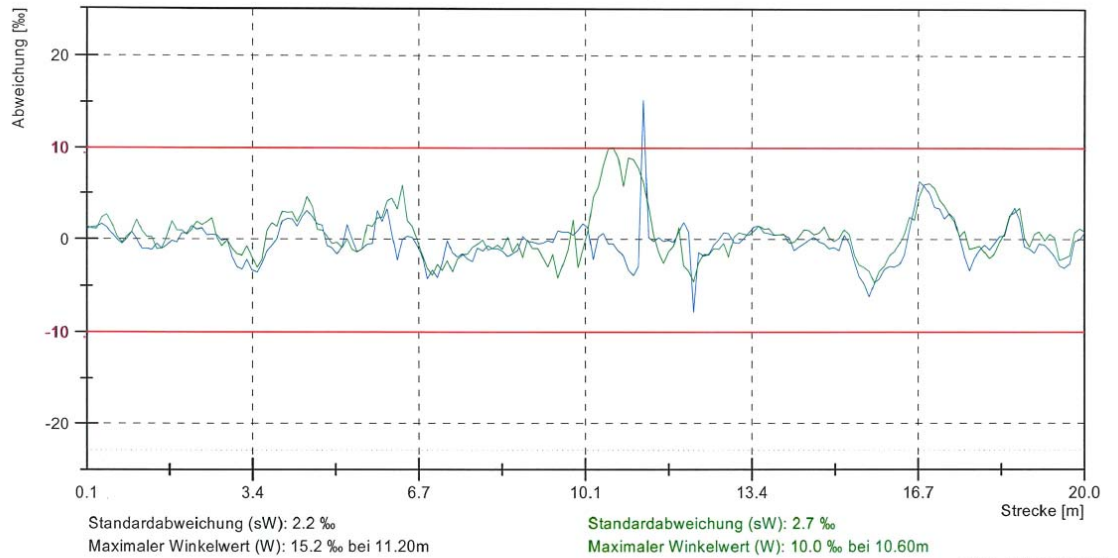


Abb. 4.36 Lage der Messlinien für die Ebenheitsmessungen

Versuchsstrecke, A53 Hinwil Wurmfortsatz

EL 2, Messung vom 31.08.2007
Richtung Kreisel
Messbeginn siehe Plan

EL 2, Messung vom 09.04.2008
Richtung Kreisel
Messbeginn siehe Plan



070831_160910 / 11.04.2008

Abb. 4.37 Vergleich der Längsebenheit vor (grün) und nach Abschluss der Überrollserien (blau)

Abb. 4.38 Abnahmewerte gemäss SN 640 521c

Strasstypen / Flugpisten	Kriterien	Abnahmewerte
Hochleistungsstrassen (HLS) Flugpisten	W [‰]	10
	SW [‰]	1.4
	T [mm]	4
Hauptverkehrsstrassen (HVS)	W [‰]	14
	SW [‰]	1.8
	T [mm]	5

W: maximaler Winkelwert als Einzelwert [‰]

sW: Standardabweichung der W-Werte über eine Messlänge von 250m [‰]

T: Muldentiefe unter der 4m Latte [mm]

6.4.2 Spurrinnenbildung, gemessen mit Querprofilmessung

Während der Prüfung wurden an verschiedenen Stellen des Rollweges Querprofile ermittelt, welche die Spurbildung in Abhängigkeit der Anzahl Überrollungen mit der MLS10 aufzeigen. In Abb. 4.39 ist beispielhaft die Entwicklung eines dieser Querprofile in Funktion der Überrollungen dargestellt. Mit Ausnahme der Querprofilmessung nach Beendigung der Eignungstests musste aus versuchstechnischen Gründen auch der zentrale, ca. 5mm dicke Messkabelstrang in der Rollwegachse, d.h. im Zwischenraum zwischen den Doppelreifen, mitgemessen werden. Der starke Ausschlag in der Mitte der Querprofile bei weniger als 1'000'000 Überrollungen ist daher irrelevant. Die Entwicklung der Spurrinnen erfolgt zu Beginn relativ rasch: Bereits nach 5'000 Überrollungen weist der Belag eine

Spurrinntiefe von 40% der zu erreichenden Tiefe nach 1'000'000 Überrollungen auf. Diese beträgt im vorliegenden Fall 10mm. Die Tatsache, dass die Querprofile nicht symmetrisch sind, ist auf das Quergefälle der Strasse zurückzuführen, welches dazu führte, dass die Kontaktkräfte des rechten und linken Reifens nicht gleich waren.

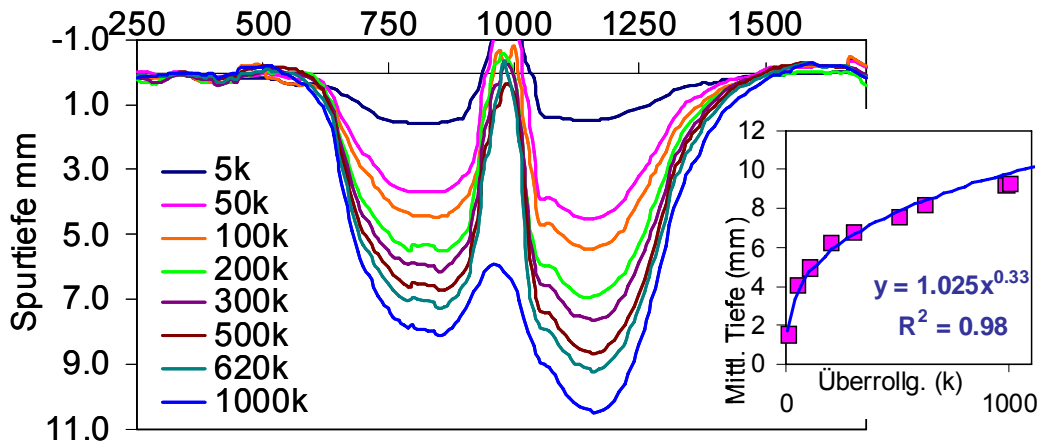


Abb. 4.39 Spurrinnenbildung infolge Belastung durch die MLS10, etwa 300mm von der Rollwegmitte in Gegenrichtung zum Laufweg der Räder entfernt

6.4.3 Georadar Messungen

6.4.3.1 Messprinzip

Unter Georadar versteht man ein elektromagnetisches Wellenverfahren. Das Funktionsprinzip ist in Abb. 4.40 dargestellt.

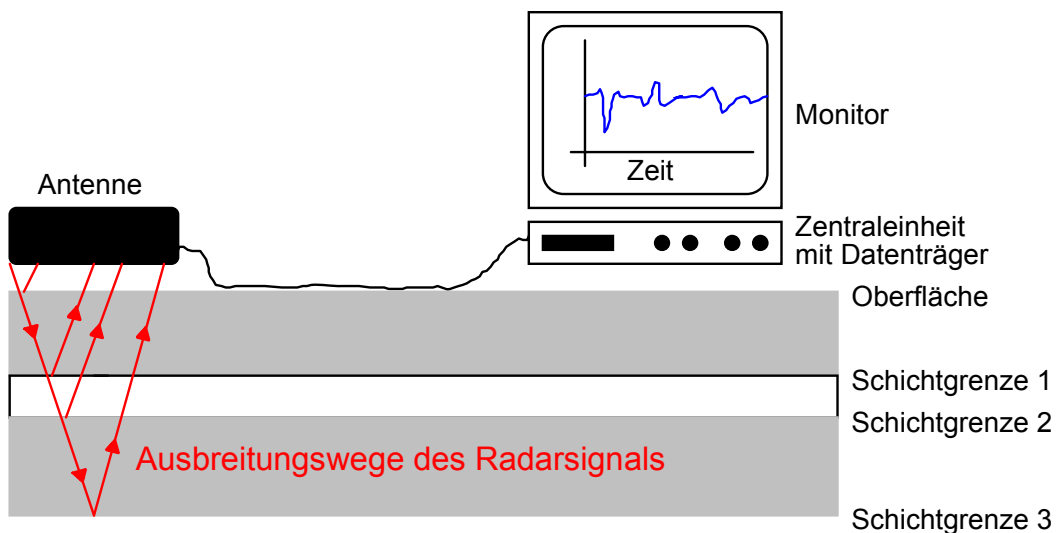


Abb. 4.40 Funktionsprinzip des Georadar Verfahrens

Ein elektromagnetisches Signal wird von der Antenne abgestrahlt und an verschiedenen Grenzflächen reflektiert. Das reflektierte Signal wird von der Antenne empfangen und kann, nach Aufbereitung durch die Zentraleinheit, auf einem Monitor dargestellt und zur weiteren Bearbeitung auf einem PC auf Datenträger abgespeichert werden. Das Prinzip der Einzelmessung an einem Ort ist schematisch in der Abb. 4.41 (rechts dargestellt).

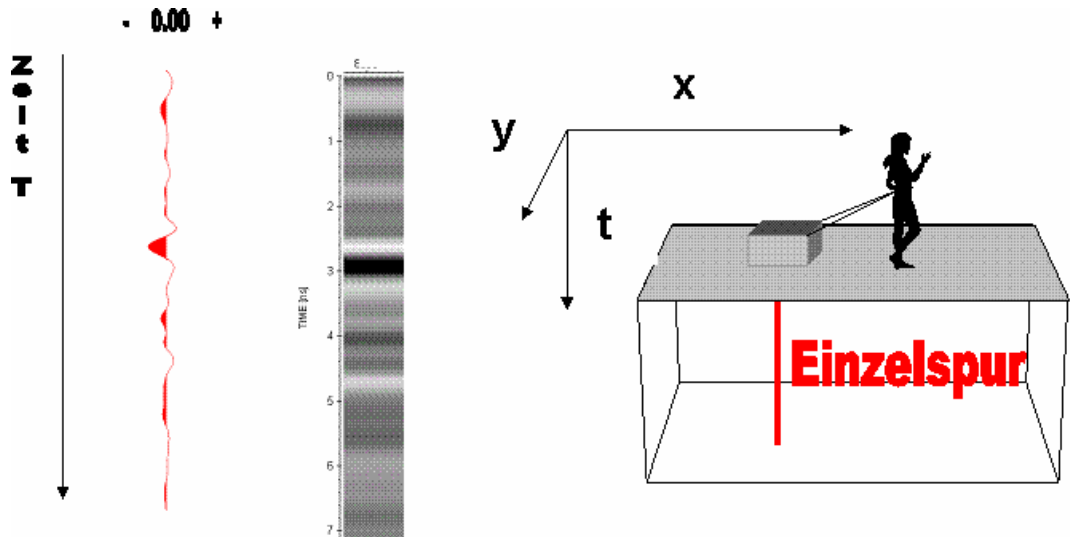


Abb. 4.41 links: Einzelspur im Wiggle-Modus, Mitte: in Graustufendarstellung und rechts: schematische Darstellung der Einzelmessung an einem Ort

Radardaten werden meist entlang von Linien als Serie von Einzelspuren aufgezeichnet. Werden viele dieser Spuren nebeneinander geplottet, so ergibt sich ein Bild, welches durch die Eigenschaften des Untergrundes bestimmt wird. Eine derartige Darstellung wird als Radargramm oder Radarprofil bezeichnet. Das Radarprofil gibt zwar die Charakteristika des Untergrundes bzw. des untersuchten Mediums wieder, stellt jedoch keinen Schnitt durch dieses Medium dar. Für diesen Sachverhalt sind verschiedene Effekte verantwortlich; zwei davon sollen an einem Beispiel verdeutlicht werden. Weitere Effekte, die bewirken, dass man mit einem Radarprofil zunächst keinen Schnitt durch den Untergrund erhält, sind beispielsweise die Dämpfung des Signals und der Einfluss von neben dem Profil liegenden unter- oder oberirdischen Strukturen. Radardaten können nicht nur entlang von Linien, sondern auch flächig aufgezeichnet werden, beispielsweise durch die Aufzeichnung entlang vieler paralleler Linien. Dies ermöglicht flächige oder dreidimensionale Darstellungen. Eine Zeitscheibe stellt die Radardaten einer bestimmten Zeit oder Zeitspanne dar.

Als weitere Möglichkeit können flächig erhobene Daten auch direkt als Datenkubus dargestellt werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind hier Vereinfachungen erforderlich. So können beispielsweise nur diejenigen Daten dargestellt werden, die einen gewissen Grenzwert überschreiten.

6.4.3.2 Vorbereitung und Durchführung der Messungen in Hinwil

6.4.3.2.1 Definition Messlinien und eingesetzte Geräte

Grosse Antenne

Vor der Radarmessung wurden 7 Messlinien definiert, welche auf beiden Testfeldern ausgemessen werden sollten. Diese Linien wurden auf dem Global Positioning System GPS-Controller abgelegt, um während der Messung für die Navigation zur Verfügung zu stehen. Die Abb. 4.42 zeigt schematisch die Position der Messlinien, welche zusätzlich in Abb. 4.43 aufgelistet sind.

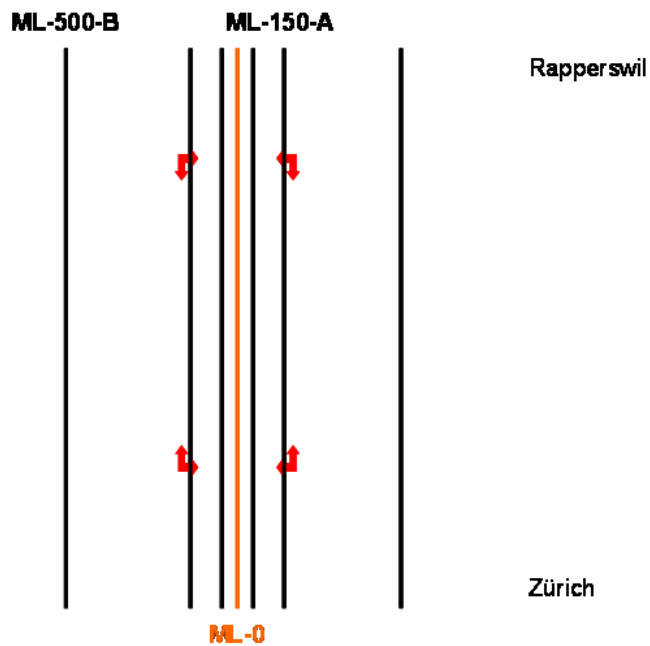


Abb. 4.42 Position der Messlinien

Abb. 4.43 Bezeichnung der Messlinien

Bezeichnung	Position
MLS-0	Mitte längs, Standort X (1,2)
MLS-50-A	50cm nach rechts
MLS-150-A	150cm nach rechts
MLS-500-A	500cm nach rechts
MLS-50-B	50cm nach links
MLS-150-B	150cm nach links
MLS-500-B	500cm nach links

Die Radarmessungen wurden am 3. September 2007 und am 5. November 2007 jeweils bei trockener Witterung mit der mobilen Georadaranlage der Empa durchgeführt. Zwischen diesen beiden Daten wurde die Strasse mit dem Verkehrslastsimulator mit einer Million Zyklen belastet. Die eingesetzten Geräte und die Messparameter sind in Abb. 6.23 und Abb. 6.24 beschrieben.

Abb. 4.44 eingesetzte Geräte

	Modell	Hersteller
Hornantennen	4205	GSSI
Radargerät	SIR 20	GSSI
mobiler Aufbau		Empa
GPS-System		Trimble 5700 RTK

<i>Abb. 4.45 Messparameter</i>	
Fahrgeschwindigkeit :	10 km/h
Spurlänge:	20 ns
Spuren pro Meter:	40
Datenverarbeitung während der Messung:	keine

Die im Anschluss an die Messung durchgeführte Datenbearbeitung beschränkte sich auf die folgenden Schritte:

- Bandpassfilter
- Korrektur der Oberflächenreflexion auf die Zeit 0.00ns
- Positionskorrektur

Die Datenbearbeitung wurde bewusst einfach gehalten, um Vergleiche zwischen den Reflexionsamplituden vor und nach der Schwerlastsimulation zu ermöglichen.

Kleine Antenne

Zusätzlich zu den Messlinien für die grosse Antenne wurde eine verfeinerte Anordnung von parallelen Messlinien für die kleine Antenne definiert. Mit diesen neuen Messlinien sind die ersten Messungen mit hoher Auflösung bei 600'000 Zyklen durchgeführt worden. Nach dem Ende des Tests wurde eine zweite Messung bei 1'000'000 Zyklen durchgeführt.

Die neue Messlinienanordnung ist für eine 8m lange und 2.8m breite Oberfläche definiert worden. Die Messlinien wurden dabei in einem Abstand von 10cm gezeichnet. Insgesamt 80 Profile mit einer Länge von 2.80m sind angeordnet worden. Die Auflösung ist auf 500 Spuren pro Meter festgelegt worden. Die Abtastung ist auf 500 Werte pro Spur und die Spurlänge auf 15ns festgelegt worden.

6.4.3.3 Belagsaufbau im Messfeld

Abb. 4.46 zeigt den auf der Linie MLS-0 vor der Schwerlastsimulation aufgezeichneten Datensatz (oben) zusammen mit der Auswertung der Schichtdicken (unten). Im Bereich des Messfeldes (weisser Pfeil) ergeben sich Belagsdicken zwischen 14cm und 16cm. Grössere Abweichungen ergeben sich ausserhalb des Messfeldes, wo die Belagsdicke lokal weniger als 10cm beträgt. Die Untergrenze der Zementstabilisation liegt in einer Tiefe von 32cm bis 36cm. Die zur Umrechnung der Laufzeiten in Dicken/Tiefen erforderliche Ausbreitungsgeschwindigkeit des Radarsignals von 0.115m/ns für den Asphalt und 0.07667 m/ns für die Zementstabilisation wurde anhand der Bohrungen (rote Markierung in Abb. 4.46) ermittelt.

Abb. 4.47 zeigt den Datensatz und die Schichtdicken für die Linie MLS-150-A. Im Bereich des Messfeldes ergibt sich eine ähnliche Situation wie auf der Linie MLS-0. Ausserhalb des Messfeldes betragen die Asphaltthicken, anders als auf der Linie MLS-0, ebenfalls überall über 12 cm.

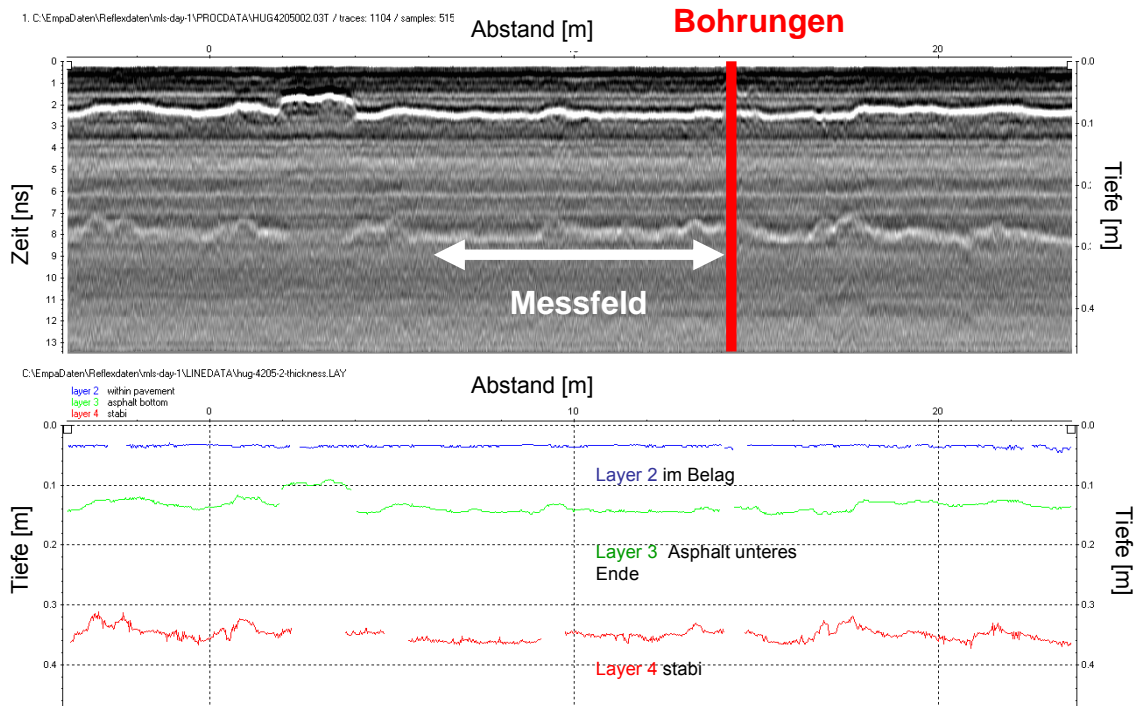


Abb. 4.46 Schichtdicken der Linie MLS-0 (vor Schwerlastsimulation)

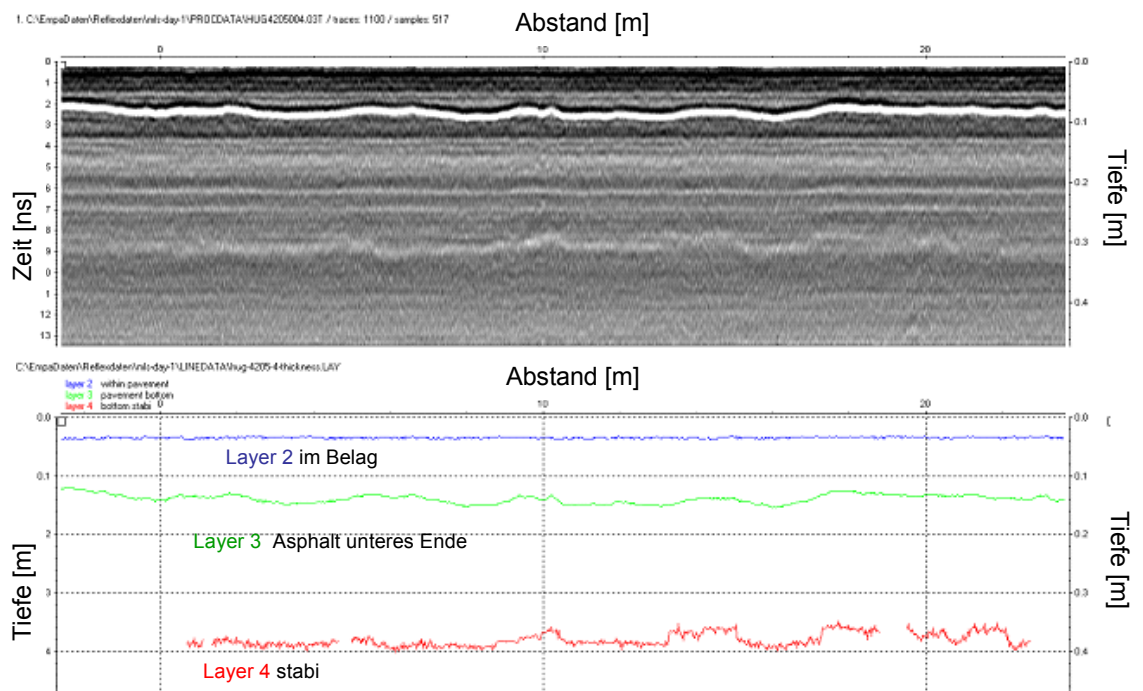


Abb. 4.47 Schichtdicken der Linie MLS-150-A (vor Schwerlastsimulation)

6.4.3.4 Vergleich vor, während und nach einer Million Zyklen

Eine Million Schwerlastüberrollungen können den Strassenbelag und damit auch die Radardaten auf verschiedene Art und Weise verändern:

- Nachverdichtung – Verringerung des Porenvolumens

- Ermüdung – Bildung von Rissen
- Spurrinnenbildung – Verformung innerhalb des Belages und Veränderung der Oberfläche
- Veränderung der Schichthaftung

Diese Veränderungen könnten zu einer Veränderung der Dielektrizitätszahl oder der elektrischen Leitfähigkeit führen oder die Reflektivität an Schichtgrenzen beeinflussen.

Abb. 4.48 zeigt einen Ausschnitt von 2.0m Länge, aufgezeichnet vor (links) und nach (rechts) der Schwerlastsimulation. Dieser Ausschnitt stellt die Hälfte des überrollten Bereichs dar. Die andere Hälfte wurde ausgeklammert, da sich dort bei der Messung nach der Schwerlastsimulation ein Kabel auf der Belagsoberfläche befand. Die Reflektion an der Unterseite des Asphaltbelages befindet sich um 2.5ns. Abgesehen von einem deutlichen Unterschied zwischen 10.0m und 10.2m, vermutlich verursacht durch das in der Nähe befindliche Kabel, sind die beiden Datensätze sehr ähnlich.

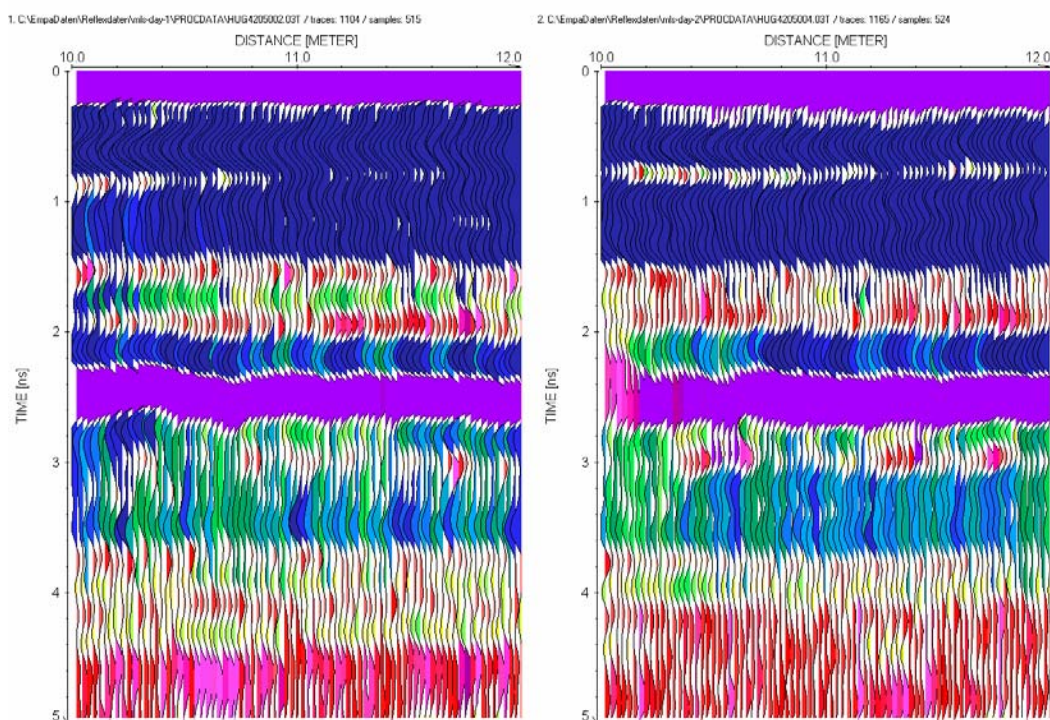


Abb. 4.48 Ausschnitt aus der Linie MLS-0 vor (links) und nach (rechts) Schwerlastsimulation

Der Mittelwert des Absolutwertes der Reflexionsstärke an der Belagsoberfläche im Abschnitt 10.00-12.00m nimmt von 14449 auf 13374 ab. Gemäss

$$r = \frac{\left(\sqrt{\epsilon_{luft}} - \sqrt{\epsilon_{asphalt}} \right)}{\left(\sqrt{\epsilon_{luft}} + \sqrt{\epsilon_{asphalt}} \right)}$$

mit dem Reflexionskoeffizienten r , und den relativen Dielektrizitätszahlen der jeweiligen Materialien Luft und Asphalt bedeutet diese eine Abnahme der relativen Dielektrizitätszahl im Asphalt. Gemäss

$$v = \frac{c_0}{\left(\sqrt{\epsilon_{asphalt}} \right)} \quad (\text{mit } c_0 = \text{Lichtgeschwindigkeit im Vakuum bzw. in Luft})$$

sollte somit die Ausbreitungsgeschwindigkeit v im Asphalt ansteigen und damit die Laufzeit des Signals im Asphalt zurückgehen. Diese Überlegung beinhaltet die Annahme, dass die Änderung der relativen Dielektrizitätszahl sich nicht alleine auf die Oberfläche beschränkt, sondern einen wesentlichen Teil des Belags betrifft. Abb. 4.49 zeigt die Laufzeiten für die Belagsuntergrenze im entsprechenden Ausschnitt für 10m bis 12m. Die Laufzeiten nach der Schwerlastsimulation sind geringfügig grösser als vorher. Dies steht im Widerspruch zur Abnahme der relativen Dielektrizitätszahl.

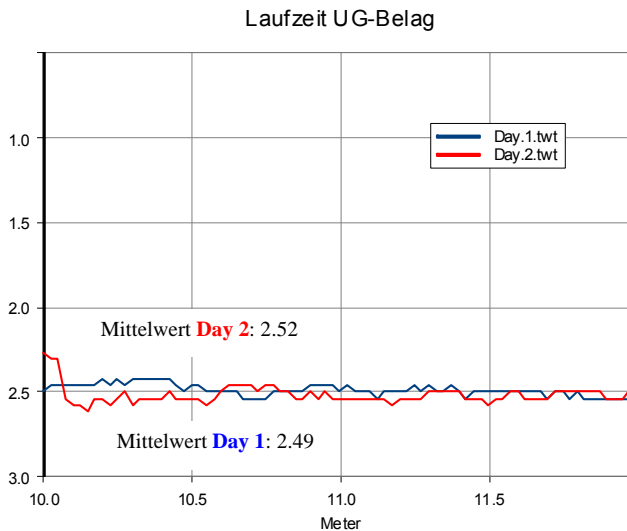


Abb. 4.49 Laufzeiten, UG-Belag, Linie MLS-00, Ausschnitt

Abb. 4.50 zeigt die Ergebnisse des Versuchs mit der verfeinerten Messlinienanordnung nach 600'000 Zyklen (oben) und nach 1'000'000 Zyklen (unten). Es sind verschiedene Unterschiede an der Belagsoberfläche zu beobachten. Im oberen Bild erkennt man zwei Linien, eine obere sowie auch eine untere. Dies sind Linien für die Positionierung. Ein zweiter Unterschied ist, dass die mittlere Line kürzer ist. Der Grund dafür ist, dass einige in den Asphalt eingebettete Sensoren und Drähte am Ende des Versuchs entfernt wurden. Es ist auch deutlich zu sehen, dass die schwarzen Punkte in der Mitte des oberen Bildes im zweiten Bild nicht mehr zu finden sind.

Abb. 4.51 zeigt die gleiche Messlinienanordnung, aber in einer tieferen Lage. Im Bild unten sind deutlich die metallischen Teile der Sensoren in Weiss zu erkennen. Ein wesentlicher Unterschied zwischen dem unteren (600'000 Zyklen) und dem oberen Bild (1'000'000 Zyklen) ist, dass im oberen Bild ein schwarzer Fleck von der Mitte aus nach aussen wächst. Der Schatten entspricht einer Schichtablösung zwischen der ersten Asphalt-schicht und der zweiten Schicht. Diese Annahme wurde durch die Auswertung der Prüfkörper nach den Tests bestätigt, wie man später in Abb. 4.52 erkennen kann.

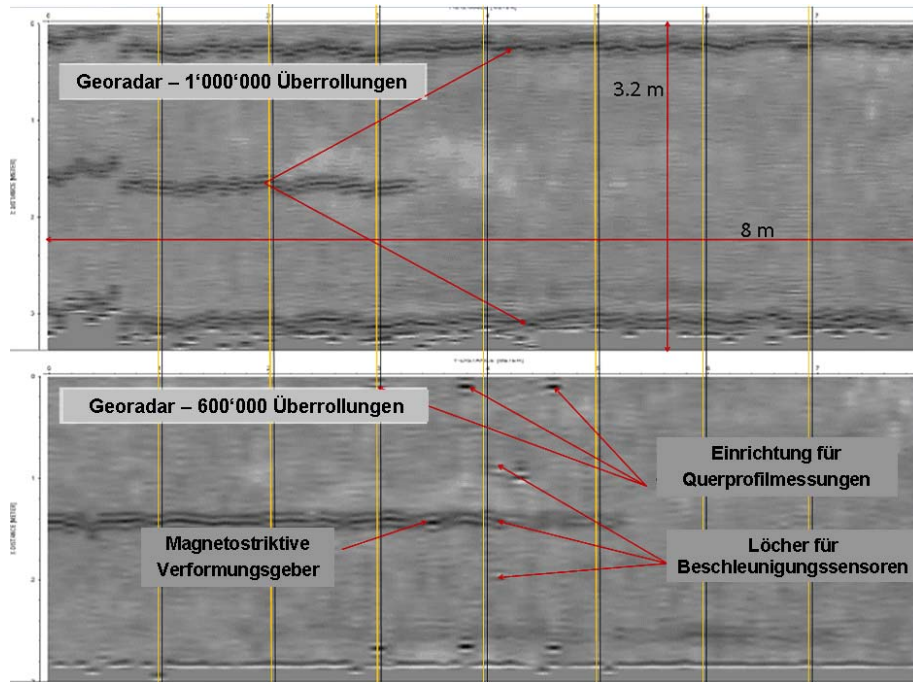


Abb. 4.50 Vergleich zwischen 600'000 Zyklen (unten) und 1'000'000 Zyklen (oben), Oberfläche

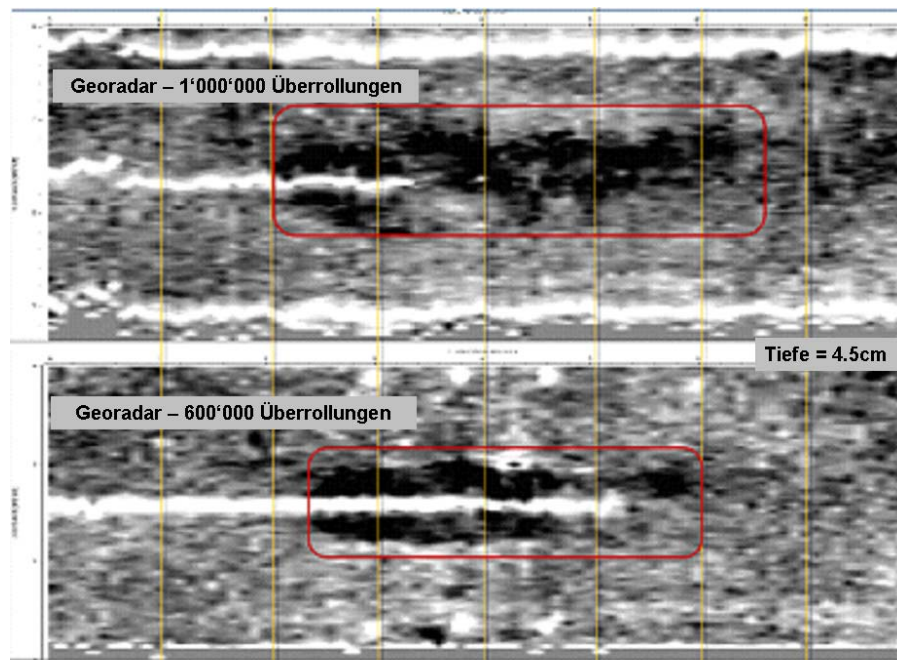


Abb. 4.51 Vergleich zwischen 600'000 Zyklen (unten) und 1'000'000 Zyklen (oben), Tiefe 4.5cm

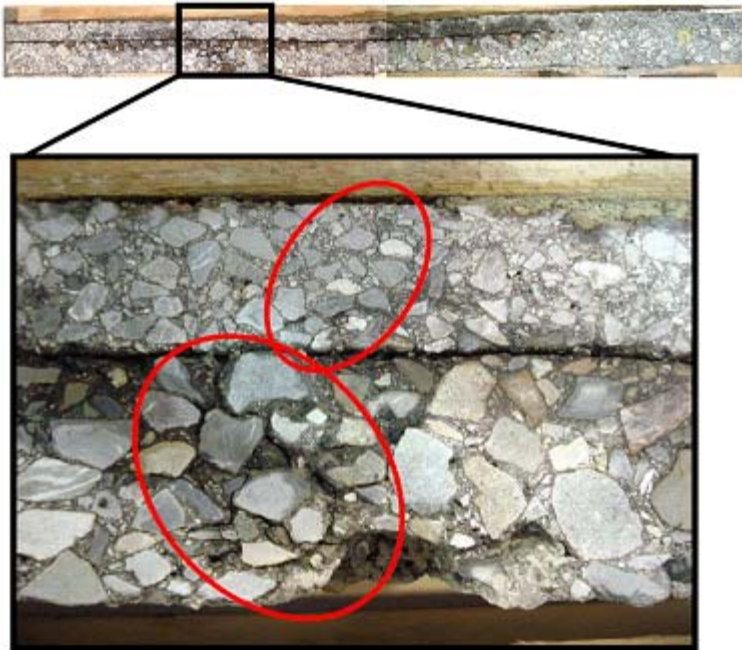


Abb. 4.52 Schichtablösung und Risse in einem Riegel nach 1'000'000 Zyklen

6.4.4 Deflektionsmessung mit dem ETH DELTA Gerät

6.4.4.1 Gerät

Das "ETH DELTA" Gerät zur Messung der Deflektionen ist eine neu entwickelte Einrichtung, um die Verformungsmulde unter einer Lastachse zu ermitteln ([11] Rabaiotti et al (2008)). Der Rahmen der Struktur besteht aus zwei 6m langen Hauptträgern und einem Rohr, welches in Querrichtung am vorderen Ende befestigt ist (Abb. 4.53). Auf diesem Querrohr befinden sich 11 bis 12 Finger an deren Spitzen hochpräzise Lasermessensoren (Keyence LK-G37) befestigt sind. Die beiden Hauptträger werden auf der Belagsoberfläche etwa 4.5m vom Lastpunkt abgestützt. Weil die Temperatur-änderungen während der Messung zu leichten Bewegungen des Geräts führen können, befinden sich zwei Spiegel für optische Laser-Sensor-Messungen an den Rohrenden, deren Bewegungen von zwei Punkten am hinteren Teil des Balkens in ca. 7m Entfernung gemessen werden (innerhalb der optischen Laser-Sensoren SITEK-PSD 2L10-SP).

Die Längs- und Querposition der Finger kann den in Querrichtung spezifischen Abmessungen der Achse angepasst werden sowie jenen Punkten auf der Belagsoberfläche, deren Messung die aussagekräftigste Information über die mechanischen Eigenschaften der Konstruktion, insbesondere mit Blick auf die inverse Analyse, erlaubt. Diese Eigenschaften des Gerätes haben sich während der Versuchsdurchführung als grosse Vorteile erwiesen, u. a. auch deshalb, weil die Längsausbreitung der Verformungsmulde sich über 4.5m erstreckte. Mit Hilfe der Bezugssensoren konnten die Bewegungen des Balkens weggefiltert werden.



Abb. 4.53 Das ETH DELTA Gerät im Betrieb

6.4.4.2 Prüfverfahren zum ETH DELTA Gerät

Die Idee der statischen Deflektionsmessung ist nicht neu. Üblicherweise wird dafür der sogenannte Benkelmannbalken verwendet. Diese Vorrichtung gestattet die Erfassung der Form der Verformungsmulde infolge einer Achslast. Das Gerät wird zunächst unter einer Achslast eines Lastwagens, typischerweise im Zwischenraum eines Doppelrades, positioniert. Anschliessend fährt der Lastwagen in definierten Entfernungsschritten weg, wobei die rückfedernden Verformungen gemessen werden.

Die Form der Deflektionsmulde ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen dem Abstand der Achslast und der gemessenen Vertikalverformung. Wird die Verformung im Punkt 0 unter der Last gemessen und danach die Last um eine Strecke d zum Punkt 1 bewegt, dann ist die im Punkt 0 gemessene Deflektion gleich jener im Punkt 1 vor der Bewegung der Last. Die rückfedernden Verformungen in Funktion des Fahrweges des Lastwagens ergeben die Deflektionsmulde. Dieses Prinzip gilt nur unter Annahme elastischen Verhaltens (auch nichtlinearem). Viskoses und plastisches Verhalten des Materials können nicht gemessen werden. Angenommen wird ausserdem eine in Längsrichtung homogene Prüfstrecke.

Das ETH DELTA Gerät stellt eine Verbesserung des Benkelmannbalkens dar. Die Deflektionen werden nicht nur an einem Punkt, sondern gleichzeitig in 11 bis 12 Punkten quer zur Achslast gemessen. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass sich die Füsse dank der freien Länge von 4.5m normalerweise nicht in der Deflektionsmulde abstützen. Mit dem Gerät können auch viskose und plastische Effekte quer zur Lastrichtung berücksichtigt und die dreidimensionale Form der Verformungsmulde bestimmt werden. Die Form der Deflektionsmulde in Querrichtung wird gemessen, während der Lastwagen in Lastposition steht (auf diese Weise können die viskosen Effekte erfasst werden), um die dreidimensionale Form aus dem Verhältnis zwischen Fahrdistanz und Deflektion zu ermitteln.

6.4.4.3 Prüfergebnisse

6.4.4.3.1 Statische Deflektionsmessungen

Die statischen Deflektionsmessungen wurden mit einer Achslast von 100kN durchgeführt, indem sich ein Lastwagen zunächst in Richtung auf das ETH DELTA Gerät hinbewegt und dann nach einigen Minuten wegbewegt wurde. Während des Be- und Entlastens wurden vernachlässigbar kleine, plastische und viskose Deformationen festgestellt, d.h. solche, unterhalb der Messauflösung des Gerätes von ca 0.01mm. Die tiefen Messwerte sind sowohl auf die relativ tiefen Temperaturen während der Untersuchung als auch auf

den relativ dünnen Asphaltbelag auf steifer Zementstabilisierung zurückzuführen. Vernachlässigbar war auch die Wirkung der Temperaturänderungen im Bereich von 2°C bis 17°C, zumal diese lediglich das Verhalten des Asphaltbelags betreffen.

In Abb. 4.54 sind die rückfedernden Deflektionsmulden nach verschiedenen Überrollzyklen mit der MLS10 dargestellt. Es ergeben sich folgende Feststellungen:

- 0 Überrollungen: Die Deflektionsmulde ist in Längsrichtung sehr ausgedehnt (>6m) und besitzt eine geringe Tiefe von 0.15mm in 10cm Entfernung von der Seitenwand des Reifens. Die Deflektionsmulde ist in der Mitte der Achslast tiefer als in Radnähe.
- 100'000 Überrollungen: Die Form der Deflektionsmulde ändert sich beträchtlich. Die Tiefe bleibt weitgehend ähnlich.
- 600'000 Überrollungen: Die Ausdehnung in Längsrichtung und die Tiefe der Deflektionsmulde vergrössern sich. Die Schädigung konzentriert sich auf den Rollweg.
- 1'000'000 Überrollungen. Die Ausdehnung in Längsrichtung sowie die Tiefe der Deflektionsmulde wachsen weiter an. Zwei Haupttrisse in Längsrichtung beginnen sich abzuzeichnen. Der Oberbau verliert seine Tragwirkung als Mehrschichtstruktur.

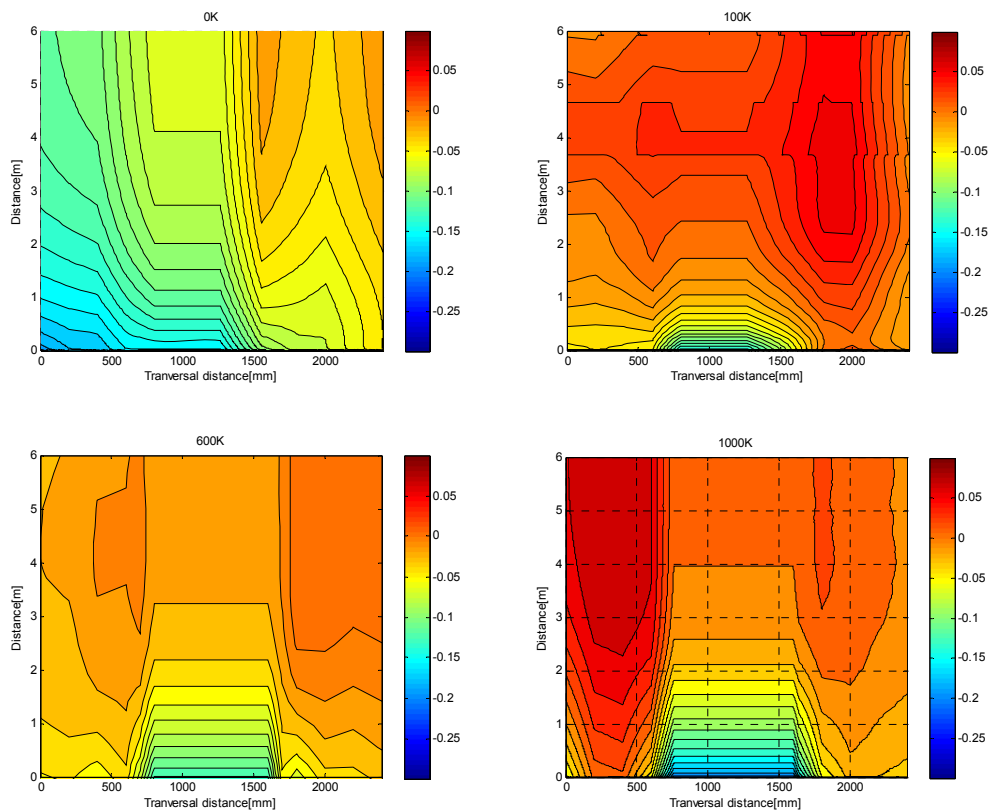


Abb. 4.54 Deflektionsmulde nach 0, 100'000, 600'000 und 1'000'000 Überrollungen

Diese Resultate zeigen, dass sich das Verhalten des Testfeldes gegenüber der statischen Belastung durch die Überrollungen mit der MLS10 signifikant verändert hat.

6.4.4.3.2 Dynamische Deflektionsmessungen

Für die dynamischen Deflektionsmessungen während der Belastung mit der MLS10, wurde die Konfiguration des Balkens leicht verändert, so dass dieser unter der MLS10 plaziert werden konnte (Abb. 4.55 Abb. 4.59). Die Messungen wurden bei verschiedenen Lasten (40kN, 50kN, 60kN, 65kN) und unterschiedlichen Geschwindigkeiten (1.5m/s, 3.0m/s) durchgeführt. Wie aus

Abb. 4.56 und Abb. 4.57 hervorgeht, waren im betrachteten, relativ engen Spektrum kei-

ne Abhängigkeiten der dynamischen Deflektionen von den Überrollgeschwindigkeiten feststellbar. Dies ist in Übereinstimmung mit den statischen Deflektionsmessungen, welche keinen Einfluss der Materialviskositäten erkennen liessen. Bezüglich Einfluss der Lasten ergibt sich aus Abb. 4.58, dass unter den gegebenen Bedingungen sich der absolute Wert der Vertikalverschiebung bei unterschiedlichen Lasten nicht signifikant verändert, während sich die Deflektionsmulde in seitlicher Richtung ausdehnt.



Abb. 4.55 Messpunkte unter der MLS10

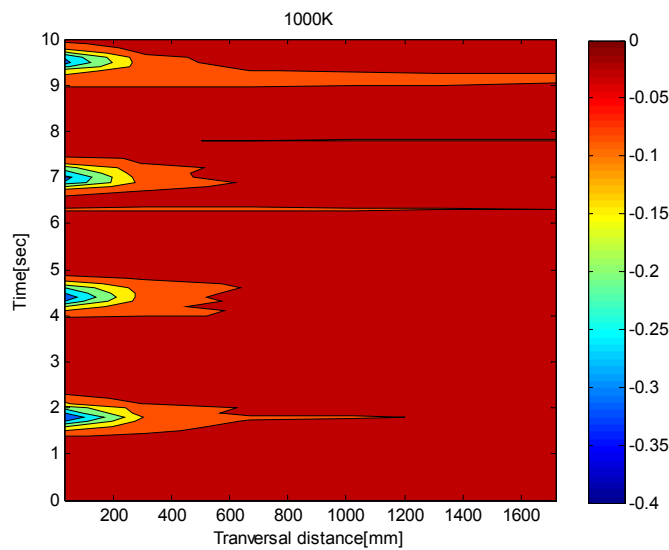


Abb. 4.56 dynamische Deflektion bei 1.5 m/s

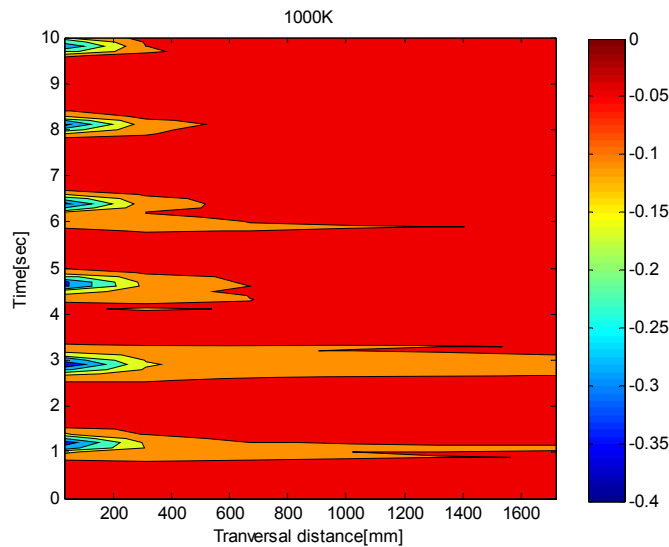


Abb. 4.57 dynamische Deflektion bei 3 m/s

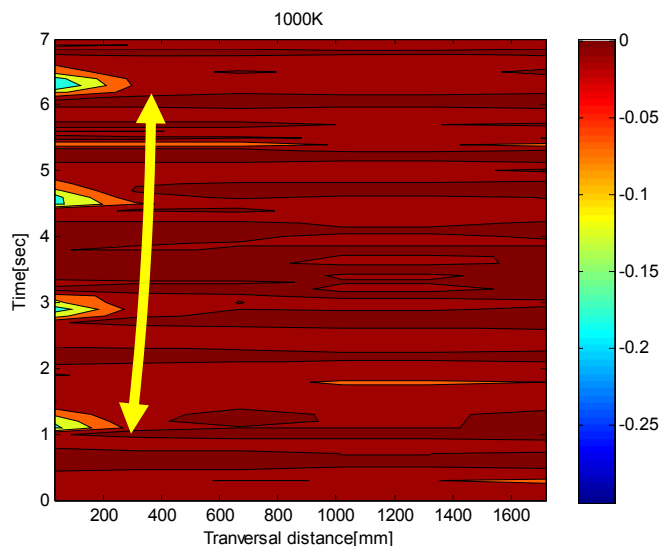


Abb. 4.58 dynamische Deflektion bei verschiedenen Lasten: von oben nach unten (65kN, 60kN, 50kN, 40kN)

6.4.4.4 Entnahme von Belagsausschnitten

Nach einer Million Überrollungen wurde eine forensische Untersuchung durch Entnahme von Belagsausschnitten in der Mitte des Rollweges in Querrichtung durchgeführt (Abb. 4.59). Es zeigte sich, dass unter den Doppelrädern (Pfeile) der gesamte Asphaltbelag ohne wesentliche Dickenänderung in die erste Schicht der Zementstabilisierung durchgestanzt wurde. Tatsächlich war die Zementstabilisierung unter dem Überrollweg so sehr geschädigt, dass keine Entnahme von Bohrkernen mehr möglich war. Beidseitig des Überrollweges, in den Bereichen A-A und B-B, traten über die ganze Belagtiefe Risse auf (vgl. auch Abb. 6.33). Zusätzlich bildete sich zwischen Deckschicht und Binderschicht eine grossflächige, deutliche Lagentrennung. Diese Beobachtungen bestätigten sowohl die Resultate der Deflektionsmessungen mit dem ETH DELTA Gerät als auch die in Abschnitt 6.4.3.4 beschriebenen Messungen mittels Georadar klar.

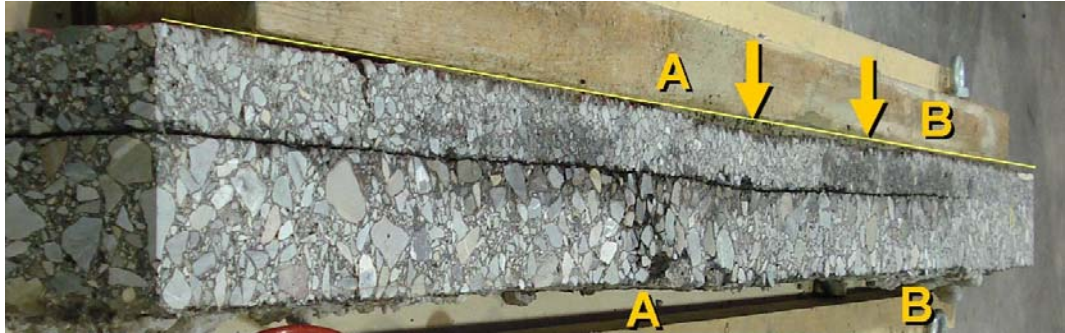


Abb. 4.59 Belagsausschnitt aus dem befahrenen Querschnitt nach 1 Million Überrollungen

6.4.5 Dynamische Belagsverformung unter den Rädern

6.4.5.1 Einführung

Um die dynamische, vertikale Belagsverformung und den strukturellen Zustand des Belags unter den Rädern zu ermitteln, wurden im Überrollweg drei Beschleunigungssensoren zur Erfassung der Vertikalbeschleunigungen im Belag und ein magnetostriktiver Weggeber eingebaut. Diese Sensoren wurden vor Beginn der Versuche installiert und lieferten Messwerte, die periodisch nach verschiedenen Überrollzahlen erfasst wurden.

Magnetostriktiver Weggeber

Dieser von der Empa entwickelte Sensor wurde bereits in verschiedenen Publikationen ausführlich beschrieben (z.B. Anderegg et al 2001). Er besteht aus einem lotrecht in den Belag eingeführten Rohr, welches einen magnetostriktiven Stab als magnetostriktiven Wellenleiter umschliesst und an dessen oberem Ende ein Aufnehmerkopf mit Messelektronik sitzt (Abb 6.42). Der magnetostriktive Stab besteht aus einer speziellen Metallegierung. Entlang des Rohres sind mehrere Positionsmagnete angeordnet, die im Belag auf stufenförmig gebohrten Absätzen sitzen. Ein elektrischer Impuls erzeugt an den Stellen der Positionsmagnete eine Torsionswelle, welche sich mit Schallgeschwindigkeit ausbreitet. Das Messprinzip beruht auf einer Laufzeitmessung dieser Welle; mit bekannter Schallgeschwindigkeit wird die linear abhängige Position bestimmt. Nach einem Startimpuls erzeugt jeder Positionsmagnet eine Antwortwelle, und die Zeitverzögerung wird gemessen. Die Auflösung des Aufnehmers liegt bei $2\ \mu\text{m}$. Kleine Permanentmagnete genügen, um diese Welle auszulösen. Das System ist hermetisch gekapselt und funktioniert berührungslos.

Beschleunigungssensoren

Beschleunigungssensoren sind in einem weiten Spektrum an Grössen und Messcharakteristika verfügbar. Die Beschleunigung wird im wesentlichen über die Kraft gemessen, die bei der Beschleunigung einer definierten Masse infolge Massenträgheit auf eine Feder einwirkt. Diese Kraft ist bei bekannter Masse proportional zur Beschleunigung. Die Beschleunigung kann Auskunft über die Schädigung der Belagsstruktur geben, wenn die Beschleunigung durch zweimalige Integration in Belagsdeformationen umgerechnet wird. Details hiezu finden sich in [7] Arraigada et al. (2007)

6.4.5.2 Versuchsanordnung

Abb. 4.60 veranschaulicht die Position der Beschleunigungssensoren und der magnetostriktiven Messgeber (MD in der Figur) im Belag sowie die Dicke der Belagsschichten. Zwei Magnete (bezeichnet mit einem blauen M in

Abb. 4.61) wurden -120mm und -719mm unter der Belagsoberfläche installiert; die Referenzbasis lag bei -30mm . Daraus ergeben sich die in der Abbildung blau bezeichneten relativen Messlängen des magnetostriktiven Sensors $M1=90\text{mm}$ und $M2=689\text{mm}$. Gleichzeitig wurden drei PCB Beschleunigungssensoren in -30mm (Sensor A1), -90mm

(Sensor A2) und -120mm (Sensor A3) Tiefe in separaten Bohrlöchern eingebaut, die in einer Linie zum magnetostriktiven Sensor und im gegenseitigen Abstand von 500mm zu einander lagen (Abb. 4.60) Die Datenerfassung der Verformungen und der Beschleunigungen erfolgte separat, da der magnetostriktive Sensor ein spezielles, digitales Datenerfassungsgerät benötigt, welches nicht kompatibel mit dem analogen Datenerfassungssystem der Beschleunigungssensoren war.

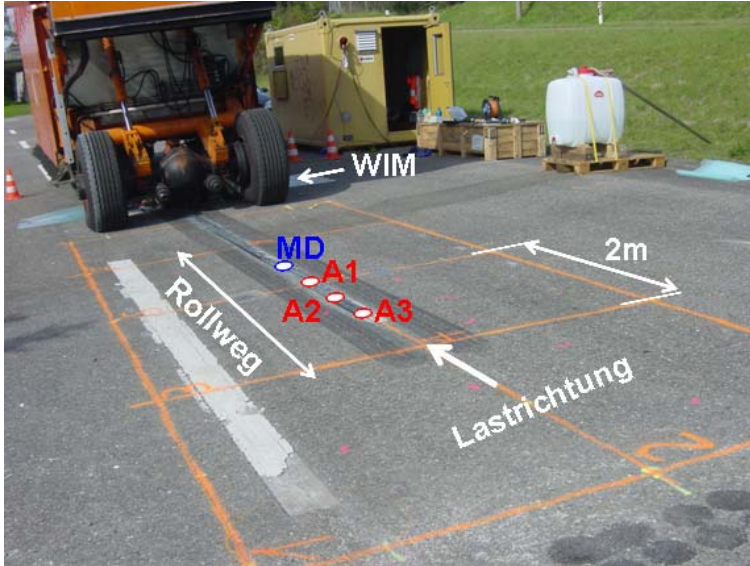


Abb. 4.60 Lage der magnetostriktiven Verformungsgeber (MD), der Beschleunigungssensoren (A1, A2, A3) und von WIM (Loading path: Rollweg, Loading direction: Rollrichtung)

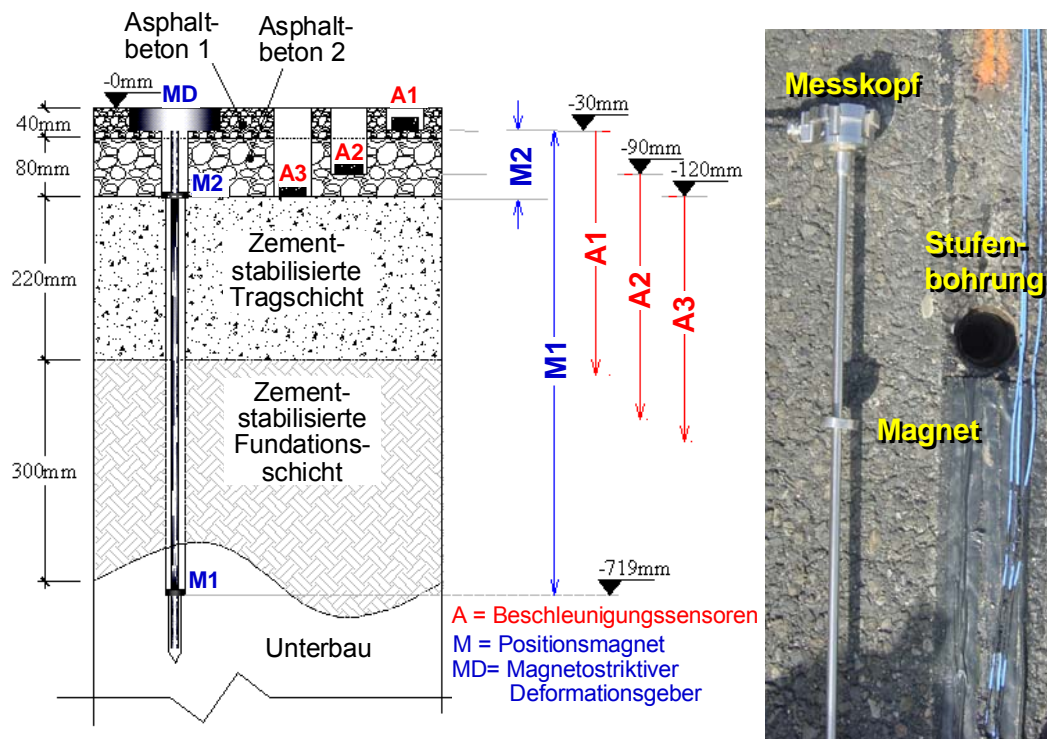


Abb. 4.61 Lage der Beschleunigungssensoren (A1, A2, und A3) und der Magnete der magnetostriktiven Verformungsgeber (M1 und M2) im Belag

6.4.5.3 Versuchsergebnisse

Die vertikalen Verformungen nach 413'000 und 1'011'000 Überrollungen, die mit dem magnetostriktiven Verformungsgeber an den Stellen der Positionsmagnete M1 und M2 bei einer Überrollgeschwindigkeit von 6m/s und einer Soll-Last von 65kN in allen vier Belastungsschemeln gemessen wurden, sind in Abb 6.41 (a und b) dargestellt. Demnach nehmen die bei Magnet M1 gemessenen Verformungen infolge Schädigung der Belagsstruktur deutlich zu, während die Verformungen bei M2 vernachlässigbar klein bleiben.

Die entsprechenden Deflektionen aus den Beschleunigungsmessungen A1, A2 und A3 sind aus Abb. 4.63 (a und b) ersichtlich. Erwartungsgemäss nehmen die Verformungsamplituden in Funktion der Tiefe ab. Entsprechend liefert der Beschleunigungssensor A1 grössere Verformungen als A2 und A3. Ein Vergleich der Kurven a und b in der Abbildung bestätigt, dass ein merkbarer Zuwachs der Deflektionen durch die Belagsschädigung infolge Verkehrsbelastung mit der MLS 10 besteht. Die Verformungen aus der Messung des magnetostriktiven Gebers und eines Beschleunigungssensors in Funktion der Belastungsgeschichte der MLS10 sind in Abb. 4.64 wiedergegeben. Die Figur bestätigt, dass die Verformung, und entsprechend die strukturelle Schädigung des Belags, mit steigender Überrollzyklenzahl der MLS10 zunimmt.

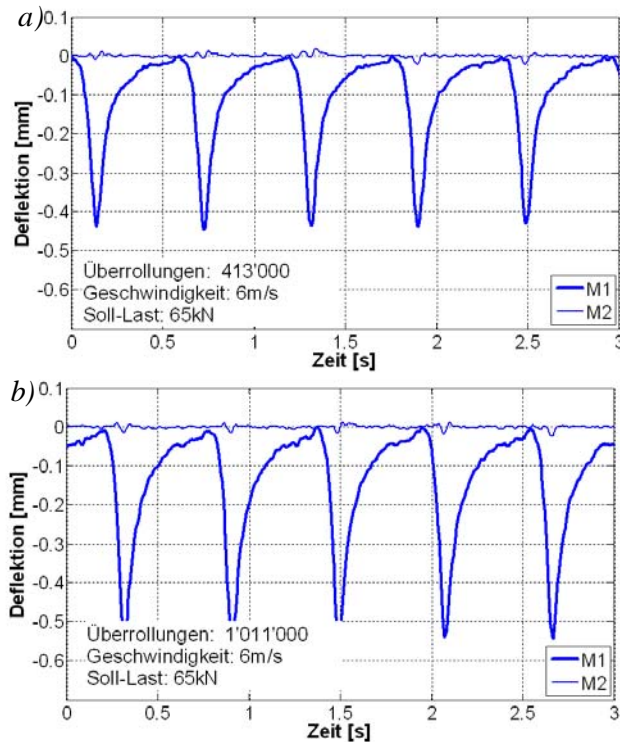


Abb. 4.62 Deflektion gemessen an den Stellen der Positionierungsmagnete M1 und M2 infolge Belastung durch MLS10 bei einer Geschwindigkeit von 6m/s und einer Soll-Last von 65kN, nach a) 413'000 und b) 1'011'000 Überrollungen

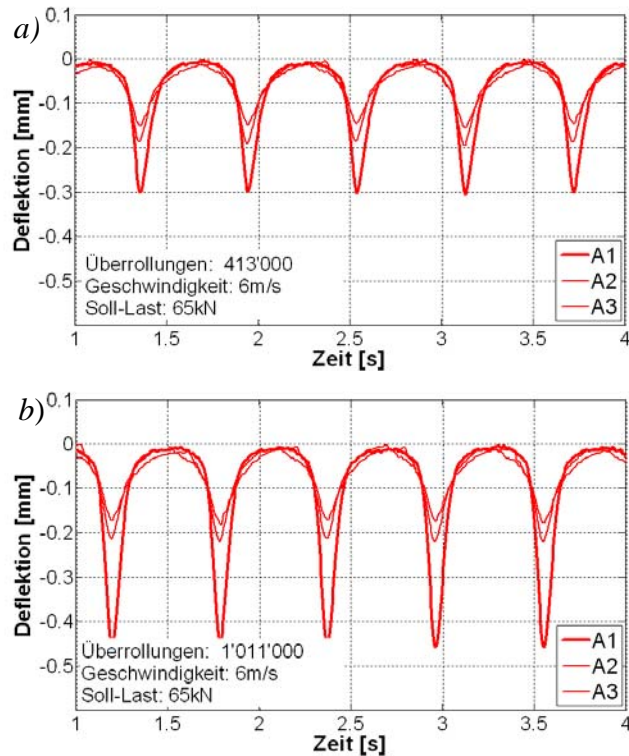


Abb. 4.63 Deflektion berechnet aus den Daten der Beschleunigungssensoren A1, A2 und A3 infolge Belastung durch MLS10 bei einer Geschwindigkeit von 6m/s und einer Soll-Last von 65kN, nach a) 413' 000 und b) 1'011'000 Überrollungen

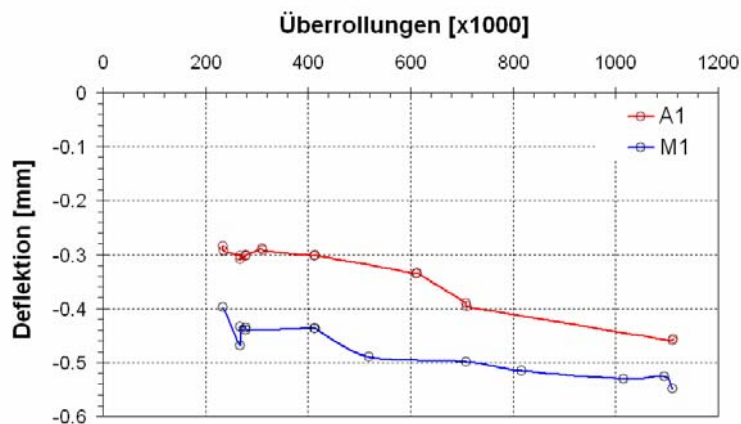


Abb. 4.64 vertikale Belagsverformungen ermittelt mit dem Beschleunigungssensor A1 und dem magnetostriktiven Weggeber an Position M1 in Funktion der Überrollungen

6.4.6 Seismischer Modul des Belags ermittelt mit dem Portable Seismic Pavement Analyzer (PSPA)

6.4.6.1 Einleitung

Der sog. Portable Seismic Pavement Analyzer (PSPA) ist ein Gerät zur zerstörungsfreien Bestimmung von Steifigkeitsprofilen durch den Belagsquerschnitt, basierend auf dem dispersiven Charakter von Oberflächenwellen des Raleigh Typs. Die PSPA Technik nutzt

eine Spektralanalyse von Oberflächenwellen im Ultraschallbereich (Spectral Analysis of Ultrasonic Surface Waves, SASW), um den charakteristischen, seismischen Modul des untersuchten Materials und damit auch die Steifigkeit des Materials zu bestimmen. Details zum PSPA finden sich bei [8] Nazarian et al (2002), [9] Mallick et al (2005) und [10] Celaya et al (2006).

6.4.6.2 Gerät

Der PSPA besteht aus zwei Ultraschallempfängern, einer Ultraschallquelle und einem Spektralanalysator, welcher die analogen, elektrischen Signale der Empfänger in numerische Daten umwandelt. Der Abstand zwischen der Quelle und beiden Empfängern ist fest eingestellt und bestimmt die Einstellung des Gerätes. Im konkreten Fall wurde eine Einstellung „short setup“ für oberflächennahe Schichten gewählt. Dabei wurden der erste Empfänger 0.102m und der zweite 0.203m von der Quelle positioniert.

Das Gerät ist zudem mit einem Thermometer an einem seiner Stützfüsse ausgerüstet, um spätere Temperaturkorrekturen der Messungen vornehmen zu können. Ein Problem besteht darin, dass die aufgezeichnete Oberflächentemperatur nicht mit der Temperatur im Materialinneren übereinstimmt. Um die daraus resultierenden Ungenauigkeiten zu vermeiden, wurden für erste Messungen zudem Thermolemente in 0, 5, 10 und 15cm Tiefe des Belages in einer beschatteten Zone eingebaut. Später wurde der Referenzpunkt mit einem Thermometer in 2cm Tiefe des Belages ausgerüstet.

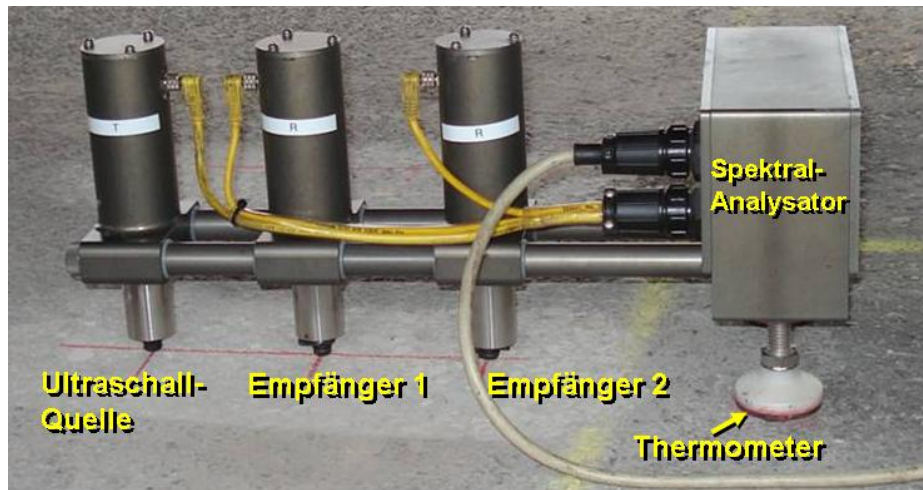


Abb. 4.65 PSPA (Portable Seismic Pavement Analyzer) -Gerät

6.4.6.3 Theorie

Rayleigh Wellen

Die Raleigh Welle oder „Bodenrollen“ ist eine Oberflächenwelle, die sich auf der Oberfläche fortbewegt, wobei gleichzeitig elliptische, rollende Bewegungen der Partikel in Gegenrichtung zur Wellenfortpflanzungsrichtung auftreten (Abb. 4.66). Diese elliptischen Bewegungen nehmen exponentiell mit der Tiefe ab. Die Raleigh Wellen sind das Resultat einer Interferenz zwischen longitudinal zur Ausbreitungsrichtung verlaufenden Verdichtungswellen, sog. P-Wellen, und der Vertikalkomponente von transversal zur Wellenausbreitung verlaufenden Schubwellen, sog. S-Wellen, wie sie typischerweise bei Materialien mit einer Poissonzahl über 0.35 auftreten können. Die Geschwindigkeit der Raleigh Welle (v_r) ist geringer als jene der P-Wellen, aber näherungsweise ähnlich jener der S-Wellen. Sie ist kaum abhängig von der Grösse der Poissonzahl. Typisch für Raleigh Wellen ist ihre Dispersion. Dies bedeutet, dass ihre Phasengeschwindigkeit von der Wellenlänge abhängt, wobei die Annahme gilt, dass sich Wellen mit kurzer Periode an der Materialoberfläche und solche mit langer Periode tiefer im Material fortbewegen (vgl. Abb. 4.67). Bei gleichmässig geschichteten Materialien kann angenommen werden, dass das mittlere Materialverhalten etwa dem Verhalten in einer Tiefe von 0.33- bis 0.5-mal der Wellenlänge entspricht (je nach Literaturquelle).

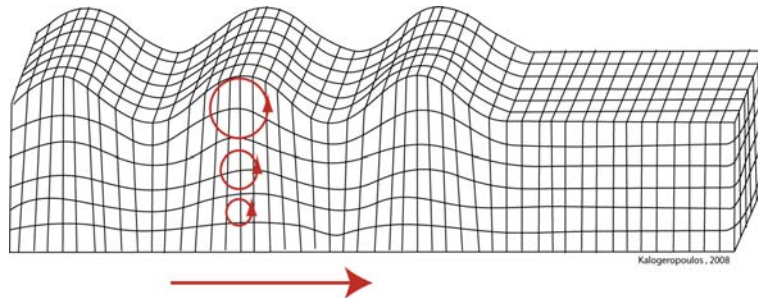


Abb. 4.66 Fortpflanzung der Raleigh Oberflächenwellen

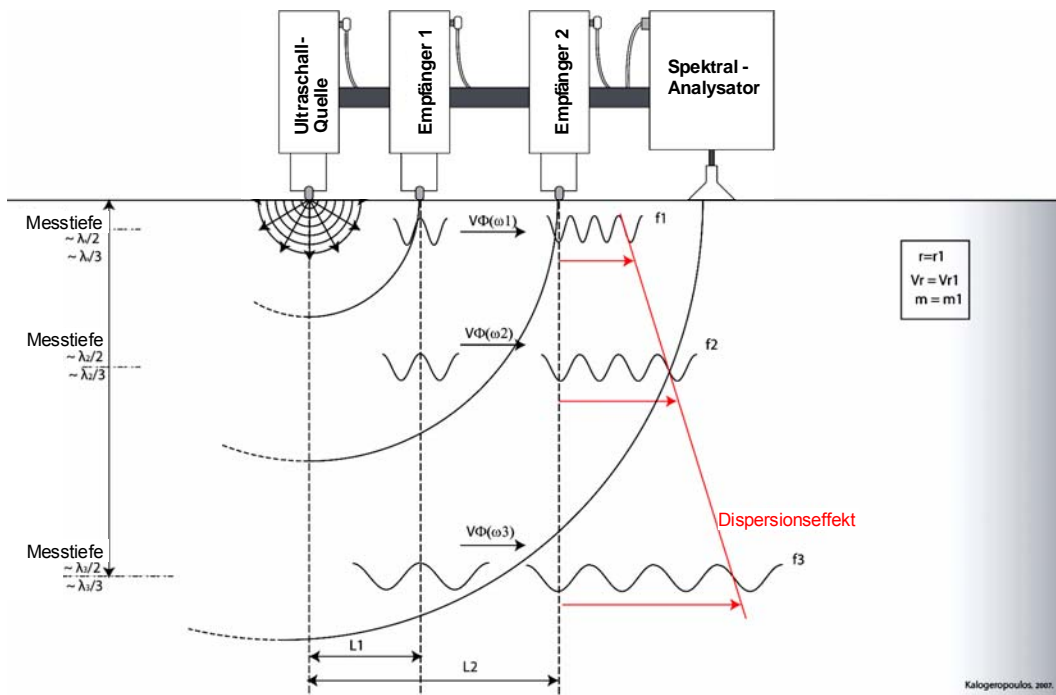


Abb. 4.67 PSPA Theorie

6.4.6.4 Versuchsanordnung

Die PSPA Messungen wurden an 24 gitterförmig angeordneten Messpunkten (vgl. Abb. 4.68) im Bereich des Rollweges jeweils nach 0, 50'000, 100'000, 200'000, 300'000, 500'000, 650'000, 980'000 Überrollungen durchgeführt ([16] Kalogeropoulos (2008)). Im folgenden werden die Daten an der Position 0m der linken und rechten Radspur näher erläutert.

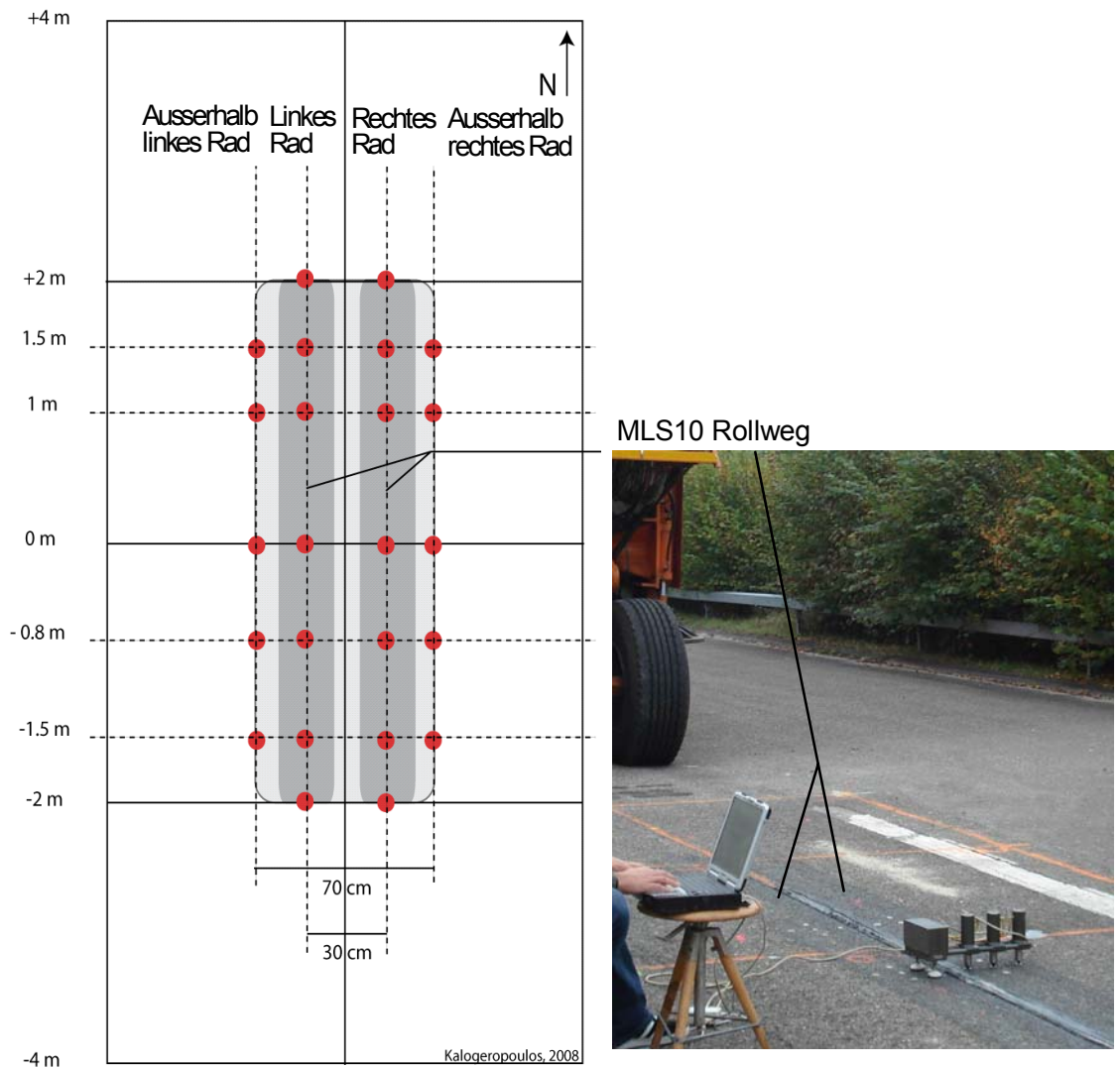


Abb. 4.68 PSPA Messungen

6.4.6.5 Datenanalyse

Datenverarbeitung

Die Methode verwendet die Energie der Oberflächenwellen, um die Veränderung der Geschwindigkeit der Oberflächenwellen bzw. Modul in Funktion der Wellenlänge bzw. Tiefe zu bestimmen (siehe Abb. 6.48). Zunächst wird mittels Fast Fourier Transformation eine Dispersionskurve, d.h. die Phasengeschwindigkeit in Funktion der Wellenlänge ermittelt. Anschliessend wird durch inverse Analyse die Dispersionskurve mit einer theoretischen für Böden ermittelten Dispersionskurve verglichen und aus der Regressionskurve zwischen Modell und Messung der charakteristische, seismische Modul in Funktion der Tiefe konstruiert. Bei der Datenverarbeitung sind zwei zusätzliche Schritte durchzuführen. Beim ersten Schritt handelt es sich um die Zuordnung der Daten zu den verschiedenen Belagsschichten. Der zweite Schritt betrifft die Normierung der Steifigkeit auf eine bestimmte Bezugstemperatur.

Charakterisierung der Belagsschichten

Um die Veränderung der Steifigkeit der verschiedenen Belagsschichten verfolgen zu können, wurde eine Identifikationsmethode entwickelt. Zunächst wurde ein Tiefengrenzwert in den PSPA Werten definiert, der die Geometrie aus Bohrkernen und Georadar-

messungen berücksichtigte (Abb. 4.69). Anschliessend wurden die massgebenden Steifigkeiten der jeweiligen Tiefe und den Schichten zugeordnet. Dabei war zu beachten, dass die PSPA Messungen in Tiefenrichtung gewisse Ungenauigkeiten aufwiesen, die hauptsächlich auf der inversen Analyseprozedur und der ungenügenden spektralen Auflösung des Gerätes bei tieferen Frequenzen beruhte, zumal die Ultra-schallwellen zu schwach in der Tiefe waren. Ausserdem wurde eine Streuung im Hochfrequenzbereich festgestellt, die sich in den ersten 0 bis 7cm auf die Qualität der Daten auswirkte und durch Inhomogenitäten der Belagsoberfläche hervorgerufen wurde. Um all diesen Effekten Rechnung zu tragen, wurden zunächst nur die Daten in einer Tiefe zwischen 5 und 35cm berücksichtigt (d.h. ohne die Deckschicht) und anschliessend mittels der Georadardaten an den PSPA Messpunkten die Grenze zwischen der ersten und zweiten Stabilisierungsschicht bestimmt. Die Tiefe dieser Grenze wurde dann der entsprechenden Steifigkeitsänderung in den PSPA Daten (obere Stabilisierungsschicht steifer als untere) zugeordnet. Die Grenze zwischen dem Asphaltbelag und der oberen Stabilisierungsschicht wurde als konstant angenommen und war durch die PSPA Messungen gut definiert.

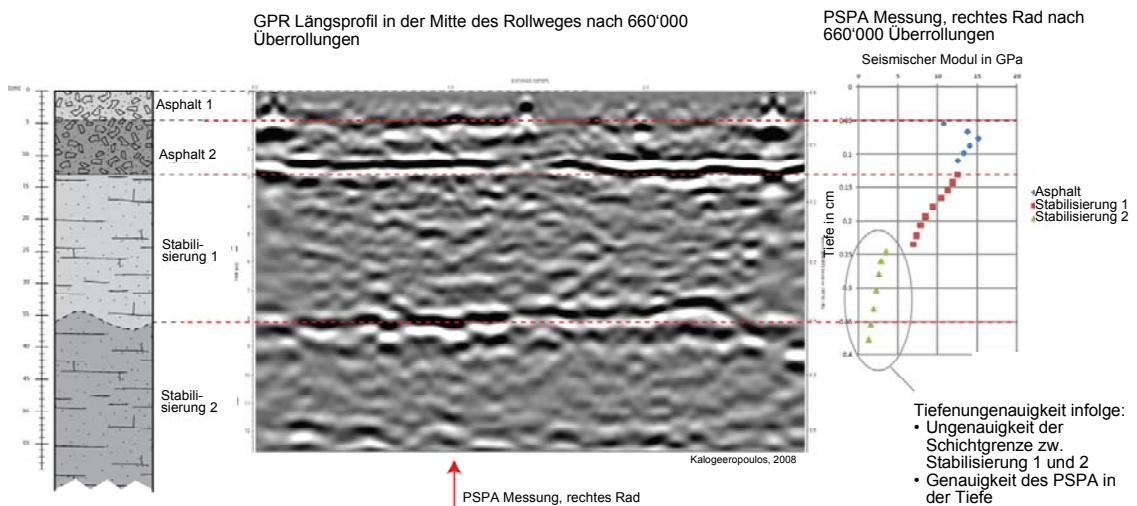


Abb. 4.69 Schichtaufbau und Bestimmung der Schichten mit verschiedenen Methodologien

Berücksichtigung der Temperatur

Zunächst wurde der Zusammenhang zwischen der Temperatur jedes Sensors (-5cm, -10cm, -15cm) und der ermittelten PSPA Steifigkeit bei der entsprechenden Tiefe bestimmt. Dabei sind zwei Einschränkungen zu erwähnen. Einerseits wurden die PSPA Messungen nicht genau zur selben Zeit der Temperaturmessung durchgeführt, andererseits entspricht die betrachtete Tiefe der PSPA Messung einem Mittelwert im Bereich von 1cm und somit nicht der exakten Position des Sensors. Aus Abb. 4.70 geht hervor, dass bei jeder Tiefe eine lineare Beziehung zwischen der Temperatur und dem seismischen Modul besteht. Dabei fällt auf, dass diese Beziehung bei jeder Tiefe unterschiedlich ist, weshalb es erforderlich ist, die Veränderung der linearen Koeffizienten in Funktion der Tiefe zu bestimmen.

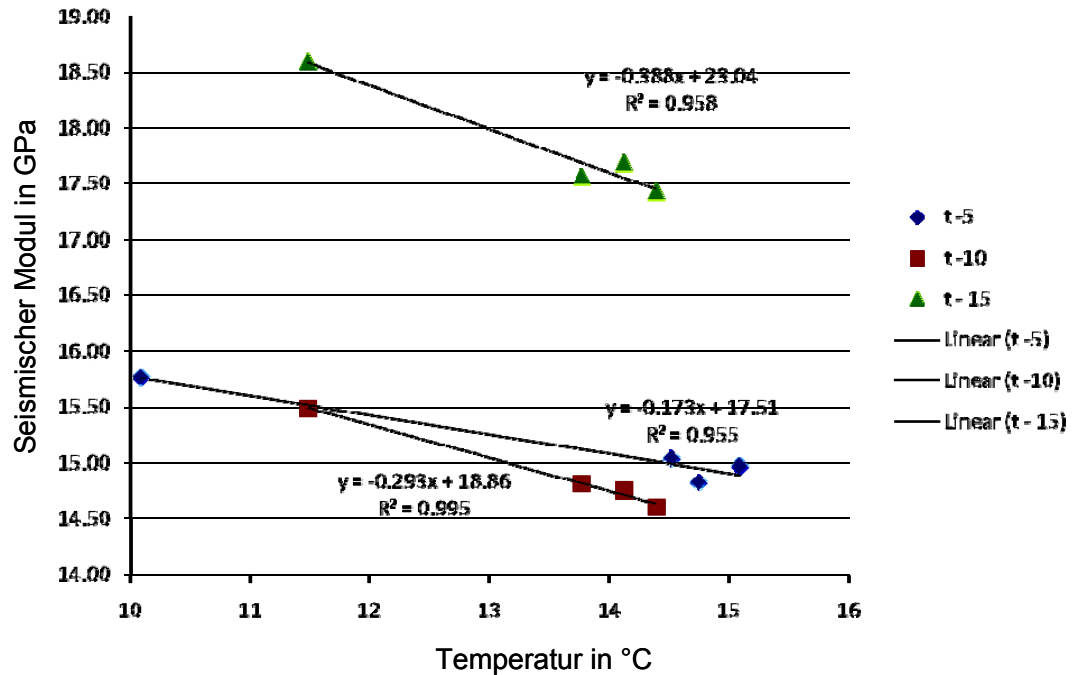


Abb. 4.70 seismischer Modul in Funktion der Temperatur in drei Tiefen $t=5, 10, 15$ cm

6.4.6.6 Versuchsergebnisse

Die Mittelwerte aus den Messungen der einzelnen Schichten in der Achse der linken Fahrspur sind in Abb. 4.71 und jene der rechten Fahrspur in Abb. 4.72 in Funktion der Überrollungen dargestellt. Der Verlauf beider Grafiken zeigt, dass der Modul in Funktion der Tiefe generell abnimmt. Der Modul der betrachteten Asphalt-schicht liegt nach ca. 200'000 Überrollungen zwischen 8...15 GPa, jener der oberen Stabilisierung zwischen 5...10GPa und jener der unteren Stabilisierung im Bereich von 1...5GPa. Bezüglich der einzelnen Schichten ist festzustellen, dass in Funktion der Überrollungen der Modul des Asphaltbelages im wesentlichen konstant bleibt und jener der Stabilisierungen mit der Zeit eher abzufallen scheint. Dies wird insbesondere auch aus dem Tiefenprofil in Abb. 6.52 deutlich.

Während der ersten Belastungsphase bis 50'000 Überrollungen wurde insbesondere in der linken Spur der unteren Stabilisierung partiell eine Versteifung festgestellt. Inwieweit dies als anfängliche Verdichtung interpretiert werden darf, konnte nicht eruiert werden. Bei Versuchsbeginn lagen die Steifigkeiten aller Schichten in der linken Fahrspur zwischen 5.5 und 9.5GPa und in der rechten Fahrspur die Resultate zwischen 4GPa und 15GPa.

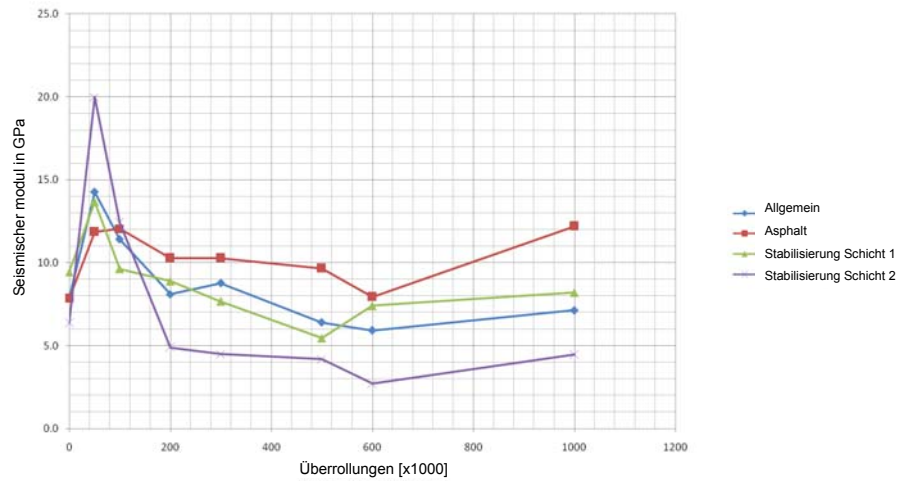


Abb. 4.71 Verlauf des seismischen Moduls in Funktion der Überrollungen in der Mittellinie der linken Radspur

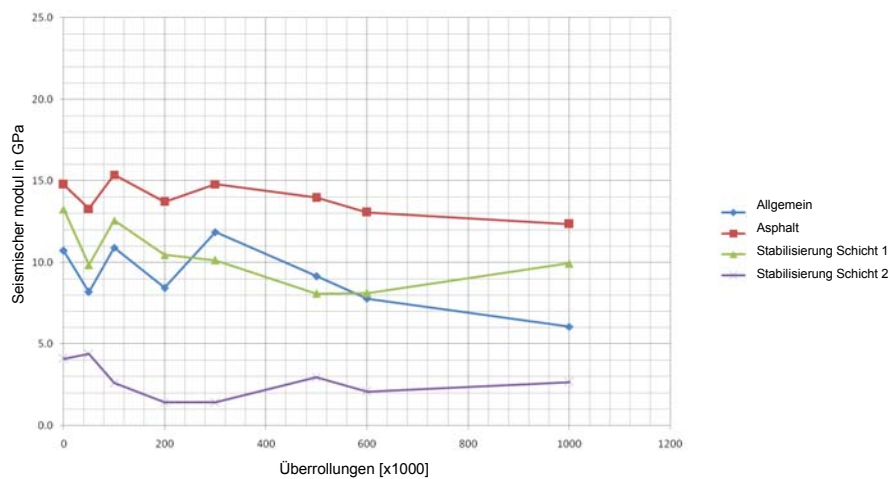


Abb. 4.72 Verlauf des seismischen Moduls in Funktion der Überrollungen in der Mittellinie der rechten Radspur

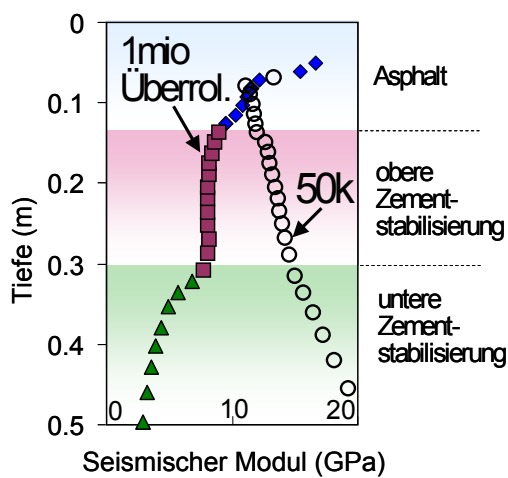


Abb. 4.73 seismischer Modul nach 50'000 und 1'000'000 Überrollungen in Rollwegmitte des linken Rades

Schlussfolgerungen

Die in diesem Projekt durchgeführte Evaluation einschliesslich praktischer Eignungstest einer mobilen Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen im Massstab 1:1 auf der Teststrecke in Hinwil hat gezeigt, dass die MLS10 Grossversuchsanlage verglichen mit anderen Einrichtungen, namentlich der französischen FABAC, wesentliche Vorteile aufweist und die gestellten technischen Anforderungen an die Grossversuchsanlage am besten zu erfüllen vermag. Es wurde festgestellt, dass die MLS10 einen geeigneten modernen und zukunftsgerichteten Ersatz für die abgebrochene stationäre Rundlaufanlage des Instituts für Geotechnik der ETHZ-IGT auf dem Areal der EMPA darstellt. Aufgrund dieser Ergebnisse wird gemäss gemeinsam von Empa und IGT vorgeschlagenen Forschungs- und Beschaffungskonzept die Anschaffung der MLS10 für die Schweiz empfohlen.

Die untersuchte MLS10 ist eine neu entwickelte Maschine, die bereits für mehrere Millionen Überrollungen eingesetzt wurde. Es kann davon ausgegangen werden, dass die „Kinderkrankheiten“ beseitigt wurden. Andererseits kann die Tatsache nicht übersehen werden, dass es sich beim konkreten Gerät um eine gebrauchte Anlage und einen Prototyp handelt.

Die MLS10 Anlage kann ähnliche strukturelle Schäden unter realen Achslasten in erheblich kürzerer Zeit erzeugen als im Betrieb während der gesamten Lebensdauer einer Strasse. Im vorliegenden Fall von Hinwil wurde eine Schädigung, die in 20 Jahren infolge etwa 5.5...6.5 Millionen Einheitsachslasten à 81.6kN an einem Asphaltbelag auf Zementstabilisierung aufgetreten wäre im Bereich von etwa 600'000 Überrollungen mit Einheitsachslasten von 130kN erreicht. Diese Anzahl Lastzyklen kann von der MLS10 theoretisch (d.h. ohne Wartungs- und Messunterbrüche) in ca. 100h Betrieb aufgebracht werden. Nicht simuliert werden kann der Einfluss des Klimas und der Belagsalterung (z.B. durch Oxidation)

Die Folgerung bezüglich Eignung der MLS10 zur Erzeugung von Strukturschäden basiert auf den folgenden Messungen:

Messungen an der MLS10 Maschine

Die Messung der Überrollkräfte auf der Brückenwaage der Kantonspolizei Betzholz/Hinwil sowie dynamischer Lastmessung mit einem Weigh In Motion Sensor (WIM) zeigen, dass zur Einstellung der Soll-Lasten an den einzelnen Belastungsschemeln Zusatz-Kalibrierungen z.B. mit mobilen Waagen vorzunehmen sind, um sicherzustellen, dass die Soll-Lasten tatsächlich mit den tatsächlich wirkenden Kontaktkräften zwischen Rad und Belag übereinstimmen. Aufgrund der WIM Messungen darf angenommen werden, dass die Kontaktkräfte auf dem 4m langen Rollweg in den mittleren 3m konstant sind.

Untersuchung der Veränderung des Belagszustandes infolge Überrollungen

Die MLS10 Beanspruchung führte schon nach relativ kurzer Zeit zu deutlicher Spurbildung. Bereits nach 5000 Überrollungen wurden mit dem Profilometer 10mm tiefe Spurrinnen (entsprechend 40% der Spurbildung nach 1'000'000 Überrollungen) gemessen, wobei das Quergefälle der Strasse zu unterschiedlichen Kontaktkräften des rechten und linken Reifens und damit zu leicht asymmetrischen Querprofilen führte. Messungen der Deflektionen einschliesslich Rückfederungsverhalten mit dem ETH Delta Gerät zeigten, dass es sich hierbei nicht um eine oberflächliche Spurrinnenbildung handeln konnte sondern um eine tiefer gehende Schädigung des Belages durch Verlust der Tragwirkung des Oberbaus als Mehrschichtstruktur, zumal die Ausdehnung der Deflektionsmulde in Längsrichtung und deren Tiefe mit zunehmender Anzahl Überrollungen weiter anwuchs und sich zwei Haupttrisse in Längsrichtung abzuzeichnen begannen. Das Anwachsen der Deflektionen mit steigender Überrollzahl wurde durch Deflektionsmessungen mittels Beschleunigungs- und magnetostriktiven Gebern bestätigt.

Mit Georadarmessungen trat zwischen Anfang und Ende der Verkehrslastsimulation eine Abnahme der relativen Dielektrizitätszahl im Asphalt auf. Zudem war bereits nach 600'000 Überrollungen in einer Tiefe von 4.5cm zwischen Deck- und Binderschicht eine Schichtablösung festzustellen, die sich nach 1'000'000 Überrollungen noch verstärkte. Es fand somit durch die MLS10 nicht nur eine strukturelle Schädigung in vertikaler Richtung sondern auch in horizontaler Richtung statt. Dieses Resultat konnte bei späterer Riegelentnahme visuell bestätigt werden.

Die forensische Untersuchung des Belagsausschnitts aus dem befahrenen Querschnitt liess ausserdem erkennen, dass unter den Doppelrädern der gesamte Asphaltbelag ohne wesentliche Dickenänderung in die erste Schicht der Zementstabilisierung durchgestanzt wurde. Tatsächlich war die Zementstabilisierung unter dem Überrollweg derart geschädigt, dass keine Entnahme von Bohrkernen mehr möglich war. Die innere Zerrüttung und damit das Versagen vor allem der Stabilisierungsschicht wurde bestätigt durch die Messungen mit dem Portable Seismic Pavement Analyzer (PSPA), die beim seismischen Modul der Asphaltsschichten nur geringe Änderungen bei der unteren stabilisierten Schicht jedoch eine starke Abnahme erkennen liessen.

Abkürzungen

Begriff	Bedeutung
APT	Accelerated Pavement Tests
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
COST	Committee on Science and Technology
ETHZ	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungs-Anstalt
EPFL	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
IGT	Institute for Geotechnical Engineering
MMLS3	Model Mobile Load Simulator
MLS10	Mobile Load Simulator
ASTRA	Bundesamt für Strassen
WTO	World Trade Organization
FABAC	Fatigue du Béton Armé Continue
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
TxMLS	Texas Model Load Simulator
LMT	Land Mobility Technologies
WIM	Weight In Motion
GPR	Ground Penetrating Radar
PSPA	Portable Seismic Pavement Analyzer
CAST	CoAxial Shear Test
DMS	Dehnmessstreifen
GPS	Global Positioning System
SASW	Spectral Analysis of Ultrasonic Surface Waves

Literaturverzeichnis

Allgemein zugängliche Informationen und Publikationen


-
- [1] Hugo F., Epps Martin A. L., 2004 "Significant Findings from Accelerated Pavement Testing", NCHRP Synthesis 325, Transportation Research Board, Washington
-
- [2] van Dommelen A, 2002 "Common Code of Good Practice for the Application of ALT" Presentation COST 347 Work Package 4, Improvements in Pavement Research with Accelerated Load Testing
-
- [3] Rabaiotti C., Caprez M., 2007 "Unterhalt 2000, Forschungspaket 4: Dauerhafte Beläge", Eidgenössisches Dep. Für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, UVEK, , Schlussbericht nr 1182 zum Forschungsauftrag ASTRA 2000/422 auf Antrag des Bundesamtes für Strassen
-
- [4] Raab C., Partl M.N., Jenkins K., Hugo F., 2005 "Determination of Rutting and Water Susceptibility of Selected Pavement Materials using MMLS3", 7th Int. Conf. on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, BCRA'05, Trondheim, 27.-29. June
-
- [5] Hugo F., de Vos E., Tayob H., Kannemeyer L., Partl M.N., 2008 "Innovative Applications of the MLS10 for Developing Pavement Design Systems" Proceedings of 3rd International Conference on Accelerated Pavement Testing, APT 2008, Madrid October
-
- [6] Anderegg, P., Brönnimann, R., Raab, C., Partl, M.N., 2001: Langzeitüberwachung mit magnetostriktiven Wegaufnehmern. GESA-Symposium 2001, „Sicherheit und Zuverlässigkeit durch experimentelle Struktur- und Beanspruchungsanalyse“, 17./18. Mai Chemnitz (D), VDI-Berichte Nr 1599, pp221...226
-
- [7] Arraigada, M., Partl, M. N., Angelone, S. M., 2007 : Determination of Road Deflections from Traffic Induced Accelerations. International Journal of Road Materials and Pavement Design, JRMPD, Hermes Science Publications, Vol 8/3, pp 399...421
-
- [8] Nazarian, S., Yuan, D. , Tandon, V., Arellano, M., 2002: Quality Management of Flexible Pavement Layers with Seismic Methods. Res. Rep 1735-3F, Univ ov Texas at El Paso
-
- [9] Mallick, R.B., Das, A., Nazarian, S., 2005: Fast Nondestructive Field Test Method to Determine Stiffness of Subsurface Layer in This Surface Hot-Mix Asphalt Pavement. Transp. Res. Record Vol 1905, pp 82..89
-
- [10] Celaya, M. Nazarian, S., 2006: Seismic Testing to Determine Quality of Hot-Mix Asphalt. Paper 06-2654 ,CD-Rom Proceedings of 85th Annual TRB Meeting, Washington DC
-
- [11] Rabaiotti,C. Partl, M. N., Caprez, M.: APT device evaluation for road research in Switzerland: test campaign on a Swiss Highway with the MLS10. Proceedings of 3rd Int. Conf. on Accelerated Pavement Testing, APT08, Madrid October, (2008)
-


Spezielle Berichte und Dokumente verfasst von den Forschungsstellen im Zusammenhang mit der Evaluation der Grossversuchsanlage.

Im Zusammenhang mit der Evaluation wurden von den Forschungsstellen folgende interne Dokumente und Aktennotizen verfasst, welche Detailinformationen zum Beschaffungskonzept zu den Besprechungen mit Herstellern und Lieferanten enthalten sowie Zusatzabklärungen

- [12] Partl M, N, Caprez, M. (2004): "Forschungs- und Beschaffungskonzept: neue mobile Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen in der Schweiz" EMPA/IGT
- [13] PartlM.N., Caprez, M. (2006): Aktennotiz zu Besprechungen und Besichtigungen der « LCPC-Anlage » FABAC vom 24. Februar 2006; EMPA / ETH-IGT; März 2006-07-04
- [14] PartlM.N., Caprez, M. (2006): Aktennotiz zu Besprechungen und Besichtigungen der « Stellenbosch-Anlage » MLS10 vom 13 bis 16 Januar 2006; EMPA / ETH-IGT; Feb. 2006
- [15] PartlM.N., Caprez, M. (2006): Aktennotiz zu Besprechungen und Besichtigungen der « Stellenbosch-Anlage » MLS10 vom 21 bis 25 Juni 2006, EMPA / ETH-IGT; Juli 2006
- [16] Kalogeropoulos A. (2008): Monitoring Accelerated Pavement testing with a Portable Seismic Pavement Analyzer: PSPA, EMPA-Interner Bericht

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		ARAMIS SBT
Formular Nr. 3: Projektabschluss		
erstellt / geändert am:	Februar 2009	
Grunddaten		
Projekt-Nr.:	ASTRA 2004/018	
Projekttitel:	Pilotstudie zur Evaluation einer mobilen Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen	
Enddatum:	Februar 2009	
Texte:		
Zusammenfassung der Projektergebnisse:	<p>Auf dem Gelände der EMPA Dübendorf wurde während fast 30 Jahren vom heutigen Institut für Geotechnik IGT der ETHZ erfolgreich eine Grossversuchsanlage zur Untersuchung des Verhaltens verschiedener Oberbaustrukturen und -typen betrieben. Diese stationäre Rundlaufanlage, die ursprünglich auf dem freien Feld weitab von Wohnsiedlungen lag, hatte über all die Jahre wertvolle Erkenntnisse für die Strassenbautechnik und das Normenwesen in der Schweiz geliefert. Infolge Umnutzung des Geländes für andere Zwecke und der siedelungsbedingt immer stärker eingeschränkten Nutzung der Anlage war ein Abbruch der Rundlaufanlage unvermeidlich.</p> <p>In der vorliegenden gemeinsam von Empa und ETHZ/IGT durchgeführten Forschungsarbeit wurde ein Ersatz für diese Rundlaufanlage evaluiert und hinsichtlich praktischer Eignung untersucht. Modernen Entwicklungen auf dem Gebiet der beschleunigten Verkehrslastsimulation entsprechend, wurde anstelle einer stationären Anlage eine mobile Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen im Massstab 1:1 evaluiert und praktischen Eignungsprüfungen unterzogen. Die neue Anlage sollte eine Ergänzung der bestehenden stationären Anlage in Lausanne (Halle Fosse) und des kleinen mobilen Verkehrslastsimulators der EMPA zur in situ Ermittlung des Spurbildungswiderstandes (Model Mobile Load Simulator MMLS3) darstellen.</p> <p>Nach Vorevaluation geeigneter Geräte fiel der Fokus auf den sogenannten Model Load Simulator MLS10 aus Südafrika, weil dieses Gerät den gesetzten Erwartungen und Anforderungen am besten entsprach. Das Gerät beruht auf einem neuartigen Konzept mit vier schienengeführten vertikal umlaufenden</p>	
ARAMIS SBT: 090325 Projektabschluss ASTRA2004-018.doc		Seite 1 / 4

 <p>Schweizerische Eidgenossenschaft Confédération suisse Confederazione Svizzera Confederaziun svizra</p>	<p>Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK Bundesamt für Strassen ASTRA</p>
<p>Zielerreichung:</p>	<p>Belastungsschemeln und zeichnet sich durch eine hohe Leistungsfähigkeit von 6000 unidirektionalen Überrollungen pro Stunde (22km/h) aus. Da es sich im Gegensatz zu bestehenden Anlagen um einen Prototyp handelte, wurde die Anlage zunächst im Rahmen von Projekten in Mozambique und in Südafrika Langzeittests mit über 3 mio Überrollungen unterzogen und anschliessend nach einigen Anpassungen in die Schweiz überführt, um dort die eigentlichen Eignungstests auf einem Autobahnbelag mit Zementstabilisierung bei Hinwil durchzuführen. Dabei wurden insgesamt 1 mio Überrollungen mit 60kN Halbschlasten aufgebracht. Die Versuche wurden begleitet durch verschiedene Zusatzmessungen zur Erfassung des Verhaltens der MLS10 und der Veränderung des Belagszustandes.</p> <p>Querprofilmessungen, Deflektionsmessungen mit dem ETH DELTA Gerät sowie Vertikalverformungsmessungen mittels Beschleunigungs- und magnetostriktiven Sensoren einschliesslich Messungen des seismischen dynamischen Moduls mit dem Portable Seismic Pavement Analyzer (PSPA) zeigten in guter Übereinstimmung, dass die MLS10 Grossversuchsanlage schon nach relativ kurzer Zeit eine Veränderung des Belagsverhaltens erzeugte, die nach Abschluss der Versuche zu einem weitgehenden Verlust der Tragfähigkeit des Belages führten. Tatsächlich wurde unter den Doppelrädern der gesamte Asphaltbelag ohne wesentliche Dickenänderung in die erste Schicht der Zementstabilisierung durchgesandt. Dabei wurde die Zementstabilisierung derart zerstört, dass keine Bohrkernentnahme mehr möglich war und zwischen Deck- und Binderschicht ein vollständiger Verlust des Schichtenverbundes stattfand.</p> <p>Aufgrund der in dieser Forschungsarbeit gewonnenen positiven Resultate der Eignungstests und basierend auf dem gemeinsam von Empa und ETHZ/IGT vorgeschlagenen Forschungs- und Beschaffungskonzept wurde schliesslich die Anschaffung der MLS10 für die Schweiz als geeigneter Ersatz für die abgebrochene stationäre Rundlaufanlage empfohlen.</p>
<p>Folgerungen und Empfehlungen:</p>	<p>Das Ziel des Forschungsprojekts wurde erreicht. Es bestand darin, eine Evaluation und praktische Eignungsprüfung einer mobilen Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen im Massstab 1:1 im Hinblick auf einen Ersatz der abgebrochenen stationären Rundlaufanlage des Instituts für Geotechnik IGT der ETHZ durchzuführen. Es konnte nachgewiesen werden, dass die neuartige MLS10 Anlage als geeigneter mobiler Verkehrslastsimulator angesehen werden kann, der verglichen mit anderen Maschinen, namentlich der französischen FABAC, wesentliche Vorteile aufweist und die gestellten technischen Erwartungen und Anforderungen an die Grossversuchsanlage am besten zu erfüllen vermag.</p> <p>Es wurde gezeigt, dass die MLS10 Anlage ähnliche strukturelle Schäden unter realen Achslasten in erheblich kürzerer Zeit erzeugt als dies im Betrieb während der gesamten Lebensdauer einer Strasse möglich wäre. Im Fall der Eignungsprüfung auf der A53 bei Hinwil wurde eine Schädigung, die in 20 Jahren nach etwa 5.5...6.5 Millionen Einheitsachslasten à 81.6kN Achslast an einem Asphaltbelag auf Zementstabilisierung aufgetreten war, nach etwa 600'000 Überrollungen mit Einheitsachslasten von 130kN erreicht.</p> <p>Die Durchführung des Projektes hat länger gedauert als ursprünglich vorgesehen war. Dies ist teilweise darauf zurückzuführen, dass keine geeignete Anlage „ab Stange“ verfügbar war. Es mussten daher auch laufende Entwicklungen und Einzelanfertigungen in die Evaluation miteinbezogen werden. Im konkreten Fall wirkte sich vor allem verzögernd aus, dass die Konstruktion und die Erprobung der aussichtsreichsten Anlage, der MLS10, länger gedauert hatte, als ursprünglich anzunehmen war.</p> <p>Die zur Zielerreichung bewilligten finanziellen Mittel reichten nicht aus. Beide Forschungsstellen mussten im Interesse eines positiven Endergebnisses wegen unvorhersehbarer Unwegsamkeiten auf eigene Kosten insbesondere in personeller Hinsicht einen höheren Aufwand treiben, als ursprünglich vorgesehen.</p>
<p>Folgerungen und Empfehlungen:</p>	<p>Aufgrund der vorliegenden Studie darf gefolgert werden, dass die MLS10 Grossversuchsanlage verglichen mit anderen mobilen Einrichtungen, den gestellten technischen Anforderungen an einen mobilen Verkehrslastsimulator am besten zu genügen vermag und daher einen geeigneten modernen und zukunftsgerichteten Ersatz für die abgebrochene stationäre Rundlaufanlage des Instituts für Geotechnik der ETHZ-IGT auf dem Areal der EMPA darstellt. Aufgrund dieser Ergebnisse wird gemäss gemeinsam von Empa und IGT vorgeschlagenem Forschungs- und Beschaffungskonzept die Anschaffung der MLS10 für die Schweiz empfohlen.</p> <p>Die zur Beschaffung empfohlene MLS10 ist eine neu entwickelte leistungsfähige Maschine, die bereits für mehrerer Millionen Überrollungen eingesetzt wurde. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die „Kinderkrankheiten“ beseitigt wurden.</p> <p>Andererseits kann die Tatsache nicht übersehen werden, dass es sich beim konkreten Gerät um eine gebrauchte Anlage und einen Prototyp handelt, der zwar die beschleunigte Verkehrslastsimulation nicht aber die beschleunigte Simulation des Einflusses von Klima oder Belagsalterung (z.B. durch Oxidation) erlaubt.</p>
<p>ARAMIS SBT: 000325 Projektabschluss ASTRA2004-010.doc</p>	<p>Seite 2 / 4</p>



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Wie im erwähnten Forschungs- und Beschaffungskonzept vorgeschlagen, wird als Voraussetzung für die bestmögliche Auslastung und den wirksamsten Einsatz der Grossversuchsanlage empfohlen, einen Nutzerbeirat mit Vertretern von Kantonen, Gemeinden und Industrie unter der Leitung ASTRA zu bilden.

Publikationen:

Rabaiotti, C., Parli, M. N., Caprez, M.: **APT device evaluation for road research in Switzerland: test campaign on a Swiss Highway with the MLS10**. Proceedings of 3rd Int. Conf. on Accelerated Pavement Testing, APT08, Madrid October, (2008)

Hugo, F., de Vos, E., Tayob, H., Kämmeyer, L., Parli, M. N.: **Innovative Applications of the MLS10 for Developing Pavement Design Systems**. Proceedings of 3rd International Conference on Accelerated Pavement Testing, APT 2008, Madrid October (2008)

Frey, C.: **Der Strassen auf Herz und Nieren getestet**, Kommunalmagazin 16. Januar (2008)

Frey, C.: **Stresstester für Strassenbeläge**, Baublatt 9.2.(2008)

Beck, R.: **Mit dem Stresslester Geld sparen**, Baustelle, Mai (2008)

Beck, R.: **„Zerstörer“ prüft Strassenbelag**, Automobilrevue, 7.5.(2008)

Von Arburg, W.: **Ein lärmender Strassenzerstörer beginnt in Hinwil sein Werk**, Tagesanzeiger 23.08.(2007)

Empa/dd: **Stress für Schweizer Strassen**, Tec 21 40 (2007)

App, R.: **Aphalt im Härteasta**, St. Galler Tagblatt 23.08.(2007)

Borngräber, S.: **Neuer Stresstester der Empa für Schweizer Strassen**, Empa News 3 (2007)

Smiljanic, M.: **Test im Schnelldurchgang**, Deutschlandradio; URL: <http://www.dradio.de/dlr/sendungen/forschak/681804/> 16.10 (2007)

Hofstetter, C.: **Der Strassentester**, Einstein <http://www.sf.tv/sf1/einstein/index.php> 20.12 (2007)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Beurteilung der Begleitkommission:

Diese Beurteilung der Begleitkommission ersetzt die bisherige separate fachliche Auswertung.

Beurteilung:

Das Ziel des Forschungsprojekts wurde erreicht. Es bestand darin, eine Evaluation und praktische Eignungsprüfung einer mobilen Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen im Massstab 1:1 im Hinblick auf einen Ersatz der Rundlaufanlage des Instituts für Geotechnik IGT der ETHZ durchzuführen. Der Forschungsbericht enthält eine ausführliche Darlegung der Ausgangslage und berichtet umfassend über das innovative und komplexe Vorhaben. Trotz grosser Schwierigkeiten konnte dank des grossen Einsatzes des hochqualifizierten Forschungsteams das Vorhaben erfolgreich abgeschlossen werden. Das Projekt wird als Beispiel für zukunftsorientierte und praxisbezogene Forschung im Strassenwesen oft erwähnt und erhält breite mediale Beachtung. Forschung, Lehre und Praxis stellen hohe Erwartungen an die Fortsetzung des Programms zur mobilen Grossversuchsanlage MLS 10. Der für dieses Vorhaben von der EMPA und dem ASTRA eingesetzte breit abgestützte Nutzerbeirat - der dieses Forschungsvorhaben begleitete - engagiert sich auch bei der Suche und der Evaluation von Einsatzmöglichkeiten.

Im Übrigen verweisen wir auf die ausführlichen Darlegungen im Abschnitt Zielerreichung dieses Dokuments.

Umsetzung:

Die Umsetzung erfolgt im Rahmen der Normierungsarbeit sowie im Rahmen der Akkreditierung

weitergehender
Forschungsbedarf:

Weiterer Forschungsbedarf besteht bezüglich Anpassung an unterschiedliches Mischgut, welches nicht auf dem Asphaltbetonprinzip beruht.

Einfluss auf
Normenwerk:

Vom Projekt ist ein Einfluss auf das Normenwerk zu erwarten (siehe oben)

Präsident Begleitkommission:

Name: Vorname:
Amt, Firma, Institut:
Strasse, Nr.:
PLZ: Email:
Ort: Telefon:
Kanton, Land: Fax:

Unterschrift Präsident Begleitkommission:

Luzern, den 25.3. 2009

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

(Fortlaufendes Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte)

Daten werden von der Geschäftsstelle Forschung SBT geliefert.