



## **UNTERHALT 2000 - Massnahme M 17, FORSCHUNG: Dauerhafte Materialien und Verfahren**

# **SYNTHESE – BERICHT zum Gesamtprojekt „Dauerhafte Beläge“**

**mit den einzelnen Forschungsprojekten\* :**

- |   |  |
|---|--|
| <b>Forschungsprojekt 1:</b><br>ASTRA Projekt Nr. 2000-419 | <b>Verhaltensbilanz der Beläge auf Nationalstrassen</b><br>VIAGROUP SA, Lausanne und Winterthur  |
| <b>Forschungsprojekt 2:</b><br>ASTRA Projekt Nr. 2000-420 | <b>Dauerhafte Komponenten auf der Basis erfolgreicher Strecken</b><br>Abt. Strassenbau/Abdichtungen der EMPA, Dübendorf  |
| <b>Forschungsprojekt 3:</b><br>ASTRA Projekt Nr. 2000-421 | <b>Durabilité des enrobés</b><br>LAVOC EPFL, Lausanne<br><br><b>Partie 1: Modélisation des Charges d'essieu</b><br><b>Partie 2: Formulation et optimisation des formules</b> |
| <b>Forschungsprojekt 4:</b><br>ASTRA Projekt Nr. 2000-422 | <b>Dauerhafte Beläge, Rundlaufversuch (Felder analog FP 7)</b><br>IGT Institut für Geotechnik der ETHZ, Zürich   |
| <b>Forschungsprojekt 6:</b><br>ASTRA Projekt Nr. 2000-423 | <b>Griffigkeit der Beläge auf Autobahnen, Vergleich zwischen den<br/>Messergebnissen von SRM und SCRIM</b><br>IVT der ETHZ, Zürich   |
| <b>Forschungsprojekt 7:</b><br>ASTRA Projekt Nr. 2008-005 | <b>Vergleichsstrecken mit unterschiedlichen oberen Tragschichten<br/>auf einer Nationalstrasse</b><br>IMP-Bautest AG, Oberbuchsitzen   |

( \*Das Forschungsprojekt 5 ist ein separates Projekt „Forschung an Strassenbrücken“ )

**Berichtverfasser:** **Jürg P. Junker, Dr. sc. techn., dipl. Ing. ETH / SIA**  
JUNKER PROJEKTE, ENGINEERING & CONSULTING, 3000 BERN 31

**Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Strassen, ASTRA, Bern**

**Juli 2008**

**1273**

# INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG .....	I
RESUME .....	III
SUMMARY .....	V
EINFÜHRUNG / INTRODUCTION .....	VII
ÜBERSICHT ZUM SYNTHESEBERICHT / APÉRCU .....	IX
A ALLGEMEINES ZUM SYNTHESEBERICHT .....	1
1. AUSGANGSLAGE .....	1
2. DIE FORSCHUNGSSTELLEN .....	2
3. BEGLEITKOMMISSION DES ASTRA .....	2
4. BEGRIFFE UND NOMENKLATUR .....	2
B DAS GESAMTPROJEKT M 17 .....	3
1. AUSGANGSLAGE .....	3
2. ZIELSETZUNG GESAMTPROJEKT M17 - FORSCHUNG .....	4
C AUFTRÄGE UND ZIELSETZUNGEN DER FORSCHUNGSSTELLEN (FS) .....	7
1. FP 1, Auftrag und Zielsetzung der FS 1 .....	7
2. FP 2, Auftrag und Zielsetzung der FS 2 .....	8
3. FP 3, Auftrag und Zielsetzung der FS 3 .....	9
4. FP 4, Auftrag und Zielsetzung der FS 4 .....	10
6. FP 6, Auftrag und Zielsetzung der FS 6 .....	11
7. FP 7, Auftrag und Zielsetzung der FS 7 .....	12

D	UMSETZUNG DER FORSCHUNGSPROJEKTE (FS)	13
1.	FP 1, UMSETZUNG Projekt „Verhaltensbilanz“	13
2.	FP 2, UMSETZUNG Projekt „Dauerhafte Komponenten“	39
3.	FP 3, UMSETZUNG Projekt „Durabilité des enrobés“	57
3.1	FP 3-1 Modélisation des Charges d’essieu	57
3.2	FP 3-2 Formulation et optimisation des formules	75
4.	FP 4, UMSETZUNG Projekt „Grossversuch Rundlauf“	109
6.	FP 6, UMSETZUNG Projekt „Griffigkeitsmessungen“	131
7.	FP 7, UMSETZUNG Projekt „Vergleichsstrecken“	159
E	WERTUNG DER FORSCHUNGSPROJEKTE (FS)	185
1.	FP 1: Verhaltensbilanz der Beläge auf Nationalstrassen	185
2.	FP 2: Dauerhafte Komponenten, evaluiert auf der Basis bewährter Strecken.	187
3.	FP 3: Durabilité des enrobés	191
3.1	FP 3-1 Partie 1: Modélisation des Charges d’essieu	192
3.2	FP 3-2 Partie 2: Formulation et optimisation des formules	194
4.	FP 4: Rundlaufversuch (Felder z.T. analog FP 7)	197
6.	FP 6: Griffigkeit auf Autobahnen, Griffigkeitsmessungen SRM/ SCRIM	201
7.	FP 7: Vergleichsstrecken auf einer Nationalstrasse	205
F	BEURTEILUNG DES GESAMTPROJEKTES (BK)	209
G	BEURTEILUNG DER FORSCHUNGSPROJEKTE 1-7	221
1.	FP 1: Verhaltensbilanz der Beläge auf NS	221
2.	FP 2: Dauerhafte Komponenten, evaluiert auf der Basis bewährter Strecken	223
3.	FP 3: Durabilité des enrobés	225
4.	FP 4: Rundlaufversuch (Felder analog FP 7)	229
6.	FP 6: Griffigkeit auf Autobahnen, Messungen SRM und SCRIM	231
7.	FP 7: Vergleichsstrecken auf einer Nationalstrasse	233

H	ANMERKUNGEN UND EMPFEHLUNGEN ( BV ).....	235
I	ABSCHLIESSENDE BEMERKUNG UND DANK .....	239
K	LITERATURVERZEICHNISSE DER FP 1 - 7.....	243

# ZUSAMMENFASSUNG

Das Gesamtprojekt stellt eine gemeinsame Anstrengung von privaten Forschungsstellen (Viagroup, IMP) und den drei Forschungsstellen des Bundes (ETHZ, ETHL, EMPA) dar. Die Forschungsarbeiten mit einer sehr hoch angesetzten Zielsetzung haben zu einigen wissenschaftlichen und technischen Erkenntnissen geführt. Diese werden jedoch nur in praktische Anwendungen umgesetzt, wenn die Verantwortlichen der Strassennetze sich für diese auch interessieren, und die erarbeitete Basis - die mit den hier vorliegenden Resultaten zur Verfügung gestellt wird - gezielt umsetzen und weiter vertiefen.

Das Projekt sollte gemäss seiner ersten Definition die Fragen der Dauerhaftigkeit der bituminösen Beläge und die Problematik des Unterhaltes durch Erarbeiten klarer Strategien mit Empfehlungen - als Standards oder als neue Normelemente - abschliessend behandeln und beantworten.

Den ausführenden Organen der Bauherrschaft sollten damit baldmöglichst neue und auch direkt umsetzbare Entscheidungsgrundlagen zur Verfügung gestellt werden. Diese ursprüngliche Zielsetzung war in der Folge als zu hoch angesetzt zu bezeichnen und musste entsprechend reduziert werden.

Koordinator der Forschungsprojekte FP1-4 und FP7 war Herr Professor A-G. Dumont, LAVOC, EPFL, Lausanne.

FP 1: „Verhaltensbilanz“ der Beläge auf Nationalstrassen; Viagroup SA, Lausanne, Winterthur

FP 2: „Dauerhafte Komponenten“, EMPA Dübendorf

FP 3: «Durabilité des enrobés», LAVOC ETH Lausanne

FP 4: „Dauerhafte Beläge“, Rundlauf, IGT ETH Zürich

FP 6: „Griffigkeit der Beläge auf Autobahnen“, IVT ETH Zürich

FP 7: „Vergleichsstrecken auf einer Nationalstrasse“, IMP Bautest AG, Oberbuchsitzen

Gesamthaft sind die innerhalb des Gesamtprojektes erfolgten zahlreichen und umfangreichen Untersuchungen als grosse Anstrengung zu würdigen.

Zur Umsetzung des Projektes: Es wurde bald – auch von der durch das ASTRA nachträglich eingesetzten Begleitkommission und von den einzelnen Forschungsstellen selbst - festgestellt, dass:

- die in zeitlicher Reihenfolge und Abfolge vorgesehenen Inputs von einzelnen Forschungsprojekten in andere Forschungsprojekte nicht im ursprünglichen angenommenen engen Zeitrahmen erfolgen konnten. Die erste anvisierte Zeitspanne für das Gesamtprojekt war daher auszudehnen;
- die Themenwahl und die vergleichenden Untersuchungen, insbesondere in den verschiedenen speziell materialbezogenen Forschungsprojekten (FP 1-4) sich zum Teil auch eher auf die Erarbeitung von neuen Untersuchungsmethoden und neuen Prüfverfahren beschränkten. Aufgrund dieser sehr anspruchsvollen und auch (zu) aufwändigen erforderlichen Abklärungen war es jedoch nicht möglich, die in der zuerst geplanten Frist von 2–3 Jahren erwarteten neuen Erkenntnisse für die Umsetzung in die Praxis zu erreichen;
- der von der Begleitkommission empfohlene Weg der erforderlichen Definition eines klaren „Roten Fadens“ - eines „fil rouge“ – durch Verwendung gleicher Materialien in den parallel laufenden Untersuchungen innerhalb der verschiedenen Forschungsprojekte hat in der Folge dazu geführt, diese umfangreicheren vergleichenden Untersuchungen auch deutlicher und besser aufeinander abzustimmen.

FP1: Die Erarbeitung einer Verhaltensbilanz in FP1 mit Empfehlungen für die Materialwahl und von geeigneten Strecken des Nationalstrassennetzes mündet - nach Auffassung der Begleitkommission und des Verfassers des Syntheseberichtes – auch in der Feststellung und Empfehlung, dass die Erhebung, Bearbeitung und Verwaltung der technischen Daten des Nationalstrassennetzes in Zukunft unabhängig und auch ausschliesslich Aufgabe der verantwortlichen Instanz, damit des ASTRA selbst, bleiben sollte.

Die Verhaltensbilanz aus FP1 gibt einen gewissen Überblick zum Verhalten der Beläge auf Nationalstrassen der Schweiz.

FP2: FP2 behandelte als Schwerpunkt (ursprüngliche Problemstellung?.. !) die Erarbeitung einer angestrebten neuen Methode einer gebrauchtorientierten (künstlichen) Alterung, die aber erst nach zusätzlichen, erforderlichen und umfangreichen Abklärungen allenfalls in der Zukunft Eingang in die vorgesehenen erweiterten Eignungsprüfungen finden könnte, so beispielsweise für den Mix-Design grosser Bauprojekte im Belagsbau.

FP3 hat mit den erweiterten CRR – Methoden (CRR – Belgien) und weiteren Untersuchungen nach der Methode des LAVOC die Formulierung der Mischgutzrepturen für alle Untersuchungen erarbeitet. Weiter wird in FP3 klar darauf hingewiesen, dass die Dimensionierungsmethoden der Schweiz verbessert und den heute bestehenden hohen Beanspruchungen der Fahrbahnen angepasst werden sollten. Insbesondere sollte auch eine Methode zur Verstärkung der bestehenden Belagsaufbauten erarbeitet werden.

Die in FP3 einem ersten Teil erfolgten Modellbetrachtungen zur Ausbildung der Achslasten und deren Lasteinwirkung wurden erfolgreich abgeschlossen.

FP4 liefert mit dem letzten Grossversuch auf der Rundlaufanlage des IGT der ETHZ einige brauchbare Resultate bezüglich Vergleich der verschiedenen eingebauten Tragschichten. Einschränkend waren die bekannten Einbauprobleme beim Balagseinbau auf der Rundlaufanlage (eher zu geringe Dimensionen gegenüber der Praxis), die in der Folge auch vereinzelt zu widersprüchlichen Ergebnissen führten.

FP6 hat mit Griffigkeitsmessungen mittels verschiedener Testmethoden (Vergleiche der bekannten Messsysteme SRM und SCRIM) gute und aufschlussreiche Ergebnisse geliefert, die in die vorgesehenen und erforderlichen weiteren Normierungsarbeiten übernommen werden können.

Es ist anzumerken, dass der angestrebte Vergleich zwischen den Resultaten von FP2, FP3 mit dem Grossversuch im Rundlauf von FP4 (mit den vorgenannten schwierigen Einbaubedingungen) und mit FP7, den Vergleichsstrecken auf der Nationalstrasse A2, erschwert wurde durch Probleme, die nicht im direkten Einflussbereich der Forschungsstellen lagen und die Erarbeitung klarer Aussagen zum Verhalten der Versuchsfelder nachfolgend erschwerten.

In FP7 wurde der von der Begleitkommission angeregte zusätzliche Grossversuch auf der Nationalstrasse A2 im Massstab 1:1 („in situ, mit Versuchsfeldern analog zu FP4 im Rundlaufversuch) ermöglicht, zur Erreichung eines auch für weitere Grossprojekte der Forschung an bituminösen Belägen – in Zukunft zu empfehlenden und unverzichtbaren, damit auch tatsächlichen Praxisbezugs.

Hinweis zum Praxisbezug: Die untersuchten Mischgutsorten (Walzasphalte) gaben die Basis für Untersuchungen zur Formulierung (Erstprüfung) eines Mischgutes in FP3. Die Optimierung ergab anschliessend die Formulierung und die Zusammensetzung der eingebauten und untersuchten Walzasphalte in den Forschungsprojekten FP4 (Rundlauf) und FP 7 (Vergleichsstrecken mit unterschiedlichen oberen Tragschichten auf der Nationalstrasse A2).

Empfehlung für den Entwurf von stark beanspruchten Strassen, 3 wichtige Kriterien:

- Anzustreben ist eine lange Lebensdauer der unteren Schichten (Tragschichten) und ein leicht auszuführender Neueinbau der Deckschichten (Die Frage der Gesamtkosten über eine Lebensdauer stellt sich);
- Verwendung von Materialien, welche die natürlichen Vorkommen schonen, durch gezielte Wiederverwendung der Strassenoberbaumaterialien (Recycling) oder durch eine Verwertung und Verbesserung von örtlichen Baustoffen, die keine grossen und langen Transporte erfordern;
- Verwendung von technischen Verfahren, welche den Energieverbrauch und die Erzeugung von umweltbelastenden Verunreinigungen wie CO<sub>2</sub> vermindern.

Bezüglich der zukünftigen Forschungstätigkeiten der Laborprüfungen werden sicher beide „Schienen“ der Forschungstätigkeiten - mit Prüfverfahren für die Grundlagenforschung einerseits, und solchen für die Routine- und Eignungsprüfungen andererseits - weiter verfolgt werden.

Gesamthaft sollte zudem darauf geachtet werden, dass nicht primär hochauflösendste Untersuchungsmethoden in den (spezialisierten) Labors angestrebt werden, deren weit offene (vergrösserte) „Prüffenster“ durch die in der Praxis doch gegebenen Streu- oder Variationsbreiten der Baustoffe selber so überdeckt werden (Variabilität der Provenienz und auch der Aufbereitung und Modifizierung der Baustoffe), dass Probleme bezüglich der Wiederholbarkeit oder der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse einerseits und der Ergebnisse bezüglich zeitlich nacheinander folgender Anwendungen der Untersuchungsmethoden in der Praxis entstehen können.

Der Berichtverfasser empfiehlt für die Zukunft eine noch verstärkte und konsequentere enge Anbindung der weiteren Forschungstätigkeit auf dem Gebiet der bituminösen Beläge an die direkt praxisverbundene Forschung. Eine damit vollständige Verbindung der Laborforschung mit Objekten im Massstab 1:1, mit Versuchen „in situ“ (im Rahmen von normalen Einbauten oder auf weiteren, speziellen Vergleichsstrecken) sollten konsequent umgesetzt werden.

# RESUME

Pour la première fois en Suisse, les trois organismes « fédéraux », actifs en technique routière, à savoir le laboratoire LAVOC - EPFL, l'institut EMPA - Dübendorf et les instituts IGT / IVT – EPFZ, se sont associés aux laboratoires privés -Viagroup SA et IMP Bautest SA - pour réaliser un important projet de recherche, dont le but fixé très haut, a permis d'obtenir quelques nouveaux résultats scientifiques ou techniques. Toutefois, ils ne seront utilisables en pratique, seulement si les responsables des réseaux routiers s'y intéressent et, seulement, s'ils transposent et approfondissent la base de données, représentée par tous les résultats mis ainsi à leur disposition.

Initialement, ce projet devait traiter, puis aider à résoudre de façon (peut-être) définitive les problèmes de la durabilité des chaussées souples et ceux posés par la problématique de l'entretien lourd, par l'établissement de stratégies clairement élaborées, apportant des recommandations, exprimées sous la forme de standards ou aussi de nouveaux éléments normatifs.

Il s'agissait, ce faisant, de mettre, le plus tôt possible, à disposition des maîtres d'œuvre des bases de décision nouvelles et utilisables en pratique. Ce but s'est révélé, par la suite, comme trop ambitieux, et, de ce fait, placé bien trop haut. En conséquence, il a été réduit, de manière à obtenir quelques résultats utilisables immédiatement pour la pratique.

La coordination entre les différents projets FP 1- 4 et FP 7 a été réalisée par le Prof. A.-G. Dumont, LAVOC, EPFL.

FP1 : « Bilan du comportement des revêtements sur les routes nationales » ; Viagroup SA, Lausanne, Winterthur

FP2 : « Composants durables » ; EMPA Dübendorf

FP3 : « Durabilité des enrobés bitumineux » ; LAVOC, EPF Lausanne

FP4 : « Revêtements durables » ; Manège de Dübendorf, IGT EPF Zurich

FP 6 : « Qualité antidérapante des revêtements sur autoroutes », IVT EPF Zürich

FP 7 : « Planches de comparaison sur une route nationale », IMP Bautest AG, Oberbuchsiten.

Les très nombreuses et volumineuses recherches, exécutées dans le cadre du projet d'ensemble, représentent un très gros effort qu'il faut apprécier et estimer à sa juste valeur.

Transposition du projet: Il fut alors très rapidement constaté, aussi bien par la « Commission d'accompagnement », ultérieurement mise en place par l'OFROU, que par les centres de recherche eux-mêmes :

- que la succession temporelle des « inputs » successifs des paquets de recherche individuels ne pourrait avoir lieu dans le court espace de temps initialement envisagé et que la durée prévue pour le projet devait être augmentée;
- que le choix des thèmes, ainsi que celui des recherches comparatives, dans les divers paquets de recherche (FP1-4) s'est même limité à l'obtention de nouvelles méthodes de recherche et de procédés de mesure nouveaux. Compte tenu de l'exécution des nombreux éclaircissements nécessaires, très délicats et coûteux, il n'était de ce fait pas possible de livrer, dans le court délai envisagé de 2-3 ans, les nouvelles connaissances espérées à transposer dans la pratique ;
- que le moyen conseillé par la Commission d'accompagnement de créer nécessairement un « fil rouge » clair pour l'utilisation des mêmes matériaux pour les recherches exécutées dans les paquets de recherche parallèles, a justement permis, par la suite, de distinguer et de préciser plus clairement les recherches comparatives.

FP1: L'obtention dans le FP1 d'un bilan de comportement permettant le choix des types de matériaux à tester et celui des tronçons de routes nationales les plus favorables pour l'exécution de recherches ultérieures par les FP2, 3 et 4, s'est révélée plus ardue que prévue. De ce fait, aussi selon l'opinion de la Commission d'accompagnement et d'après l'auteur du rapport de synthèse, il faut absolument que dans l'avenir, l'acquisition, le traitement et l'administration des données techniques du réseau des routes nationales soient exclusivement confiés, sans condition, aux instances responsables, déjà en charge de ce problème, à savoir l'OFROU lui-même, pour le compte de la Confédération, nouveau propriétaire du réseau autoroutier. Le bilan de comportement, tiré du projet FP1, offre une vue d'ensemble du comportement des revêtements des routes nationales en Suisse.

FP2: Ce projet avait comme but principal l'établissement d'une nouvelle méthode d'essai, consacrée spécialement au vieillissement artificiel pratique, qui, après les nécessaires et nombreuses mesures ultérieures de clarification, permettrait, peut-être, d'être utilisée comme méthode d'examen d'aptitude pour la formulation des enrobés (Mix-Design) destinés aux revêtements de chaussées très importantes.

FP3 : En s'appuyant sur la méthode développée par le CRR (Belgique) et sur les résultats d'études ultérieures, exécutées selon la procédure LAVOC, cet institut a établi la formulation des recettes d'enrobé pour tous les essais. Il est aussi indiqué dans cette étude que les méthodes de dimensionnement suisses doivent sérieusement être améliorées et doivent prendre en compte les sollicitations actuelles, à la fois, très élevées et très nombreuses. En particulier, une méthode de calcul du renforcement des superstructures des chaussées devrait absolument être établie.

Dans une première partie, le FP3 présente, avec succès, des considérations très intéressantes, modélisant la répartition des charges et leur influence sur les couches d'un revêtement de chaussée.

FP4 : Le projet livre quelques résultats utilisables pratiquement en établissant la comparaison entre les différentes couches de base, mises en place sur le manège routier de l'institut IGT de l'EPFZ (derniers essais avant démontage de l'installation). Une fois encore, les problèmes de mise en œuvre des planches d'essai (spécialement leurs dimensions inférieures à celles des chaussées réelles) ont conduit en conséquence, dans certains cas, à des résultats contradictoires.

FP6 : Les mesures de la qualité antidérapante avec diverses méthodes d'essai (comparaison des systèmes de mesure très connus SRM et SCRIM) ont livré d'excellents et instructifs résultats qui pourront être utilisés ultérieurement dans des travaux de normalisation.

Il faut remarquer que la comparaison recherchée entre les résultats des FP2 et FP3 avec ceux de l'essai en vraie grandeur du FP4 et, ensuite, avec ceux du FP7 (planches de comparaison sur la RN 2 / BL) a été rendue difficile par des problèmes créés en dehors de la zone d'influence des organismes de recherche. En conséquence, l'établissement d'affirmations claires sur le comportement réel des planches du FP7 a aussi été rendu difficile.

FP7 : L'essai supplémentaire, réalisé en vraie grandeur, dans le cadre du FP 7, à l'échelle 1 :1, et « in situ », initié par la Commission d'accompagnement, sur la RN A2 (avec des planches d'essai analogues à celles de la recherche exécutée sur le manège du FP 4) a permis d'obtenir - mais aussi pour des essais ultérieurs en vraie grandeur dans la recherche routière - une relation effective, réelle, supplémentaire, impérative et irremplaçable avec la pratique de la construction routière.

Recommandation pour la pratique: Les diverses sortes d'enrobés compactés analysés ont permis d'établir une base de données permettant d'effectuer, dans le FP3, une recherche pour la formulation (épreuve-type) d'un mélange bitumineux. L'optimisation des formules permis de fixer la recette des enrobés compactés mis en œuvre et comparés dans les couches de base des projets FP4 (manège) et FP7 (planches de comparaison sur la RN 2 ).

Les projets de chaussées très fortement sollicités devraient répondre dans le futur à trois conditions principales :

- Longue durée de vie pour les couches inférieures (couches de base) et remplacement facile des couches de surfaces (analyser le coût global sur un cycle de vie) ;
- Utilisation de matériaux qui préservent les ressources naturelles par revalorisation de matériaux de chaussées (recyclage) ou de matériaux locaux qui peuvent être valorisés et améliorés et qui n'exigent que peu de transport ;
- Utilisation de techniques qui réduisent la consommation d'énergie et la production de polluants comme le CO<sub>2</sub>.

En ce qui concerne les activités de recherche futures, il est recommandé de poursuivre les travaux dans les deux voies suivies jusqu'alors, à savoir, d'une part, la recherche de procédés de mesure pour la recherche fondamentale et, d'autre part, la mise au point de méthodes simples pour les contrôles de routine ou pour les épreuves-types.

De manière générale, il faut éviter de tendre vers des méthodes compliquées et coûteuses, applicables par les seuls laboratoires très spécialisés, en se rappelant que la vaste fenêtre de dispersion de leurs paramètres est imbriquée dans celle des caractéristiques des matériaux (dispersion et variation des valeurs caractéristiques), ce qui pose de très sérieux problèmes de répétabilité et de reproductibilité, d'une part, et, d'autre part, de comparaison objective des résultats de recherches (exécutées avec des méthodes diverses) se suivant dans l'espace et dans le temps.

L'auteur du rapport de synthèse recommande fortement de continuer à lier la recherche routière future, dans le domaine des revêtements souples, à des travaux de recherche tournés essentiellement vers la pratique et son environnement réel.

En conséquence, la recherche en laboratoire doit impérativement être liée à des réalisations exécutées à l'échelle 1 :1, à savoir à des essais « in situ », réalisés dans le cadre d'une construction normale ou sur des planches de comparaison spécialement réalisées dans ce but.

# SUMMARY

The whole project represents a joint endeavour between private research institutes (Viagroup, IMP) and three government research institutes (ETHZ, ETHL, EMPA). The research work, which has a very ambitious objective, has led to scientific and technical information. However, this will only be utilised in practical applications if those responsible for the road networks show an interest in this information and take a targeted approach to implementing and intensifying the basis which has been created which is being provided by the results in this report.

According to its initial definition, the project is intended to conclusively deal with and find answers to the questions regarding the durability of the asphalt surfacing and the problems of maintenance by formulating clear strategies and recommendations - as standards or new normative elements.

The aim is to consequently provide the client's executive bodies as soon as possible with new decision-making bases which can be directly applied. It subsequently emerged that this original objective had been too ambitious and had to be correspondingly lowered.

The coordinator of the research projects FP1-4 and F7 was Professor A-G. Dumont, LAVOC of the ETH Lausanne.

FP 1: "Summary" of the behaviour of surfacings on national highways; Viagroup SA, Lausanne, Winterthur

FP 2: "Durable components", EMPA Dübendorf

FP 3: "Durability of the asphalt surfacing", LAVOC ETH Lausanne

FP 4: "Durable surfaces"; fatigue carousel, IGT ETH Zurich

FP 6: "Grip characteristics of motorway surfaces", IVT ETH Zurich

FP 7: "Test tracks on a national highway", IMP Bautest AG, Oberbuchsitzen

The extensive trials carried out as part of the overall project must be seen as a major endeavour. For detailed results and conclusions please refer to the individual reports.

Reference the implementation of the project: it was also soon recognised both by the research steering committee which was subsequently engaged by the ASTRA and by the individual research agencies themselves that:

- the inputs from individual research projects to other research projects which had been planned in chronological order and sequence, could not be made within the originally anticipated tight timeframe. The initial planned duration for the whole project therefore had to be extended;
- the choice of themes and benchmark studies, particularly in the various research projects on special materials (FP 1-4) in part therefore were instead limited to formulating new test methods and procedures. However, as a result of these very complex and also (excessively) time-consuming, necessary investigations, it was not possible within the planned period of 2-3 years to obtain the anticipated new information for practical implementation;
- the method recommended by the research steering committee for the required definition of a clear "guiding thread" by using similar materials in the parallel testing for the various research projects, subsequently helped to provide clearer and better coordination between these extensive benchmark trials.

FP1: In the opinion of the research steering committee and author of the summary report, the formulation of a behavioural report in FP1 with recommendations for the choice of materials and suitable test tracks on the national road network also leads to the finding and recommendation that the collation, processing and administration of the technical data on the national highway network should in future remain an imperative and also exclusive task of the body responsible in order for the ASTRA itself to be preserved.

The behavioural report from FP1 provides a useful overview of the behaviour of the surfaces on Switzerland's national road network.

FP2: As a focal point, FP2 dealt with the formulation of a targeted new method for (artificial) ageing, according to use, which could in future be included in the planned, expanded suitability tests after the additional, necessary and extensive (!) investigations, such as for example in the mixture design of major construction projects in the area of road surface construction.

FP3: Using the extended CRR methods (CRR - Belgium) and other studies based on the LAVOC method, FP3 drew up the formulae for asphalt mixtures for all studies. In addition, clear reference is made in FP3 to the fact that the dimensioning methods in Switzerland should be improved and also adapted to meet the high traffic volumes and stresses. In particular, a method should also be formulated to strengthen the existing surface structures.

The model observations carried out in FP3 in a second part on the structure of the axle loads and their load impact were successfully concluded.

FP4: With the last major trial carried out on the IGT carousel of the ETHZ, FP4 delivers useable results regarding comparison of the various built-in upper base courses. The familiar problems incurred when laying the surfaces on the carousel had a limiting effect (tendency towards insufficient dimensions compared with practical use) which consequently also led to contradictory results in individual cases.

FP6: With readings on the grip characteristics using various methods of testing (comparisons between the well-known measurement systems SRM and SCRIM) FP6 delivered good, informative results which will be able to be incorporated into the proposed and necessary additional work on standards.

It should be noted that the targeted comparison between the results of FP2, FP3 with the major trial in the carousel of FP4 (together with the above-mentioned difficult installation conditions) and FP7, the test tracks on the A2 national highway was rendered more difficult by problems which were outside the direct control of the research institutions, subsequently making it more problematical to formulate clear statements on the behaviour of the test tracks.

FP7: In FP7, the additional major trial on the A2 national highway, as suggested by the research steering committee, on a scale of 1:1 ("in situ") with test tracks analogous to FP4 in the carousel trial) was able to be conducted for actual application in practice for other major projects involving research into asphalt surfaces – an application which is to be both recommended and, in the end, imperative for the future.

Note on the practical application: the tested asphalt mixture qualities (rolled asphalt) provided the basis for studies on the formulation (initial testing) of an asphalt mixture in FP3. Further enhancement then produced the formula and composition of the built-in and tested rolled asphalt in the research projects FP4 (carousel test) and FP7 (test tracks with varying upper base courses on the A2 national highway).

Recommendation for the design of highways with heavy traffic volumes, 3 key criteria:

- the objective is to establish a long service life for the lower courses (base courses) and the ability to easily lay the surface courses (this raises the question of the overall costs over a service life);
- use of materials which protect natural resources through the targeted recycling of road surface construction materials or through the reuse and enhancement of local construction materials which do not require major transportation over long distances;
- use of technical processes which reduce energy consumption and the production of environmental pollutants such as CO<sub>2</sub>.

With regard to future research activities in laboratory testing, the twin "tracks" of research activities - with methods of testing for fundamental research on the one side and those for routine and suitability testing on the other - will certainly be further continued.

In addition, general attention should be paid to avoiding aiming for the most 'high resolution' methods of testing in (specialist) laboratories whose wide open (enlarged) "test windows" are so overlaid by the given spread or variation widths of the construction materials themselves (variability of provenance as well as the supply, modification of the construction materials) that this can lead to problems regarding the ability of the results to be repeated or reproduced on the one side and the results in respect of chronologically consecutive methods of testing in practice.

The author of the report also recommended that in future further research activity in the area of asphalt surfaces should be more intensively and consistently linked to direct, practical-based research. A consistent link between laboratory research and objects on a scale of 1:1, in other words conducting "in situ" trials (within the framework of normal laying or on other, special test tracks) should be consistently implemented.

# EINFÜHRUNG / INTRODUCTION

**Das Forschungsprojekt „Unterhalt 2000“** stellt die konkrete Umsetzung einer der Massnahmen dar, die von einer Arbeitsgruppe des Bundesamtes für Strassen, ASTRA vorgeschlagen wurden, um die Erhaltungstätigkeit auf hoch belasteten Strassen effizienter zu gestalten.

Das Forschungsprojekt wurde in Ergänzung und in Koordination der COST-Projekte 343 und 345 ausgelöst, welche Stand und Kenntnisse in diesem Bereich auf europäischem Niveau aufarbeiteten.

**Innerhalb der Massnahme M17 – Forschung, Gesamtprojekt „ Dauerhafte Beläge “** - haben sich - erstmalig in der Schweiz - die drei „eidgenössischen“ Labors, die auf das Fachgebiet der allgemeinen Strassenbautechnik spezialisiert sind - das Institut für Geotechnik, IGT der ETHZ, das Laboratoire des voies de circulation, LAVOC / EPFL und die Abt. Strassenbau/ Abdichtungen der EMPA Dübendorf - mit Fachleuten im gleichen Fachgebiet aus der Privatwirtschaft - der beiden Firmen Viagroup SA und der IMP Bautest AG - zusammengruppiert, um dieses Grossprojekt „Dauerhafte Beläge“ als Gesamtprojekt gemeinsam zu beantragen und durchzuführen.

**Das Gesamtprojekt umfasst 6 Einzelprojekte FP1, FP2, FP3, FP4, FP6 und FP7**, wovon deren vier, FP1 bis FP4 unter der Gesamtkoordination von Prof. A.-G. Dumont, LAVOC der EPFL, realisiert wurden. Die einzelnen Forschungsstellen wurden vom ASTRA einzeln und direkt beauftragt.

(Das Forschungsprojekt FP5 befasst sich getrennt mit der Untersuchung von Strassenbrücken und wird in diesem Bericht nicht behandelt. )

**Das Forschungsprojekt FP6 „Griffigkeit auf Autobahnen“** vergleicht die Messergebnisse der beiden Prüfverfahren SRM (CH) und SCRIM (in Europa im Einsatz), um die Fragen der Zweckmässigkeit des Messeinsatzes von SCRIM - Messgeräten auf den schweizerischen Nationalstrassen und der Zusammenhänge zwischen Messergebnissen SCRIM und SRM zu beantworten. Auf Messungen mit dem Skiddometer konnte dabei verzichtet werden, weil die Zusammenhänge zwischen Skiddometer und SRM bekannt sind.

**Das Forschungsprojekt FP7** wurde von der vom ASTRA nachträglich eingesetzten Begleitkommission als Ergänzung der umfangreichen Laborversuche in FP2 und FP3 („in domo“) und des Grossversuchs von FP4 auf dem Rundlauf angeregt, um einen Praxisversuch („in situ“), mittels der Vergleichsstrecken auf einer Nationalstrasse (mit unterschiedlichen oberen Tragschichten) durchzuführen. Das ASTRA hat diese Vergleichsstrecken in einer Unterhaltmassnahme der Nationalstrasse A2 realisiert, zusammen mit dem Tiefbauamt des Kantons Baselland, BL.

**Die Ergebnisse der Forschungsprojekte zusammen sollten zu einem verbesserten Verständnis der Schadensbildungsmechanismen von Fahrbahnen führen, um daraus gezielte und auch klare Verbesserungsvorschläge für das Erreichen höherer Dauerhaftigkeit bituminöser Beläge abzuleiten. Vom Auftraggeber ASTRA wurde erwartet, innerhalb von 2-3 Jahren auch umsetzbare Resultate in der Form von Empfehlungen an die ausführenden Organe weitergeben zu können.**

Der sehr hohen Zielsetzung des Gesamtprojektes entsprechend ergab sich ein äusserst anspruchsvolles Forschungsprogramm mit vorgesehenen Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Projekten FP 1-4. Die gewählte Verbindung der einzelnen Forschungsprojekte durch Verwendung gleicher Materialien und die vorgesehenen Out- respektive Inputs der verschiedenen Forschungsstellen untereinander stellten daher ein grosses und anspruchsvolles Vorgehen dar. Der ursprünglich vorgegebene Zeitrahmen musste sehr bald erweitert werden. Die Begleitkommission legte in der Folge Wert auf den Vorschlag, dass sich die Forschungsstellen unter dem Prinzip „**reduce to the max**“ auf einen engeren, damit auch tatsächlich zu bewältigenden fachlichen Rahmen eingrenzten, um auch den Zeitrahmen für den Abschluss des Gesamtprojektes eingrenzen zu können, auf etwa 4-6 Jahre gegenüber den ursprünglich geplanten 2– 4 Jahren.

**Das ASTRA veranlasste dann 2006 in der Schlussphase der einzelnen Forschungsprojekte die Ausfertigung dieses Syntheseberichtes zum Gesamtprojekt mit den 6 Teilprojekten.**

**Der Bericht sollte eine kritische Würdigung und Beurteilung der Forschungsarbeiten und eine allgemeine Beurteilung der Situation in der Forschung auf dem Gebiet der bituminösen Beläge enthalten.**

# INTRODUCTION

**Le projet de recherche « Unterhalt 2000 »** ( Entretien 2000 ) présente la transposition concrète de nombreuses propositions, élaborées par un groupe de travail formé par l'Office Fédéral des Routes, destinées à améliorer l'efficacité des travaux d'entretien des routes à grand trafic. Ce projet a été mis en œuvre en complément et en coordination avec les projets COST 343 et 345 qui ont mis en évidence les connaissances dans ce domaine au niveau européen.

**Pour la réalisation de la mesure M17 - Projet général de recherche « Revêtements durables »**, les trois laboratoires « fédéraux », spécialisés dans la construction routière, l'institut de géotechnique de l'EPFZ ( IGT-ETHZ ), le laboratoire des voies de circulation de l'EPFL ( LAVOC ) et la section 113 « Chaussées-Etanchéités » du Laboratoire fédéral d'essais des matériaux de Dübendorf ( EMPA ) se sont associés avec les spécialistes des sociétés privées, le Viagroup AG, Lausanne et Winterthur, et la IMP-Bautest AG, Oberbuchsitzen.

**Le projet général comprend 6 projets particuliers, les FP1, FP2, FP3, FP4, FP6 et FP7**, dont quatre, les FP1 à FP4 ont été réalisés sous la coordination du professeur A.-G. Dumont du LAVOC de l'EPFL. Chaque centre de recherche fut mandaté directement et respectivement par l'OFROU.

**Le projet de recherche FP5** s'occupe séparément de recherche sur les ponts routiers et il n'est alors pas traité dans ce rapport.

**Le projet de recherche FP6 « Qualité antidérapante sur autoroutes »** porte sur la comparaison des résultats des mesures exécutées avec les engins SRM (CH) et SCRIM (en service en Europe) dans le but d'estimer l'opportunité d'exécuter sur les autoroutes suisses des mesures avec le SCRIM et de trouver des relations entre les résultats des mesures obtenues avec le SRM et le SCRIM. Il fut renoncé à des mesures avec le « Skiddometer » étant donné que les relations Skiddometer / SRM sont connues.

**Le projet de recherche FP7** a été initié par la **BK – Begleitkommission** ( commission d'accompagnement ou « commission de coordination et de direction des recherches » ) qui, en plus des très nombreux essais exécutés en laboratoire « in domo », et de l'essai en vraie grandeur effectué sur le manège de l'EPFZ, voulait, par un essai « in situ », en vraie grandeur, sous un trafic réel et dans un environnement naturel, réaliser des planches de comparaison formées de différentes couches de base (supérieures) sur une autoroute en service.

**L'OFROU, avec la collaboration du canton de Bâle-Campagne, a mis ces planches de comparaison à disposition dans le cadre d'un chantier de renouvellement des revêtements sur la A2.**

**L'ensemble des résultats de tous les projets FP1-7 de recherche devait contribuer à mieux comprendre les mécanismes de dégradation des chaussées et en conséquence fournir des propositions permettant d'améliorer fortement la durée de vie des revêtements bitumineux.**

Le but très haut placé du projet d'ensemble a créé dès le début un programme de recherche très exigeant comprenant de nombreuses dépendances prévisibles entre les projets individuels.

La durée totale, initialement proposée et admise, dû être très rapidement augmentée. La commission d'accompagnement attachait beaucoup d'importance à ce que les 6 centres de recherche, selon le principe « **reduce to the max** », se concentrent sur un objectif plus restreint et plus aisé à atteindre pratiquement, de façon aussi à garantir le (nouveau) délai envisagé, de 4-6 ans pour la résolution du projet complet, au lieu des 2-4 ans initialement prévus.

**L'OFROU a autorisé en 2006, dans la période envisagée pour la conclusion des projets de recherche particuliers, la rédaction de ce rapport de synthèse sur le projet d'ensemble et sur les recherches particulières qu'il contient.**

**Selon le mandat de l'OFROU, ce rapport devrait donner une appréciation critique et un jugement des travaux exécutés, ainsi qu'une appréciation générale de la situation de la recherche dans le domaine des chaussées souples.**

# ÜBERSICHT ZUM SYNTHESEBERICHT / APÉRCU

Der Synthesebericht beschreibt zuerst seine Entstehung, skizziert dann die Ausgangslage und die Aufgabenstellung des Gesamtprojektes und beschreibt den gewählten Aufbau des Berichtes.

**Kapitel A** umschreibt die **Ausgangssituation und die Entstehung des Gesamtprojektes mit den Forschungsprojekten FP1- 4, FP6 und FP7**, die durch Einzelverträge vom ASTRA, Bundesamt für Strassen, an die einzelnen Forschungsstellen übertragen wurden.

Herr Prof. A.-G. Dumont wurde als Gesamtleiter mit der Koordination der speziell baustoffbezogenen Forschungsprojekte FP1-4 beauftragt.

Es ist festzuhalten, dass die verschiedenen Forschungsprojekte selbstverständlich unter der eigenen vollen Verantwortung der Forschungsstellen (als Auftragnehmer) und unter der Koordination durch den Gesamtprojektleiter und Koordinator abgewickelt wurden.

Der Begleitkommission (BK) oblag die begleitende Beratung des Gesamtprojektes. Sie wirkte im Auftrage des ASTRA so weit wie möglich dahin, dass die einzelnen Forschungsprojekte einen auch realisierbaren Umfang angenommen haben, um auch innerhalb der erwünschten Frist (ursprünglich max. 2 –3 Jahre als Vorgabe des ASTRA ) wenn möglich, wie dies auch angestrebt wurde - direkt in die Praxis Eingang findende Resultate zu erreichen.

Die Mitglieder der vom ASTRA nachträglich eingesetzten Begleitkommission sind aufgeführt.

**Kapitel B** umschreibt das **Gesamtprojekt, dessen Zielsetzung und die Projektorganisation.**

**Kapitel C** enthält die ursprünglichen **Aufträge und Zielsetzungen der Forschungsstellen.**

**Kapitel D** beschreibt **die eigentliche Umsetzung der einzelnen Forschungsprojekte** und enthält notwendigerweise stark gekürzte Zusammenfassungen.

**Kapitel E** beschreibt die eigene **Wertung der Ergebnisse durch die Forschungsstellen** selbst, wie sie auch zum Teil in den Projektabschlussprotokollen (ARAMIS – Protokolle) der Schlussberichte zu den einzelnen Forschungspaketen enthalten sind.

**Kapitel F** enthält Kommentare zur **Umsetzung und Realisierung des Gesamtprojektes** und der darin enthaltenen einzelnen Forschungsvorhaben, ebenso die Ziele, deren Veränderungen und die erreichten Resultate.

**Kapitel G** enthält die Wertung der Ergebnisse (Zusammenfassung, Zielerreichung und Folgerungen / Empfehlungen) durch die Forschungsstellen (FS) einerseits sowie durch die Kommentare der Begleitkommission (BK), mit Beurteilung/ Umsetzung der Resultate, Hinweis auf allfälligen weitergehenden Forschungsbedarf und den Einfluss auf das Normenwerk ). Diese sind entsprechend den einzelnen Projektabschlüssen (ARAMIS – Protokolle) für die Forschungsprojekte getrennt beschrieben.

**Kapitel H** enthält gemäss Auftrag des ASTRA eine allgemeine ergänzende Betrachtung und Wertung der Ergebnisse der einzelnen Forschungsprojekte durch den Verfasser des Syntheseberichtes (BV). Es folgen kritische Hinweise zur allgemeinen Situation in der Forschung an bituminösen Belägen.

**Kapitel I** enthält zusammenfassende allgemeine Bemerkungen und den Dank an alle Beteiligten.

**Kapitel K** enthält als Übersicht die Literaturverzeichnisse der Forschungsberichte der FP 1–7.

**Kapitel K , Literaturverzeichnisse FP 1-7 als Anhang auf blauem Papier** 

**Übersetzungen ( D / F ) einzelner Abschnitte jeweils auf gelbem Papier** 

# APÉRCU DU RAPPORT

Le rapport de synthèse décrit en premier lieu sa création, décrit les conditions préalable et le but du projet d'ensemble et décrit la structure du rapport.

**Le chapitre A** décrit la situation existant lors de la création du projet d'ensemble formé des divers projets de recherche individuels FP1-4 et FP6 attribués directement par contrat individuel aux différents centres de recherche (FS) par l'Office fédéral des routes, OFROU. Le professeur A.-G. Dumont a été chargé de la direction générale et de la coordination des projets FP1-4 étudiant principalement la technologie des matériaux routiers.

Il est à relever que les différents paquets de recherche ont été bien entendu développés sous la propre et entière responsabilité des centres de recherche, en tant que mandataire, et sous la coordination du directeur et coordinateur.

Il incombait à la commission d'accompagnement (BK) de conduire l'expertise de l'ensemble du projet. Elle l'exécuta aussi bien qu'elle le put, de manière à permettre aux divers centres de recherche d'atteindre, dans un programme encore pratiquement réalisable, en tenant compte d'un délai souhaitable ( qui était initialement prévu au max. de 2-3 ans par l'OFROU ) des résultats, si possible, directement transposables dans la pratique.

Les membres de la commission, mise en place à posteriori par l'OFROU, sont présentés.

**Le chapitre B** décrit le projet d'ensemble, indique le but fixé ainsi que l'organisation de cette recherche.

**Le chapitre C** contient la description des mandats initiaux ainsi que celle des buts fixés par les différents groupes de chercheurs.

**Le chapitre D** décrit la réalisation proprement dite des paquets de recherche individuels et contient les résumés qui ont été par nécessité très fortement réduits.

**Le chapitre E** donne l'évaluation personnelle par les centres de recherche des résultats obtenus, comme elle figure en partie dans les protocoles de fin de projet (protocole ARAMIS) donnés dans le rapport final de chaque projet.

**Le chapitre F** contient des commentaires sur la transposition, sur la réalisation du projet d'ensemble et celle des projets envisagés pour chaque recherche particulière, sur les buts et leurs modifications, ainsi que sur les résultats atteints.

**Le chapitre G** donne l'évaluation des résultats, d'une part par les centres de recherche (FS, résumé, but atteint, conclusions et recommandations), d'autre part par les commentaires de la Commission (BK, expertise et transposition des résultats, indications pour des recherches ultérieures et implications sur la normalisation).

Ces appréciations sont présentées séparément conformément aux dispositions des protocoles ARAMIS de fin de recherche pour chaque projet.

**Le chapitre H** contient, conformément au mandat donné par l'OFROU au rédacteur du rapport de synthèse (BV), une réflexion complémentaire et une appréciation des résultats obtenus par chaque projet particulier. Il y figure aussi des indications critiques sur la situation de la recherche dans le domaine des chaussées souples.

**Le chapitre I** apporte une réflexion finale et des remerciements à tous les participants du projet.

**Le chapitre K** donne en complément les bibliographies provenant des rapports de recherche 1-7.

**Chapitre K, Bibliographies des projets 1 – 7 sur papier bleu**



**Traductions ( A / F ) de quelques Textes sur papier jaune**



# A ALLGEMEINES ZUM SYNTHESEBERICHT

## 1. AUSGANGSLAGE

Im Rahmen der Umsetzung der Massnahme M17 "Forschung" aus dem Substanzerhaltungsbericht der Nationalstrassen wurden seitens einer Partnerschaft von Forschungsstellen (EMPA, IGT der ETH Zürich, LAVOC der ETH Lausanne und Viagroup SA) mehrere Forschungsprojekte als Gesamtprogramm ausgearbeitet und dem Bundesamt für Strassen ASTRA zur Genehmigung eingereicht.

Die Gesamtheit dieser Projekte entsprach der **Zielsetzung der Massnahme 17**, welche neben anderen Zielsetzungen die **Entwicklung von dauerhafteren Materialien und Verfahren für die Erhaltung der Nationalstrassen** postulierte, wie dies bereits in einem früheren Bericht einer Arbeitsgruppe des ASTRA zum Thema "Zweckmässigkeit und Effizienz von Unterhaltsbaustellen auf Nationalstrassen" angeregt worden war.

**FP1: Verhaltensbilanz der Beläge auf den Nationalstrassen (VIAGROUP SA),**

mit der **Zielsetzung und Fragestellung:**

**Erarbeiten einer Analyse der vorhandenen Altersstruktur und der entsprechenden Zustände der Beläge auf dem Nationalstrassennetz als konkrete Antwort auf die Frage "wie lange hat eigentlich Bauweise/Belag xy gehalten?".**

Soweit möglich (und bei entsprechend vorhandenen Zustandswerten kurz vor Durchführung einer Erhaltungsmassnahme) sollten auch mittlerweile erneuerte Beläge berücksichtigt werden. Angestrebt waren Inputs für die Forschungspakete 2, 3 und 4 für die Wahl von geeigneten Strassenabschnitten zur Probeentnahme für die Laboruntersuchungen.

Die nachstehenden Projekte – FP2, FP3 und FP4 entsprachen der Zielsetzung der Entwicklung dauerhafterer ("besserer") Beläge und waren untereinander zu koordinieren:

**FP2: Dauerhafte Komponenten (EMPA),**

**FP3: Dauerhaftes Mischgut (LAVOC, ETH Lausanne)**

**FP4: Rundlaufversuch (IGT, ETH Zürich)**

**FP6: Griffigkeit der Beläge** betraf die Eigenschaften der Fahrbahnoberflächen von Belägen auf Autobahnen. Gezielt wurde ein Vergleich erarbeitet zwischen den Messergebnissen von SRM und SCRIM (IVT ETHZ).

**FP7: Vergleichsstrecken A2, Kanton Basel-Land ( IMP Bautest AG, Oberbuchsiten).** Auf Vorschlag der Begleitkommission wurde vom ASTRA - als Praxisbezug parallel zu den Laborarbeiten sowie zu den auf dem Rundlauf der ETH Zürich eingebauten Belägen - eine Teststrecke auf der Autobahn A2 eingebaut.

Das Ziel der Versuchsstrecken in FP7 bestand im praxisgerechten Einbau der in den anderen Forschungsprojekten optimierten Beläge und weiterer Belagsvarianten im Massstab 1:1, im Überprüfen von Eigenschaften und Langzeitverhalten unter sehr hoher Belastung.

**Das ASTRA veranlasste die Erstellung des Syntheseberichtes** mit dem Ziel, die Berichte der vorgenannten einzelnen Forschungspakete zusammenzuführen und zu beurteilen. Eine kritische Analyse zur Situation in der Forschung an bituminösen Belägen hatte zu erfolgen, insbesondere im Hinblick auf allfällige weitere Forschungstätigkeiten mittels Grossprojekten.

## 2. DIE FORSCHUNGSSTELLEN FS

**Forschungsstelle 1 :** VIAGROUP SA, Winterthur und Lausanne

FP1: Verhaltensbilanz der Beläge auf Nationalstrassen

**Forschungsstelle 2 :** Abt. Strassenbau/Abdichtungen der EMPA, Dübendorf

FP2: Dauerhafte Komponenten auf der Basis erfolgreicher Strecken.

**Forschungsstelle 3 :** LAVOC, EPFL Lausanne FP 3 : Durabilité des enrobés,

Partie 1: Modélisation des Charges d'essieu,

Partie 2: Formulation et optimisation des formules

**Forschungsstelle 4 :** IGT, Institut für Geotechnik der ETHZ, Zürich

FP4: Dauerhafte Beläge, Rundlaufversuch (Felder analog FP 7)

**Forschungsstelle 6 :** IVT, Institut für Verkehrswesen u. Transporttechnik der ETHZ, Zürich

FP6: Griffigkeit der Beläge auf Autobahnen, Vergleich zwischen den Messergebnissen von SRM und SCRIM,

**Forschungsstelle 7 :** IMP - Bautest AG, Oberbuchsitzen

FP7: Vergleichsstrecken mit unterschiedlichen oberen Tragschichten auf einer Nationalstrasse.

## 3. BEGLEITKOMMISSION DES ASTRA

Die Mitglieder der vom ASTRA eingesetzten Begleitkommission von 2000 -2007:

D. Baer, ASTRA

K. Schellenberg, Experte

A. Nellen, Experte

H.-P. Beyeler, ASTRA

B. Graf, Experte

M. Seeberger, Experte

J. Frei, Experte

M. Grieder, Experte Kt. BL

J. P. Junker, Experte, Vorsitz

Der Begleitkommission oblag die begleitende Beratung des Gesamtprojektes. Sie wirkte im Auftrage des ASTRA so weit wie möglich dahin, dass die einzelnen Forschungsprojekte einen auch tatsächlich realisierbaren Umfang angenommen haben, um auch innerhalb einer möglichst kurzen, „ nützlichen“ Frist (ursprünglich max. 2 – 3 Jahre als Vorgabe des ASTRA) die angestrebten, möglichst direkt in die Praxis Eingang findenden Resultate zu erreichen.

## 4. BEGRIFFE UND NOMENKLATUR

Im Bericht werden die im gegenwärtigen Zeitpunkt normierten Fachbegriffe verwendet.

Es bedeuten : FP Forschungsprojekt ; FS Forschungsstelle ; BV Berichtverfasser

BK Begleitkommission, D / F ( A / F ) Deutsch / Französisch

# B DAS GESAMTPROJEKT M 17

## 1. AUSGANGSLAGE

Aufgrund parlamentarischer Interventionen zur Frage des Standes der Technik und der Standards im Strassenbau ordnete der Bundesrat mit Beschluss vom 22. Mai 1996 die Bildung einer Arbeitsgruppe an. Diese Arbeitsgruppe wurde beauftragt, folgende Fragen zu klären:

***Wie kann eine technisch ausreichende Substanz - Erhaltung der Nationalstrassenwerke möglichst kostengünstig sichergestellt werden?***

Diese Arbeitsgruppe hat mehrere Massnahmen vorgeschlagen unter anderem die Massnahme 17, Forschung, welche wie folgt umschrieben wird:

### Die Massnahme 17: Forschung

Konkrete Massnahmen

- **Dauerhafte Materialien und Verfahren:** Ein gezielt auf die Belange der Erhaltung ausgerichtetes, national koordiniertes Forschungsprogramm muss rasch ausgearbeitet und in die Wege geleitet werden. Ein erster Vorschlag dazu ist bereits im Bericht „Zweckmässigkeit und Effizienz der Unterhaltsbaustellen auf Nationalstrassen“ enthalten.
- **Null-Unterhalt-Verfahren** (Massnahmen mit geringem Unterhaltsbedarf): Eine Sichtung von Bauverfahren mit potentiell geringem Erhaltungsaufwand für Fahrbahnen (in beiden Belagsbauweisen) und für Kunstbauten soll durch entsprechende Literaturstudien und aufgrund einer direkte Auswertung ausländischer Erfahrung unternommen werden.
- **Statistische Grundlagen:** Verbesserung der statistischen Erhebung von Unfällen im Baustellenbereich und von Verkehrsstaus.

Die Ergebnisse sollen zu einem verbesserten Verständnis und neuen Erkenntnissen der komplexen Schadensbildungsmechanismen von Fahrbahnen und zu daraus abzuleitenden Verbesserungsvorschlägen führen, um eine grössere Dauerhaftigkeit der bituminösen Beläge zu erreichen.

## 2. ZIELSETZUNG GESAMTPROJEKT M17 - FORSCHUNG

### Zielsetzung

Aufgrund parlamentarischer Interventionen ordnete der Bundesrat mit Beschluss vom 22. Mai 1996 die Bildung einer Arbeitsgruppe an. Diese Arbeitsgruppe wurde beauftragt folgende Fragen zu klären:

*Wie kann eine technisch ausreichende Substanz Erhaltung der Nationalstrassenwerke möglichst kostengünstig sichergestellt werden?*

Diese Arbeitsgruppe hat mehrere Massnahmen vorgeschlagen, unter anderem die Massnahme 17 Forschung:

#### **Massnahme 17: Forschung - Dauerhafte Materialien und Verfahren:**

Ein gezielt auf die Belange der Erhaltung ausgerichtetes, national koordiniertes Forschungsprogramm sollte demnach rasch ausgearbeitet und in die Wege geleitet werden. Ein erster Vorschlag dazu war bereits im Bericht „Zweckmässigkeit und Effizienz der Unterhaltsbaustellen auf Nationalstrassen“ enthalten.

Die Ergebnisse sollen zu einem verbesserten Verständnis und neuen Erkenntnissen der komplexen Schadensbildungsmechanismen von Fahrbahnen und zu daraus abzuleitenden Verbesserungsvorschlägen führen, um eine grössere Dauerhaftigkeit der bituminösen Beläge zu erreichen.

### Projektorganisation

Das Gesamtprojekt umfasst anfänglich 5 miteinander verbundene Einzelprojekte oder Forschungspakete (FP1, FP2, FP3, FP4 und FP6) deren vier (FP1 bis FP4) unter der Gesamtkoordination von Prof. A.-G. Dumont realisiert worden sind.

Zur Abwicklung der erforderlichen Forschungsarbeiten wurde eine Projektorganisation bestehend aus mehreren Forschungsprojekten realisiert.

Bei diesem Projekt haben sich erstmalig in der Schweiz die drei „eidgenössischen“ Labors, die auf dem Fachgebiet der Materialtechnik des bituminösen Belagsbaus tätig sind, mit Fachleuten aus der Privatwirtschaft der Firmen Viagroup SA und IMP-Bautest AG zusammengruppiert, um ein Grossprojekt gemeinsam durchzuführen.

Die Koordination zwischen den einzelnen Forschungsprojekten FP 1 – 4 erfolgte durch Professor A. G. Dumont der ETH Lausanne. Diese Koordination umfasst folgende Projekte:

**FP 1:** „Verhaltensbilanz“; Viagroup SA Lausanne und Winterthur

**FP 2:** „Dauerhafte Komponenten“; EMPA, Abt. Strassenbau/Abdichtungen, Dübendorf

**FP 3:** «Durabilité des enrobés»; LAVOC EPFL Lausanne

**FP 4:** „Dauerhafte Beläge“; Rundlauf; IGT, ETH Zürich

**FP 6:** Zusammenhang zwischen SRM und SCRIM Messergebnissen auf Nationalstrassen-Fahrbahnen; IVT, ETH Zürich

Infolge der bevorstehenden, netzweiten Zustandserfassung und –Bewertung der Fahrbahn sämtlicher Nationalstrassen (ZEB-NS), erteilte das ASTRA dem IVT der ETH Zürich den Auftrag zur Abklärung der Zweckmässigkeit eines SCRIM-Messgeräteeinsatzes durch die Vergleichsmessungen der Verfahren SRM und SCRIM durchzuführen.

Da dieses Forschungsprojekt in engem Zusammenhang mit den Fragen der Substanzerhaltung der Nationalstrassenwerke und damit mit der Massnahme 17 stand, wurde das Projekt zur Begleitung an das vorliegende Forschungsprojekt angegliedert.

**FP 7:** Vergleichsstrecken A2, Kanton Basel-Land; IMP Bautest AG, Oberbuchsiten

Auf Vorschlag der Begleitkommission wurde vom ASTRA als Praxisbezug - parallel zu den Laborarbeiten sowie zu den auf dem Rundlauf der ETH Zürich eingebauten Belägen - eine Vergleichsstrecken (Teststrecken) auf einer Autobahn eingebaut, bezeichnet als FP 7.

FP 7: Auf der Nationalstrasse A2, Abschnitt Augst – Sissach, Verzweigung Augst – Arisdorf konnte auf der Normalspur Fahrtrichtung Luzern zwischen den km 15.520 und 17.860 eine Versuchsstrecke, bestehend aus 10 Versuchsfeldern, realisiert werden.

Das Ziel dieser Versuchsstrecke bestand darin, die in den übrigen Forschungsprojekten optimierten Beläge sowie weitere Belagsvarianten im Massstab 1:1 einzubauen, deren Eigenschaften zu überprüfen sowie das Langzeitverhalten unter sehr hoher Belastung zu überwachen.

Die Organisation des Bauherrn für die Realisierung der Vergleichsstrecken ist in der Abbildung 1 grafisch dargestellt.

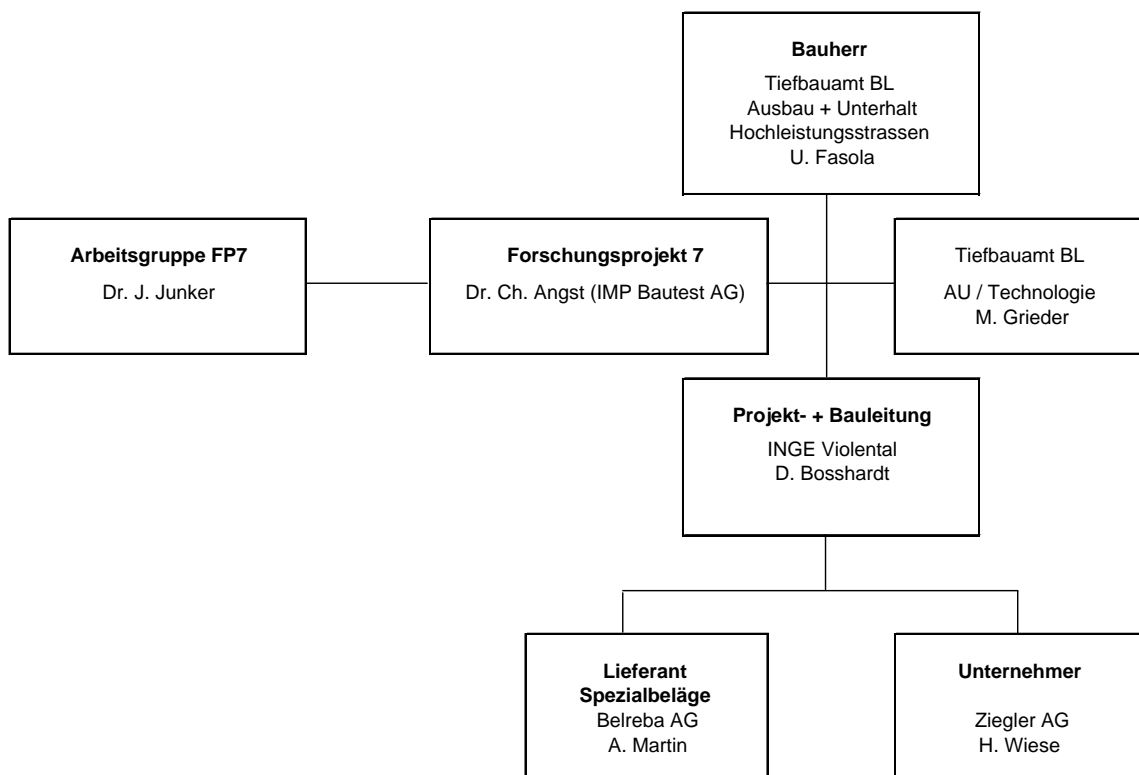


Abbildung 1 Organisation des Bauherrn für die Vergleichsstrecken auf der A2.



# C AUFTRÄGE UND ZIELSETZUNGEN DER FORSCHUNGSSTELLEN (FS)

## 1. FP 1, Auftrag und Zielsetzung der FS 1

### Auftrag FP1 des ASTRA

#### FP1, Forschungsprojekt 1 : Unterhalt 2000, „Verhaltensbilanz“

*Forschungsziel: Analyse von Alters- und Zustandsverteilung der Beläge auf Nationalstrassen um die bauweisenspezifische Dauerhaftigkeit zu ermitteln.*

*Forschungsstelle: Viagroup SA, Romanel s/Lausanne und Winterthur*

*Projektleiter: I. Scazziga, dipl. Ing. ETH*

### Zielsetzung von FP1

Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine Analyse der vorhandenen Altersstruktur und der entsprechenden Zustände der Beläge auf dem Nationalstrassennetz als konkrete Antwort auf die Frage **"wie lange hat eigentlich Bauweise/Belag xy gehalten?"**. Soweit möglich (und bei entsprechend vorhandenen Zustandswerten kurz vor Durchführung einer Erhaltungsmassnahme) sollen auch mittlerweile erneuerte Beläge berücksichtigt werden.

*Die Ziele der beabsichtigten nationalen Forschungsarbeiten zu COST 343 (Bereich "Strasse") sowie aufgrund des Schlussberichtes Substanzerhaltung liegen im wesentlichen in einer Verbesserung des Langzeitverhaltens verschiedener Materialien für bituminöse Beläge auf Nationalstrassen. Die erzielten Verbesserungen gehen aus dem Vergleich zwischen dem Ist-Zustand ("bisher") und den erwarteten Ergebnissen für Materialzusammensetzungen gemäss den Empfehlungen aus den Forschungspaketen "Dauerhafte Komponenten", "Dauerhaftes Komposit" und "Dauerhafte Beläge mit und ohne Recyclingmaterialien " hervor.*

Die Zielsetzung des Gesamtprogramms verlangte aus Sicht von FP1 einen quantifizierenden Vergleich, welcher wohl als selbstverständlich erscheint, bei der praktischen Realisierung allerdings sehr bald an Grenzen stiess. Gesamtschweizerisch liegen verschiedene Auswertungen der Altersstruktur des Nationalstrassennetzes vor (siehe Abbildung 1 S. 14), die sich jedoch weitgehend auf das ursprüngliche Neubaudatum abstützen und die inzwischen durchgeführten Erhaltungsmassnahmen nicht berücksichtigen.

## 2. FP 2, Auftrag und Zielsetzung der FS 2

### Auftrag FP2 des ASTRA

#### FP2, Forschungsprojekt 2 : **Unterhalt 2000, Dauerhafte Komponenten**

*Forschungsziel: Erarbeiten performanceorientierter international ausgerichteter Dauerhaftigkeitskriterien für hochwertige Mischgutkomponenten, einzeln und im Verbund*

*Forschungsstelle: EMPA, Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt*

*Projektleiter: Dr. Manfred N. Partl; Dr. R. Gubler*

### Zielsetzung von FP2

Im Rahmen des Projektes Unterhalt 2000 als Beitrag zur Umsetzung der Massnahme 17 gemäss Schlussbericht "Substanzerhaltung" und in Verbindung mit der COST-Aktion 343 "Reduction in Road Closures by Improved Pavement Maintenance Procedures" sind performanceorientierte international ausgerichtete moderne Dauerhaftigkeits-Kriterien zur Evaluation und Bewertung dauerhafter, hochwertiger Mischgut-Komponenten einzeln und im Verbund für bituminöse Beläge zu erarbeiten, um Fahrbahnspernungen zu Unterhaltzwecken zu reduzieren und den hohen technischen Stand in unserem Lande mit Blick auf die europäischen bzw. globalen Entwicklungen sicherzustellen und zu erweitern. Diese Kriterien sind auf verschiedene für die Schweiz relevante Material-Komponenten anzuwenden. Dabei ist eine entsprechende Klassierung der untersuchten Komponenten vorzunehmen. Zu untersuchen und zu bewerten ist die Dauerhaftigkeit

- der **Einzelkomponenten**
- des **Verbundes** zwischen Bindemittel und Zuschlagstoffen

hinsichtlich verschiedener (auch kombinierter) Beanspruchungen, wie mechanischer und thermischer Ermüdung, Frost- und Abkühlverhalten, bleibender Deformationen sowie hygraler und thermischer Beanspruchung.

Da engere Ziel der Arbeit bestand somit im Erarbeiten massgebender, performanceorientierter, international ausgerichteter Dauerhaftigkeits-Kriterien für hochwertige Mischgutkomponenten; einzeln und im Verbund betrachtet.

## 3. FP 3, Auftrag und Zielsetzung der FS 3

### Auftrag FP3 des ASTRA

#### FP3, Forschungsprojekt 3 : **Unterhalt 2000, Durabilité des enrobés**

*Forschungsziel:           Elaborer des règles et des procédures visant à obtenir des enrobés plus performants et par conséquent plus durables.*

*Forschungsstelle:       Laboratoire des voies de circulation (LAVOC), Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL)*

*Projektleiter:           Jean-Claude Turtschy, Prof. A.-G. Dumont*

### Zielsetzung von FP 3

#### **FP 3 :       Partie 1, Objectif de l'étude**

##### **Partie 1:       Modélisation des Charges d'essieu,**

*La présente recherche, vise à proposer une nouvelle approche pour la modélisation des charges de trafic. Elle définit par ailleurs les paramètres entrant dans la description des charges de trafic qui influencent de façon significative les sollicitations des couches bitumineuses des chaussées routières. Elle suggère également des méthodes permettant d'intégrer la prise en compte de ces paramètres dans le calcul des charges de trafic.*

#### **FP 3 :       Partie 2, Objectifs de l'étude**

##### **Partie 2 :       Formulation et optimisation des formules**

*Afin de satisfaire aux critères de durabilité des revêtements routiers, il conviendra de sélectionner une gamme d'essais qui permettront d'évaluer de façon satisfaisante la performance des mélanges bitumineux constituant le revêtement des chaussées. L'objectif de la partie 2 du PR3 est d'évaluer et de sélectionner des essais existants, en Suisse et de par le monde, qui ont un caractère dit "de performance"; c'est-à-dire qui permettront de prédire le comportement du matériau sur le long terme. Dans un premier temps, la sélection est faite sur la base d'études menées tant en Suisse qu'à l'étranger. L'évaluation du caractère prédictif des essais retenus est faite en comparant les résultats obtenus au comportement mesuré sur des planches d'essais soumises à des essais de charge accélérés au Rundlauf. De ces résultats, des recommandations sont tirées quant à l'emploi des essais dans les études de formulation. A noter que le but de ce projet de recherche n'est pas de développer un nouvel essai de performance qui demanderait une phase de mise au point et de validation extrêmement longue et coûteuse mais de se diriger vers des essais existants en Suisse ou à l'étranger, ayant déjà une longue période d'application et dont le matériel d'essai nécessaire est facilement disponible et si possible relativement bon marché.*

## 4. FP 4, Auftrag und Zielsetzung der FS 4

### Auftrag FP4 des ASTRA

#### **FP4, Forschungsprojekt 4 :     Unterhalt 2000, Dauerhafte Beläge, Rundlaufversuch**

*Forschungsziel:       Dauerhafte Komponenten (P 2 und dauerhafte Mischgutarten sollen in mehrschichtigen Belagssystemen im Rundlauf getestet werden.*

*Forschungsstelle:     IVT, heute Institut für Geotechnik (IGBT) der ETH Zürich*

*Projektleiter:         Dr. Markus Caprez; Carlo Rabaiotti, dipl. Ing. ETHZ*

### **Zielsetzung von FP 4**

Die Hauptstrassen der Schweiz erfahren jedes Jahr eine Mehrbeanspruchung durch den Schwerverkehr. Gleichzeitig werden die klimatischen Bedingungen für die Dauerhaftigkeit der Beläge immer ungünstiger. Dazu kommt, dass zur heutigen Zeit die Sparmaßnahmen eine sehr wichtige Rolle spielen, besonders wird der Aufwand für den Unterhalt reduziert.

Das Hauptziel dieser Untersuchung besteht darin in der Zukunft eine günstige Wahl der Materialien, die in den Tragschichten eingesetzt werden, zu treffen. Insbesondere wird die Rolle des Bindemittels untersucht, um daraus eine aussagekräftige Bestimmung der Lebensdauer des Belages zu erhalten.

Es wurden deshalb die Materialeigenschaften der Materialien nach Möglichkeiten für alle Felder konstant gewählt, damit nur ein bestimmter Effekt einer Komponente untersucht werden konnte.

Kleine Abweichungen der Eigenschaften von den eingebauten Standardmaterialien können aber zu einer ungenauen Beurteilung der effektiven Eigenschaften des Bindemittels führen. Es wurden aus diesem Grund die wichtigsten Materialeigenschaften jeder Schicht des Straßenunterbaus und Oberbaus untersucht, um später auch mit Nachrechnungen die Einflüsse dieser Abweichungen zu isolieren. Es ging auch darum, diejenigen Sensoren zu planen und zu entwickeln, die sich für diese Aufgabe am besten eigneten.

Zuerst wurde die AASHTO Dimensionierungsmethode verwendet um den Straßenzustand zu beurteilen, der durch den PSI (Present Serviceability Index) ermittelt wird.

Auch die Möglichkeit des Einsatzes der „Finite Elemente“- Modellierung für die Analyse und Interpretation der Feldergebnisse wurde in Erwägung gezogen.

## 6. FP 6, Auftrag und Zielsetzung der FS 6

### Auftrag FP 6 des ASTRA

#### FP6, Forschungsprojekt 6 : Unterhalt 2000, Griffigkeit

*Forschungsziel: Abklärung Zusammenhang zwischen den Messverfahren SRM und SCRIM und deren Messergebnissen auf Nationalstrassen-Fahrbahnen*

*Das Forschungsprojekt soll die Fragen der Zweckmässigkeit des Messeinsatzes von SCRIM-Messgeräten auf den schweizerischen Nationalstrassen und der Zusammenhänge zwischen Messergebnissen SCRIM und SRM beantworten. Auf Skiddometermessungen kann verzichtet werden, weil die Zusammenhänge Skiddometer / SRM bekannt sind.*

*Forschungsstelle: Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik (IVT) der ETH Zürich*

*Projektleiter: Prof. HP. Lindenmann*

#### Zielsetzung von FP 6

Das Forschungsprojekt verfolgt die folgenden drei Ziele:

- Prüfung der Zweckmässigkeit eines SCRIM - Einsatzes für die netzweite Erhebung der Griffigkeit auf den Nationalstrassen der Schweiz.
- Ableitung des Zusammenhangs zwischen den Griffigkeitsmesswerten der beiden Messsysteme SCRIM und SRM für Nationalstrassen.
- Beurteilung der Genauigkeit von SCRIM - Messungen für die Verwendung der Frage der Verkehrssicherheit sowohl auf Netz- als auch auf Projektebene.

Damit sollten Entscheidungsgrundlagen für die Durchführung der netzweiten Erhebung der Griffigkeit auf den schweizerischen Nationalstrassen, insbesondere auch bezüglich Ausschreibungen der Arbeiten (zugelassene Messgeräte) erarbeitet und bereitgestellt werden.

Die wesentlichen Erkenntnisse mussten Ende 2000 vorliegen um die vorgesehenen netzweiten Erhebungen im Jahre 2001 durchführen zu können (ASTRA).

## 7. FP 7, Auftrag und Zielsetzung der FS 7

### Auftrag FP7 des ASTRA

#### **FP7, Forschungsprojekt 7: Unterhalt 2000, Bau von Vergleichsstrecken mit unterschiedlichen oberen Tragschichten auf der Nationalstrasse A2**

*Forschungsziel:* Das Ziel der Realisierung dieser Versuchsstrecken besteht darin, die in den übrigen Forschungsprojekten optimierten Beläge sowie weitere Belagsvarianten im Massstab 1:1 einzubauen, deren Eigenschaften zu überprüfen sowie das Langzeitverhalten unter schwerer Belastung zu überwachen.

*Forschungsstelle:* IMP Bautest AG, Institut für Materialprüfung, Oberbuchsitzen

*Projektleiter:* Ch. Angst, Dr. sc. techn. , dipl. Ing. ETHZ

### Zielsetzung von FP 7

#### **Kurzfassung der Zielsetzung:**

Das Ziel dieser Versuchsstrecken besteht darin, die in den übrigen Forschungsprojekten optimierten Beläge sowie weitere Belagsvarianten im Massstab 1:1 einzubauen, deren Eigenschaften zu überprüfen sowie das Langzeitverhalten unter schwerer Belastung zu überwachen.

#### **Umsetzung**

Zur Abwicklung der erforderlichen Forschungsarbeiten wurde eine Projektorganisation bestehend aus mehreren Forschungsprojekte realisiert.

Parallel zu den Laborarbeiten sowie zu den auf dem Rundlauf der ETH Zürich eingebauten Beläge sollte eine Teststrecke auf einer Autobahn eingebaut werden.

Auf der Nationalstrasse A2 Abschnitt Augst – Sissach, Verzweigung Augst – Arisdorf konnte auf der Normalspur Fahrtrichtung Luzern zwischen den km 15.520 und 17.860 eine Versuchsstrecke, bestehend aus 10 Versuchsfeldern, realisiert werden.

# D UMSETZUNG DER FORSCHUNGSPROJEKTE (FS)

## ( Umsetzung durch die Forschungsstellen FS )

### 1. FP 1, UMSETZUNG Projekt „Verhaltensbilanz“

Viagroup SA, Lausanne und Winterthur

#### Zielsetzung von FP 1: Verhaltensbilanz

*Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine Analyse der vorhandenen Altersstruktur und der entsprechenden Zustände der Beläge auf dem Nationalstrassennetz als konkrete Antwort auf die Frage:*

**„ Wie lange hat eigentlich Bauweise / Belag xy gehalten?“.**

*Soweit möglich (und bei entsprechend vorhandenen Zustandswerten kurz vor Durchführung einer Erhaltungsmassnahme) sollten auch mittlerweile erneuerte Beläge berücksichtigt werden.*

*Die erwähnte Zielsetzung des Gesamtprogramms verlangte einen quantifizierenden Vergleich - welcher wohl selbstverständlich erscheint - , bei der praktischen Realisierung allerdings sehr bald an Grenzen stösst. Gesamtschweizerisch liegen verschiedene Auswertungen der Altersstruktur des Nationalstrassennetzes vor (siehe Abbildung 1), die sich jedoch weitgehend auf das ursprüngliche Neubaudatum abstützen und die verschiedenen durchgeführten Erhaltungsmassnahmen nicht berücksichtigen.*

*(Eine im Jahre 1991 auf dem Bündner Teilstück der A13 durchgeführte Untersuchung hat z.B ergeben, dass in einer Fahrriichtung 84 bezüglich Einbauzeitpunkt oder Materialart unterschiedliche Teilstrecken bestanden mit einer Länge zwischen 65 m und ca. 8 km und einer Altersverteilung über einen Zeitraum von ca. 30 Jahren. Detaillierte Angaben dieser Art liegen der Forschungsstelle auch für die Kantone SG (A1, A3, A13) und TI (A2, A13) vor.)*

#### **Vorgehen**

*Die Arbeit verlangte die Anlage einer entsprechenden Datenbank und die Zuordnung verschiedener Daten aus dem Gruppen:*

- *Bestand (Schichtaufbau mit Typ, Dicke und Einbaujahr) inkl. Erhaltungsgeschichte,*
- *Verkehrsbelastung seit Eröffnung,*
- *Zustandsangaben.*

*Bei der Entwicklung neuer Beläge im Rahmen des Gesamtprojektes Unterhalt 2000 wird auch eine Betrachtung bisher "bewährter" Beläge in Erwägung gezogen. Im Hinblick auf deren Verwendung unter heutigen Bedingungen muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass heute eine vergleichbare Gebrauchsdauer in Jahren einer wesentlich höheren Anzahl Lastwechsel entspricht. Dies sollte deshalb auch bei der Festlegung der Lastwechselzahlen für Laborversuche und andere Prüfungen Berücksichtigung finden.*

Die Datenbeschaffung erfolgte über die folgenden Quellen:

- Bestandesdaten: kantonale Tiefbauämter,
- Verkehrsdaten: veröffentlichte Berichte über die automatischen Verkehrszählungen und über die Kategorienzählungen im 5-Jahres-Rhythmus (zur Evaluation des Schwerverkehrsanteils und der äquivalenten Verkehrsbelastung),
- Zustandsdaten: Archive IVT und VIAGROUP AG sowie nach Bedarf kantonale Tiefbauämter.

Zur Interpretation der Ergebnisse sowie zum Zwecke der Bildung einzelner "Materialgruppen oder -Familien" werden die spezifischen Erfahrungen der EMPA und des LAVOC mitberücksichtigt.

Alle Detailangaben aus der Datenzusammenstellung werden dem Schlussbericht in elektronischer Form beigelegt (CD mit Dateien im MS EXCEL oder MS ACCESS-Format). Es wird insbesondere auch darauf hingewiesen, dass Datenzusammenstellungen dieser Art für die empirische Herleitung von Verhaltensmodellen von grossem Nutzen sein können.



Abbildung 1: Altersstruktur der Nationalstrassen ( ASTRA, MSE, Standbericht Nr. 1, 1995)

## **Organisation der Arbeit**

Die Hauptverantwortung für die Durchführung der Forschungsarbeit FP1 und die gesamte Berichterstattung für alle Forschungsprojekte sollte ursprünglich der VIAGROUP AG obliegen. Gemäss dem Grundprinzip der Gesamtprojektes, das für den Bereich Strasse eine weitgehende Mitbeteiligung aller Forschungsnehmer an allen Forschungsprojekten vorsah, sollten auch die übrigen Forschungsstellen an diesem Forschungsprojekt FP 1 mitarbeiten und dabei die spezifischen Kenntnisse und Erfahrungen einbringen:

- **EMPA:** Forschungsprojekte auf dem Gebiet der Langzeitbeobachtung und der Materialuntersuchung sowie Ergebnisse aus Schadenuntersuchungen und Einbaukontrollen.
- **IVT, ETHZ:** Forschungsprojekte auf dem Gebiet der Langzeitbeobachtung sowie Ergebnisse von Kontrollmessungen der Längsebenheit im Zeitraum 1965 bis 1985 und der Griffigkeit im Zeitraum 1965 bis 1999.
- **LAVOC, EPFL:** Forschungsprojekt Versuchsstrecken VS sowie Ergebnisse aus Schadenuntersuchungen und Einbaukontrollen.
- **VIAGROUP AG:** Forschungsprojekte auf dem Gebiet der Langzeitbeobachtung sowie Ergebnisse aus der Zustandserfassung und entsprechende Analysen in den Jahren 1988 bis 1999.

## **Zeitplan**

Für dieses Forschungspaket FP 1 wurde eine Bearbeitungszeit von 2 Jahren (!) vorgesehen. Bei Beginn der Forschungsarbeiten im Frühling/Sommer 2000 war demnach ein Abschluss der Arbeiten im Frühling/Sommer 2002 vorgesehen, also ca. bei Halbzeit des gesamten Forschungsprogrammes.

Damit sollte sichergestellt werden, dass vor Abschluss der übrigen Forschungsprojekte fundierte Vergleichsgrundlagen für die Dauerhaftigkeit vorliegen würden....

## **Ergebnisse von FP 1**

### **Entwicklung des Normenumfeldes**

Der Bau der Nationalstrassen geht auf die Genehmigung des Nationalstrassengesetzes im Jahre 1956 zurück und hat in den frühen 60-er Jahren angefangen. Die Fertigstellung des Teilabschnittes der N1 zwischen Genf und Lausanne vor der Eröffnung der Landesausstellung EXPO 64 in Lausanne im April 1964 stellt den Beginn des Nationalstrassenzeitalters in der Schweiz dar. Wohl war bereits in der zweiten Hälfte der 50-er Jahre ein erster Autobahnabschnitt in der Schweiz dem Verkehr übergeben worden (Abschnitt Luzern-Hergiswil der N2), doch wurde dieser unter kantonaler Verantwortung noch ausserhalb des Bauprogrammes der Nationalstrassen gebaut.

Der Beginn des Nationalstrassenbaus hat in der Schweiz eine ausserordentlich intensive Auseinandersetzung mit verschiedenen technischen Aspekten des Strassenbaus ausgelöst. Aus der im Rahmen dieser Arbeit besonders interessierenden Sicht der Dimensionierung und der Materialauswahl sei auf den kurz zuvor abgeschlossenen AASHTO-Strassentest [3] hingewiesen, der weltweit einen grossen Einfluss auf die Dimensionierung des Strassenoberbaus hatte.

## Dimensionierungsgrundlagen, Bewertung (Normen zu Dimensionierung, Frost )

### Wechsel der Dimensionierungsnormen

Die Umsetzung der Erkenntnisse aus dem AASHTO-Strassentest in die Dimensionierungsnormen von Strassen erfolgte in der Schweiz erst im Jahr 1971. Seither sind diese Normen bereits zweimal angepasst worden, und damit sind es insgesamt vier unterschiedliche Normengrundlagen (siehe Tabelle 1), welche während der bisherigen Bauzeit des Nationalstrassennetzes Gültigkeit hatten.

### Anpassung des Zweckes der Dimensionierung

Seit dem Beginn der Anwendung von Dimensionierungsnormen auf der Grundlage der Ergebnisse des AASHTO-Strassentests [4], also seit 1971 wird bei der Angabe des Zweckes der Dimensionierung mit dem Begriff der Gebrauchsdauer operiert, wobei die Angabe des Zweckes zum Teil leicht unterschiedlich ist.

Ein gemeinsames Merkmal dieser unterschiedlichen Definitionen ist die Tatsache, dass die Bemessung der Schichtdicken immer von einer Gebrauchsdauer von 20 Jahren ausgeht. Nach der ursprünglichen AASHTO- bezogenen Normfassung von 1971 wurde bei den Berechnungen der erforderlichen Schichtdicke mit den Bemessungsnomogrammen der AASHTO-Methode von einer Endbefahrbarkeit von 2.5 für Strassen mit einem TF-Wert von über 1000 Normachlasten pro Tag ausgegangen und auch die folgenden Normrevisionen haben sich an diese Vorgabe gehalten.

**Tabelle 1:** Dimensionierungsnormen in der Zeit des Nationalstrassenbaus

Phase	Zeitbereich	Norm-Nr.	Bemerkungen
Phase 1	bis 1971	SN 640 330	Dimensionierung beruhend auf die CBR-Methode
Phase 2	1972 bis 1988	SN 640 322 SN 640 326	Einführung einer Normengruppe welche im wesentlichen auf die Erkenntnisse aus dem AASHTO-Strassentest beruht
Phase 3	1988 bis 1997	SN 640 324	Anpassung der bestehenden Normen mit Umwandlung der Darstellung von Diagrammen zu einem "Katalog"; klassenweise Berücksichtigung von Verkehrslasten und Tragfähigkeit des Untergrundes; Anpassung einzelner Materialkoeffizienten und Verringerung der Anforderungen bezüglich Frostdimensionierung; ansonsten Beibehaltung der Bemessungsgrundsätze nach AASHTO.
Phase 4	ab 1998	SN 640 324a	Leichte Anpassung der bestehenden Norm und Einfügen einer neuen Verkehrslastklasse T6 für höchste Beanspruchungen um die zwischenzeitlich eingetretene Verkehrszunahme zu berücksichtigen.

**Tabelle 2:** Der Zweck der Dimensionierung im Wandel der Zeit

<b>Norm</b>	<b>Jahr</b>	<b>Zweck der Dimensionierung</b>
SN 640 315 (SN 640 322) (SN 640 326)	1971	Die Dimensionierung hat zum Zweck, die Dicke der verschiedenen Schichten eines Strassenoberbaues so zu bestimmen, dass eine genügende Befahrbarkeit der Strasse während der ihr zugedachten Gebrauchsdauer gewährleistet ist.
SN 640 324	1988	Die Dimensionierung hat zum Zweck, die Gesamtdicke sowie die Dicke der verschiedenen Schichten des Strassenoberbaus derart zu bestimmen und die Baustoffe so zu wählen, dass die Strasse ohne Oberbauverstärkung während einer Gebrauchsdauer von mindestens zwanzig Jahren die Verkehrslasten zu tragen und eine genügende Befahrbarkeit zu gewährleisten vermag
SN 640 324a	1997	Die Dimensionierung hat zum Zweck, die Gesamtdicke sowie die Dicke der verschiedenen Schichten des Strassenoberbaus derart zu bestimmen und die Baustoffe so zu wählen, dass die Strasse ohne Oberbauverstärkung während einer Gebrauchsdauer von mindestens zwanzig Jahren die Verkehrslasten zu tragen vermag.

### **Langzeitbeobachtung und Vergleich von Dimensionierungsnormen**

*Zur Beurteilung der angewendeten Dimensionierungsgrundlagen haben auch zwei Forschungsarbeiten beigetragen, welche im Zeitraum von 1970 bis ca. 1990 durchgeführt wurden:*

- Beobachtung des Verhaltens ausgewählter Strassenabschnitte [5, 6]
- Überprüfung von Dimensionierungsmethoden [7]

*Zusätzlich haben auch verschiedene Grossversuche auf der Rundlaufanlage [8, 9, 10, 11, 12] der ETH Zürich und in der halle fosse [13, 14, 15] der EPF Lausanne dem Aspekt der Dimensionierung eine grosse Bedeutung beigemessen.*

*Bei der Langzeitbeobachtung hat sich gezeigt, dass das beobachtete Verhalten der untersuchten Strecken im allgemeinen eher besser war, als dies aufgrund der Dimensionierungsmethoden und ihrer Grundlagen hätte erwartet werden können. Die als "eher konservativ" bezeichnete Charakteristik der auf den Ergebnissen der AASHTO-Versuche gründende Dimensionierungsmethode tritt insbesondere bei der Bemessung von Strassen mit bituminösem Belag hervor, währenddem im Falle der Betonbeläge die Methode der tatsächlichen Gebrauchsdauer viel näher kommt. Bezüglich der genannten Ergebnisse ist allerdings darauf hinzuweisen, dass die untersuchten Strecken noch weit entfernt waren vom Erreichen eines fortgeschrittenen Schadenbildes und einer kumulierten Verkehrsbelastung entsprechend dem angenommenen Dimensionierungsverkehr.*

## Belags- und Bindemittelnormen (bituminöse Beläge)

### Beläge

Bezüglich der Entwicklung im Bereich der Belagsnormen und im Rückblick können 3 Hauptperioden unterschieden werden:

- Periode bis 1976 mit Belagsnormen der Jahre 1961/67 (HMT) und 1962 (Beläge im Sinne von Deck- und Ausgleichsschichten)
- Periode 1976-1988: Anpassung der Rezepturen, Bindemittelwahl, Bindemittelgehalt.
- Periode 1988-1997: neue Siebreihen, keine Ausgleichsschichten mehr, Verminderung des Rundkornanteils in den Tragschichten.

Die letzte Normrevision (innerhalb der Betrachtungsperiode bis Ende 2000) stammt aus dem Jahre 1997 und betrifft in erster Linie die Einführung der Sorte der H-Beläge.

In der nachfolgenden Übersichtstabelle ist die zeitliche Abfolge der Änderungen der Normen über die bituminösen Beläge und Tragschichten dargestellt.

**Tabelle 3:** Änderungen der Normen für bituminöse Beläge in der betrachteten Periode

Jahr	1953	1961	1962	1967	1972	1976
					640 416 Sandasphalt- überzüge	
		40 421		40 421a/ 640 421a HMT		
	40 430		40 430a/ 640 430a Beläge+HMT			
						640 431 Beläge+HMT
			40 432a/640 432a			
					640 438	
<b>Bindemittel</b>						
Bitumen	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Teer	ja	ja	ja	ja	ja	ja
PmB	nein	nein	nein	nein	nein	nein
Spez. Bit.	nein	nein	nein	nein	nein	nein

Jahr	1988	1990	1994	1996	1997	2000
	640 431a Asphalt- betonbeläge				640 431b Asphalt- betonbeläge	
			640 432 SMA Vornorm	640 432a SMA		
		640 433 DRA Vornorm		640 433a DRA		640 433b DRA
			6740 435 Rauhasphalt	640 435a Rauhasphalt		
<b>Bindemittel</b>						
Bitumen	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Teer	ja	ja	ja	ja	nein	nein
PmB	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Spez. Bit.	nein	nein	nein	nein	ja	ja

## **Bindemittel**

*Bei den Bindemitteln sind im betrachteten Zeitraum ebenfalls grössere Veränderungen eingetreten. Hier sind zunächst Änderungen bei der Produktionsmethodik und bei den Provenienzen der Rohöle zu nennen, die zur Produktion von Bitumen herangezogen werden. Bei der nach wie vor im wesentlichen auf physikalische Prüfungen beschränkten Sortenbezeichnung der Bindemittel werden diese vorgenannten Änderungen auch in Zukunft weiter bestehen.*

*Hauptsächliche Änderungen sind einerseits die Verbannung des Teeres als Bindemittel oder Bindemittel-Komponente, welcher je nach Region mehr oder weniger umfangreich eingesetzt oder gar bevorzugt wurde und andererseits die seit Anfang der 90-er Jahren immer mehr zum Einsatz gelangenden polymermodifizierten Bindemittel verschiedenster Art sowie andere Spezialbindemittel, welche das bis anhin praktisch ausschliesslich verwendete Naturasphalt (Trinidad) als Zusatzstoff konkurrenzieren und teilweise verdrängen.*

## Entwicklungen beim Betonbelag

Beim Betonbelag erfolgte während der betrachteten Periode der Übergang von der zweiten zur dritten Generation von Betonbelägen, wie sie in der folgenden Tabelle näher definiert werden.

**Tabelle 4:** Änderungen bei den Betonbelägen in der betrachteten Periode

<b>Belagstyp</b>	<b>1. Generation bis ca. 1960</b>	<b>2. Generation ca. 1958 - 1978</b>	<b>3. Generation ab ca. 1976</b>
<b>Merkmale</b>			
einschichtig	x		x
zweischichtig		x	x
bewehrt	x	x	
unbewehrt			x
Plattenlängen	8...12 m	6...8 m	5 m
Frosttausalzbeständigkeit			
- Unterschicht			x
- Oberschicht		x	x
Fugenausbildung			
- Vibrierfugen	x	x	
- Fräsfugen		x	x

Bezüglich der Gültigkeit von Normen für die Ausführung von Betonbelägen sind folgende Normen zu nennen:

- 1967: SN 640 460a, SN 640 462a, SN 640 464, SN 640 466, SN 640 467
- 1976: SN 640 461 Zementbetonbeläge, Ausführung, Anforderungen
- 1994: SN 640 461a Betonbeläge

Im Vergleich zu den Angaben in Tabelle 4, welche den Übergang von der zweiten zur dritten Generation der Betonbeläge um das Jahr 1976 herum zeitlich festlegt, sieht die im gleichen Jahr erschienene Norm SN 640 461 nach wie vor die Verwendung von Armierungsnetzen zwischen Ober- und Unterbeton vor. Ebenfalls können die Quertugen entweder gefräst oder einvibriert werden. Die Frost-Tausalzbeständigkeit wird aber für alle Schichten verlangt. Die Plattenlänge wird auf maximal 6 m limitiert.

Die neue Betonbelagsnorm aus dem Jahre 1994 fordert schliesslich gefräste Quertugen, verbietet die Armierung und schränkt die Plattenlänge auf 5 m ein. Die entsprechende Praxis hat tatsächlich früher eingesetzt (siehe Detailangaben in der Liste der Betonteilstrecken in Kapitel 3.3), allerdings sind nach Erscheinen der neuen Norm keine Betonbeläge mehr auf Nationalstrassen eingebaut worden (Ausnahme: Plattenerneuerung auf 400 m Länge auf der N2 zwischen Flüelen und Erstfeld, auf dem rechten Fahrstreifen, in Richtung Süd).

## Zeitliche Entwicklung des Nationalstrassenbaus

### **Entwicklung der Netzlänge und Altersverteilung**

*Die Entwicklung der Netzlänge der Nationalstrassen wird zum Zwecke der Übersichtlichkeit anhand von Graphiken dargestellt, betreffend*

- die Entwicklung der jährlichen Verkehrseröffnungen
- die Entwicklung der kumulierten Strassenlänge
- die Altersverteilung des Nationalstrassennetzes

*Das vorerst erstaunliche Vorkommen verschiedener Verkehrsfreigaben vor 1960 (siehe Abbildung 2) lässt sich einerseits mit der bereits erwähnten, und vor der Abstimmung über das Gesetz über die Nationalstrassen gebaute Teilstück der N2 zwischen Kriens/LU und der Kantonsgrenze NW, und andererseits mit den Arbeiten an verschiedenen, bereits bestehenden Gemischtverkehrsstrassen (z.B. Axenstrasse UR/SZ, Gotthardpassstrasse UR, N5/N8 BE, Simplonpassstrasse VS) die ebenfalls zum Netz der Nationalstrassen gehören mit einer heutigen (Ende 2000) Gesamtlänge von 87.9 km. Mit dem weiteren geplanten Ausbau des Nationalstrassennetzes, das unter anderem die Umwandlung von einer Gemischtverkehrsstrasse in eine Autostrasse (N8 OW) vorsieht, wird die Gesamtlänge an Gemischtverkehrsstrassen im geplanten Endausbau eine Gesamtlänge von 60.6 km aufweisen.*

*Die Zuordnung der Jahreszahlen der Verkehrseröffnung erfolgte aufgrund der Angaben in den jährlich vom Bundesamt für Strassen ASTRA veröffentlichten Statistiken [16]. Kleinere Zuordnungsfehler ohne grosse Folgen für die Gesamtauswertung können dort entstanden sein, wo für die gleiche Strecke (bzw. für nicht näher bezeichnete Teilabschnitte davon) mehrere Jahreszahlen der Eröffnung genannt wurden und die Zuordnung innerhalb dieser Auswahl eher willkürlich erfolgte, wobei meistens das ältere Datum gewählt wurde. Dieses Vorgehen betrifft vor allem verschiedene Gemischtverkehrsstrassen (z.B. Gotthardpassstrasse, Axenstrasse).*

*Per Ende des Jahres 2000 hatte das Nationalstrassennetz eine Gesamtlänge von 1638 km erreicht, was 88.2% der geplanten Gesamtlänge von 1858 km entspricht. Von den verbleibenden 220 km wurden ca. 30% in den Jahren 2001 und 2002 eröffnet, für die restliche Fertigstellung des Netzes muss bis nach dem Jahre 2020 gewartet werden.*

Verkehrseröffnungen der Nationalstrassen pro Jahr

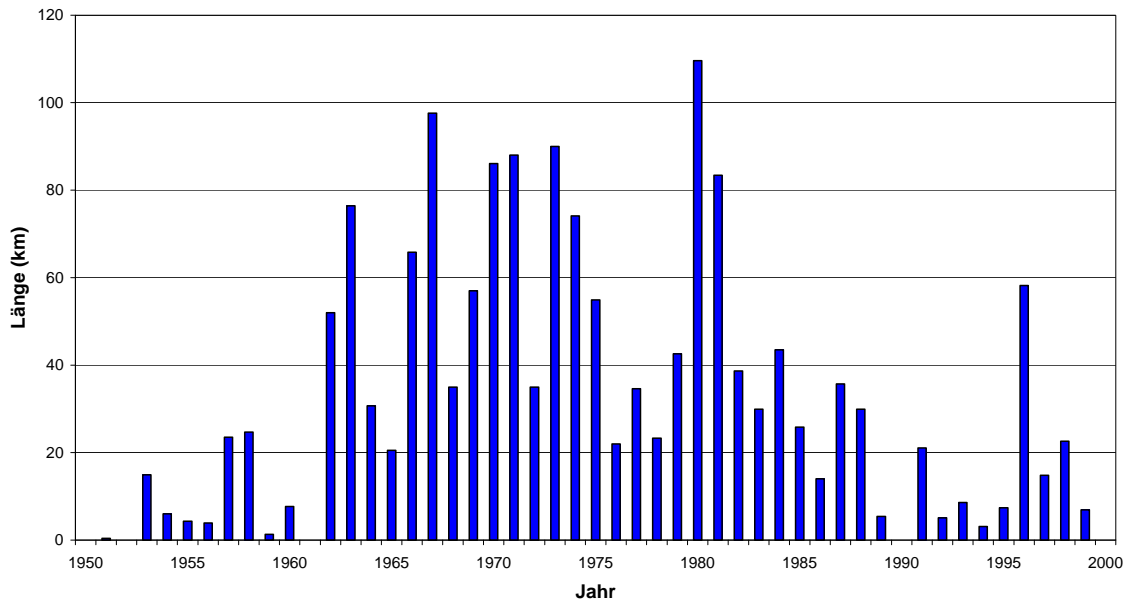


Abbildung 2: Jährliche Verkehrseröffnungslängen für das Nationalstrassennetz bis Ende 2000

Entwicklung der Netzlänge der Nationalstrassen nach Art

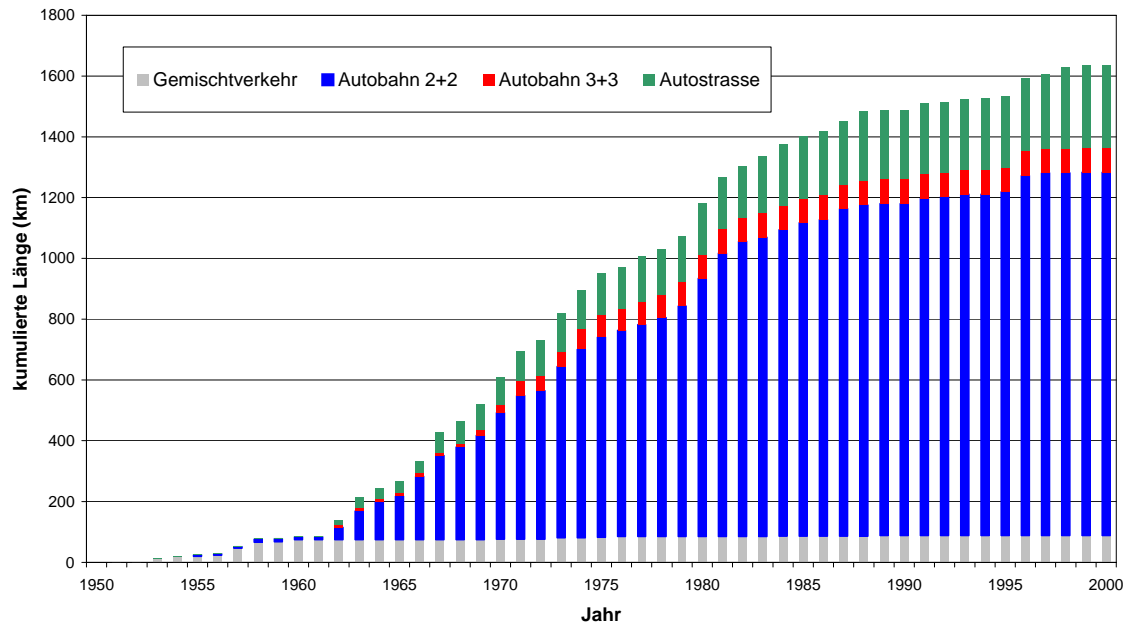


Abbildung 3: Entwicklung der Netzlänge der Nationalstrassen nach Strassenkategorien bis Ende 2000.

Altersverteilung Nationalstrassen nach Länge und %, Anfangs 2001

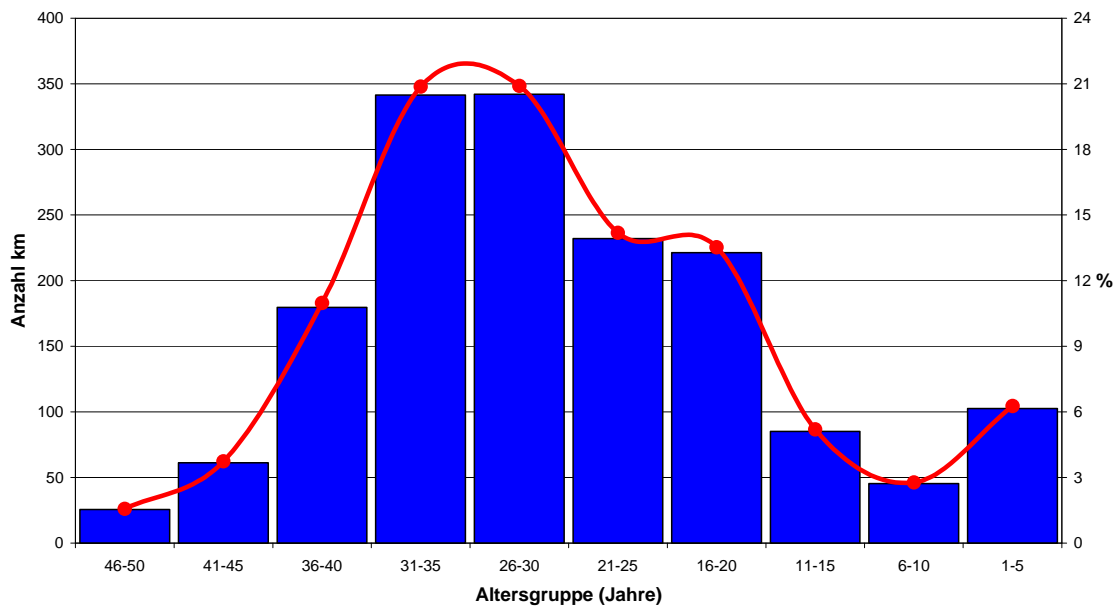


Abbildung 4: Altersverteilung (Bezug: Jahr der Verkehrseröffnung) der Nationalstrassen , Stand Anfang 2001

Summenkurve der Altersverteilung Nationalstrassen, Anfangs 2001

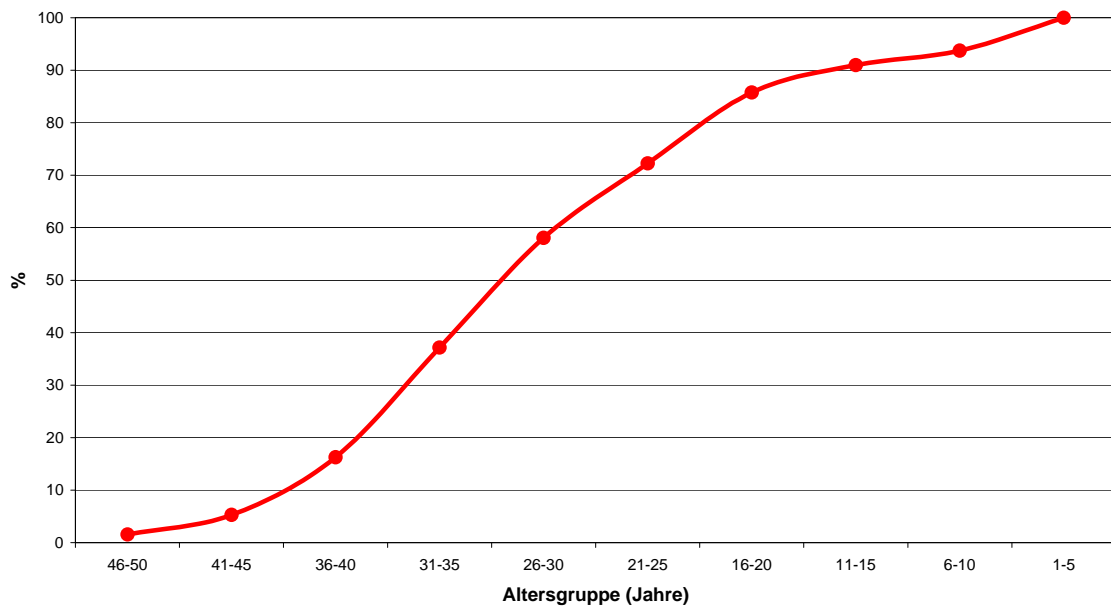


Abbildung 5: Summenkurve der Altersverteilung des Nationalstrassennetzes, Stand Anfang 2001.

## **Verkehrsentwicklung**

### **Grundlagen und Vorgehensmethodik**

Die Berücksichtigung der Verkehrsbelastung muss sowohl die Gesamtfrequenzen (dargestellt durch den DTV-Wert) als auch die tatsächlichen Lasten (dargestellt durch die äquivalente Verkehrslast TF, bzw. W) umfassen. Angaben über die Gesamtfrequenzen sind durch die Ergebnisse der automatischen Verkehrszählungen genügend dokumentiert, hingegen bestehen bezüglich der Kenntnisse über die Verkehrslasten grössere Wissenslücken. Mit Ausnahme einzelner Achslastwägungen in der Mitte der 70-er Jahre [17, 18] sind über grössere Zeiträume kaum Angaben über die tatsächlichen Verkehrslasten verfügbar (neue WIM-Wägestationen sind erst seit kurzem [2] im Einsatz) und die Verkehrszählungen nach Kategorien, welche die Ermittlung des Schwerverkehrsanteils ermöglichen, werden nur in einem 5-jährigen Rhythmus durchgeführt.

Die Ergebnisse der erwähnten Achslastwägungen aus den siebziger Jahren hatten im Allgemeinen bestätigt, dass im Normalfall die in den damaligen Dimensionierungsnormen angenommene Relation "1 Schwerverzeug = 1.2 Standardachslasten" zutrifft. Abweichungen wurden damals bei speziellen Situationen festgestellt, wo eine ungleiche Richtungsverteilung vorliegt, so z.B. auf der N3 Basel-Zürich (voll beladene Fahrzeuge, davon sehr viele Tankwagen, aus dem Basler Rheinhafen und entsprechende Leerfahrten in umgekehrter Richtung) und auf der HLS Kloten-Bülach, bedingt durch umfangreiche Kiestransporte aus dem Zürcher Weinland und die Verwendung von Drei- und Vierachs-Fahrzeugen.

Eine generelle Auswertung aller Messungen hatte überdies auch gezeigt, dass der Richtwert von 1.2 nach Norm insbesondere dann zutrifft, wenn der Anteil an zweiachsigen Einzelfahrzeugen (Lastwagen ohne Anhänger) 50% des gesamten Schwerverkehrs nicht überschreitet. Seit der Zeit der genannten Achslastwägungen hat jedoch nicht nur eine deutliche Zunahme des Schwerverkehrs stattgefunden, sondern auch die Zusammensetzung der Fahrzeugflotten hat sich in Richtung eines grösseren Anteils an Lastenzügen (Lastwagen mit Anhänger) und vor allen an Sattelschleppern entwickelt. Diese Änderung der Zusammensetzung des Schwerverkehrs auf den Nationalstrassen dürfte zu einer Änderung der Relation Anzahl Standardachslasten zu Normachslasten pro Schwerverzeug auf heute etwa 1.6 geführt haben.

Für die Berechnung der Verkehrswerte im Rahmen dieses Berichtes wurde deshalb entschieden, ausschliesslich von den Ergebnissen der alle 5 Jahre stattfindenden Zählungen auszugehen (1970, 1975, ...) [19]. Die Auswertung der Zählergebnisse dieser Jahre umfasst auch die Bestimmung des Anteils an Schwerverkehr, werden doch im Rahmen dieser Zählungen an ausgewählten Zähltagen auch Kategorienzählungen vorgenommen. Dabei wurden bei den hier ermittelten Schwerverkehrsanteilen folgende Richtwerte für die Bestimmung der äquivalenten Verkehrslast angewendet:

## **Richtwerte**

### **Gesamtfrequenzen**

Will man die Dauerhaftigkeit von Belägen im Sinne von Jahren der Lebens-, Gebrauchs- oder Nutzungsdauer, so ist im Rückblick auch die Entwicklung der Verkehrsbelastung zu berücksichtigen. So könnte auf die Behauptung, dass ein Belag aus den späten 60-er Jahren gut 20 Jahre "gehalten" hat, entgegnet werden, dass bei der heutigen Verkehrsbelastung die Nutzungsdauer auf weitaus bescheidenere 10 Jahre geschrumpft wäre.

In der nachfolgenden Tabelle sind für verschiedene Abschnitte des Nationalstrassennetzes mit einer relativ frühen Verkehrseröffnung die DTV-Jahresmittelwerte mit 5-jährigem Intervall angegeben.

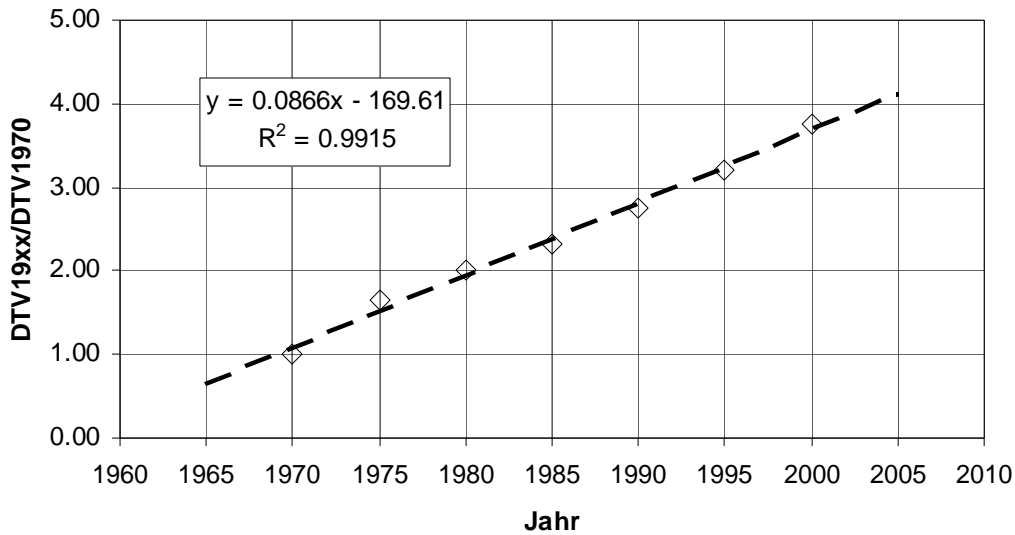
**Tabelle 9:** Entwicklung der Anzahl Standardachsen pro Schwerfahrzeug (Annahme für die Berechnungen)

Jahr	Anzahl Standardachsen pro Schwerfahrzeug
1970	1.20
1975	1.25
1980	1.30
1985	1.35
1990	1.40
1995	1.50
2000	1.60

**Tabelle 10:** Entwicklung der DTV-Werte 1970-2000 für ausgewählte Strecken des Nationalstrassennetzes.

Jahr	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2000/1970
<b>Strecke</b>									
N3 AG		10300	14300	18500	21100	25700	28600	44200	<b>4.29</b>
N1 SO		18900	30000	36200	44000	52500	61500	69900	<b>3.70</b>
N6 BE		16100	23500	30150	34600	41100	44900	51800	<b>3.22</b>
N1 AG		14800	30250	35700	36000	43800	48900	51400	<b>3.47</b>
N3 ZH		14800	25800	31700	37300	41550	42200	47100	<b>3.18</b>
N1 BE	9100	18900	30000	36200	44000	52500	73900	88700	<b>4.69</b>
<b>Summe</b>		93800	153850	188450	217000	257150	300000	353100	<b>3.76</b>
2000/19xx		3.76	2.30	1.87	1.63	1.37	1.18	1.00	
19xx/1970		1.00	1.64	2.01	2.31	2.74	3.20	3.76	

### Verkehrszuwachs seit 1970



**Abbildung 7:** Verkehrszuwachs seit 1970 auf ausgewählten Nationalstrassenabschnitten

Blickt man etwas in die nahe Zukunft, so lässt sich aus diesen Ergebnissen ableiten, dass einer Gebrauchsdauer von einem Jahr im Jahre 2004 eine solche von vier Jahren im Jahre 1970 entsprochen hätte. *Anders ausgedrückt heisst das, dass ein Belag aus dem Jahre 1970 bei der heutigen Verkehrsbelastung bei Ablauf der Garantiezeit bereits sanierungsbedürftig wäre.*

In Abbildung 8 wird die Entwicklung der Verkehrsbelastung auf den Nationalstrassen anhand des Mittelwertes aller verfügbaren automatischen Zählstellen dargestellt, ergänzt um die Angaben der Entwicklung der Anteile an Zählstellen, wo die Verkehrsbelastung 50'000 Fahrzeuge pro Tag übersteigt.

Die zuletzt veröffentlichten Daten für das Jahr 2000 sind in Abbildung 9 enthalten.

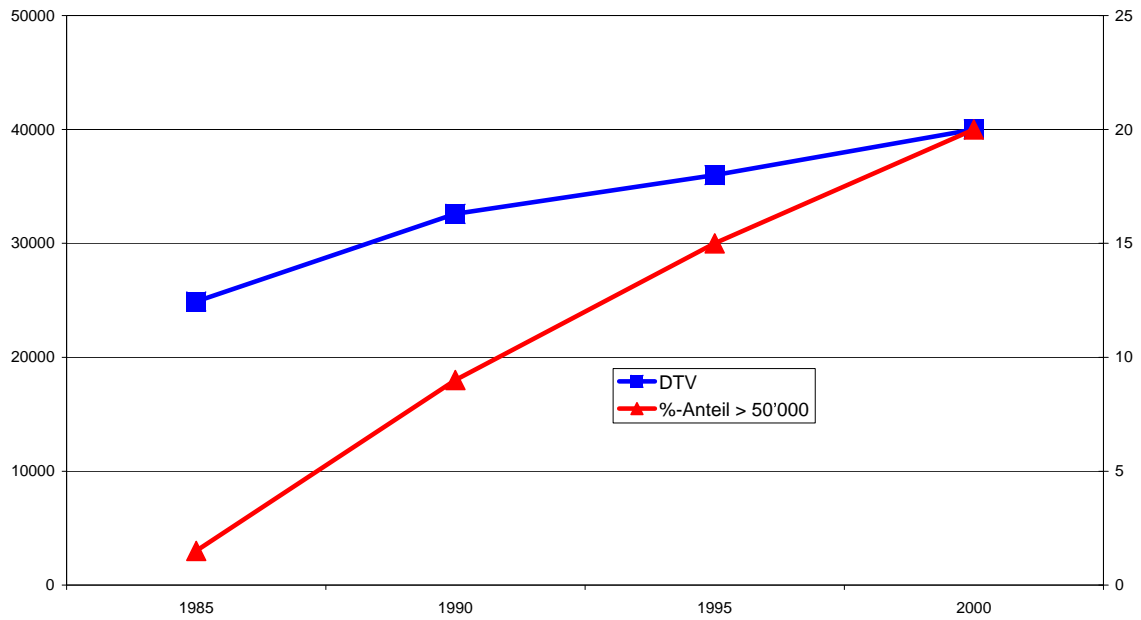
### Schwerverkehrsanteile, äquivalente Verkehrslast, TF-Werte

**Tabelle 11:** Entwicklung der Schwerverkehrsanteile auf verschiedenen Strassen/ Strassengruppen (für Nationalstrassen gemäss Liste der Zählstellen in der Beilage)

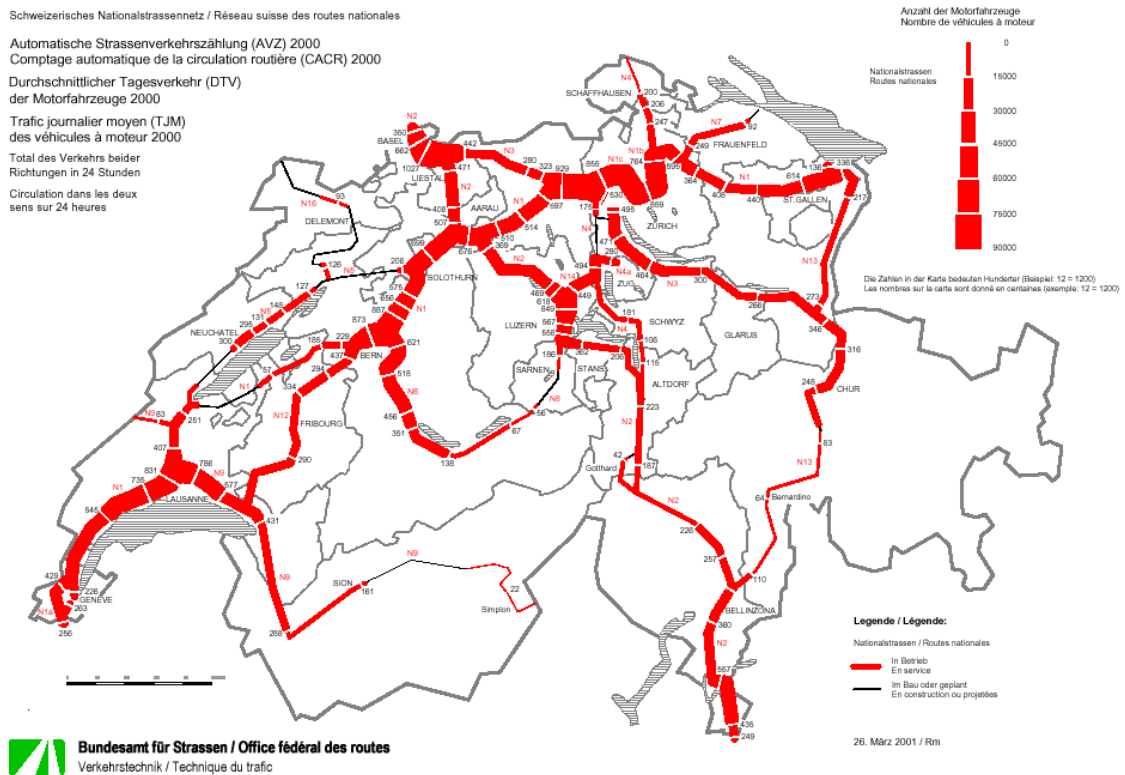
Strassengruppe	1985	1990	1995	2000
alle Zählstellen			5.6 %	5.9 %
alle Nationalstrassen			6.7 %	7.20 %
A 1			6.8 %	7.36 %*
A 2			8.5 %	10.75 %

\*: inkl. Nordumfahrung Zürich A20

## Verkehrsentwicklung auf den Nationalstrassen

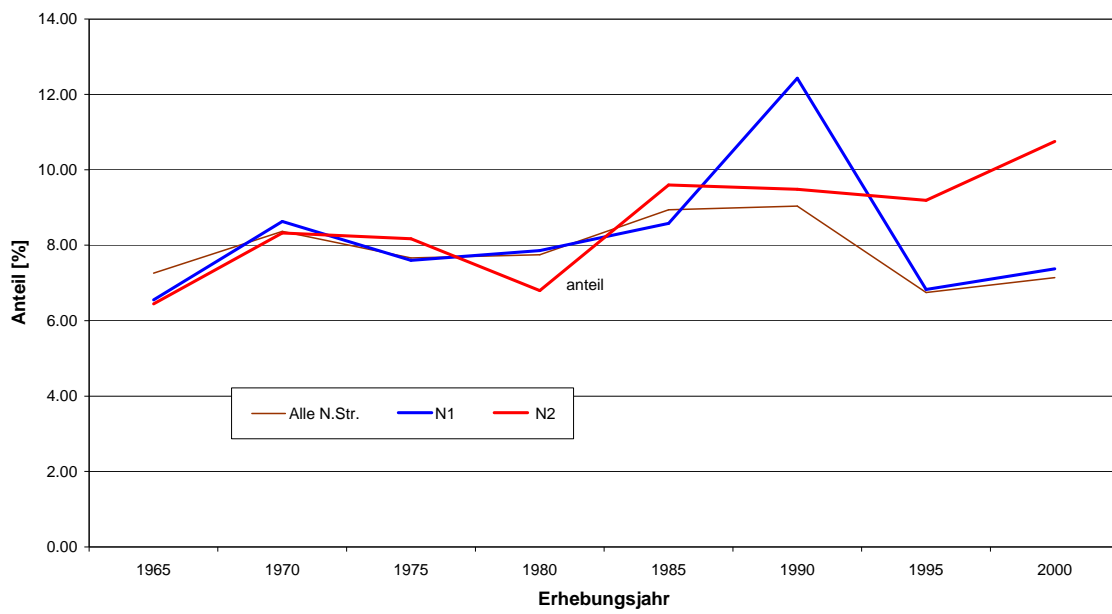


**Abbildung 8:** Verkehrsentwicklung auf den Nationalstrassen (Mittelwert aller Zählstellen)



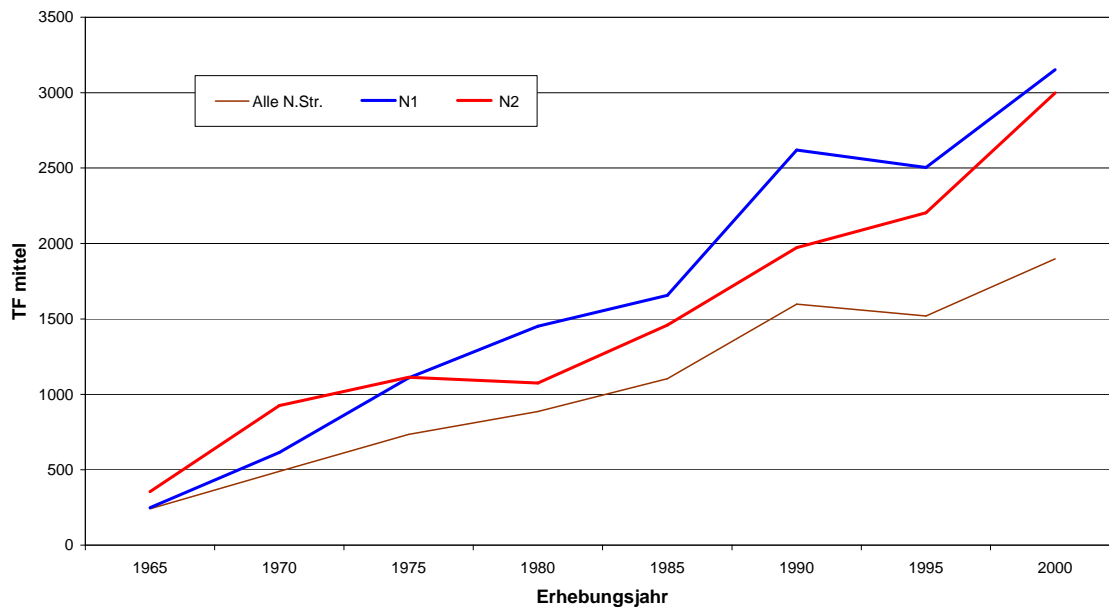
**Abbildung 9:** DTV-Werte 2000 für das Nationalstrassennetz (Quelle: ASTRA).

### Entwicklung der Schwerverkehrsanteile



**Abbildung 10:** Entwicklung der Schwerverkehrsanteile auf den Nationalstrassen von 1965 bis 2000.

### Entwicklung der mittleren TF-Werte



**Abbildung 11:** Entwicklung der mittleren TF-Werte auf den Nationalstrassen von 1965 bis 2000.

## **Konsequenzen aus der Verkehrsentwicklung**

Die im vorangehenden Abschnitt ermittelten Zuwachszahlen der Verkehrsbelastung mit einem Anstieg der DTV-Werte um einen Faktor von 4 in einem Zeitraum von 35 Jahren, und einem noch eher stärkeren Anstieg der TF-Werte in der gleichen Periode haben Auswirkungen auf den Dimensionierungsbedarf und auf die Beanspruchung der Beläge.

Bezüglich Dimensionierung führt gemäss einer "Faustregel" eine Verdoppelung des Dimensionierungsverkehrs zu einer Zunahme der Oberbaudicke um 30 mm Belag. So führt beispielsweise nach den VSS-Normen (SN 640 324a) auch der Übergang von der Verkehrslastklasse T4 auf T5, beziehungsweise von T5 auf T6 – mit einer jeweils dreifachen Verkehrszunahme zwischen aufeinanderfolgenden Klassen – zu einer Anpassung der Belagsdicke um 50 mm. Bezogen auf die Erhaltungstätigkeit auf den Nationalstrassen bedeutet dieser Anstieg der Verkehrslast, dass sich etwa alle 15 bis 20 Jahren, also etwa zum Zeitpunkt der Durchführung von Erhaltungsmassnahmen, ein Anpassungsbedarf der Gesamtschichtdicke um zusätzliche 30 mm Belag ergibt, dies zumindest für den rechten Fahrstreifen (die genannten 30 mm sollten bei der Wahl der Gesamtschichtdicke berücksichtigt werden).

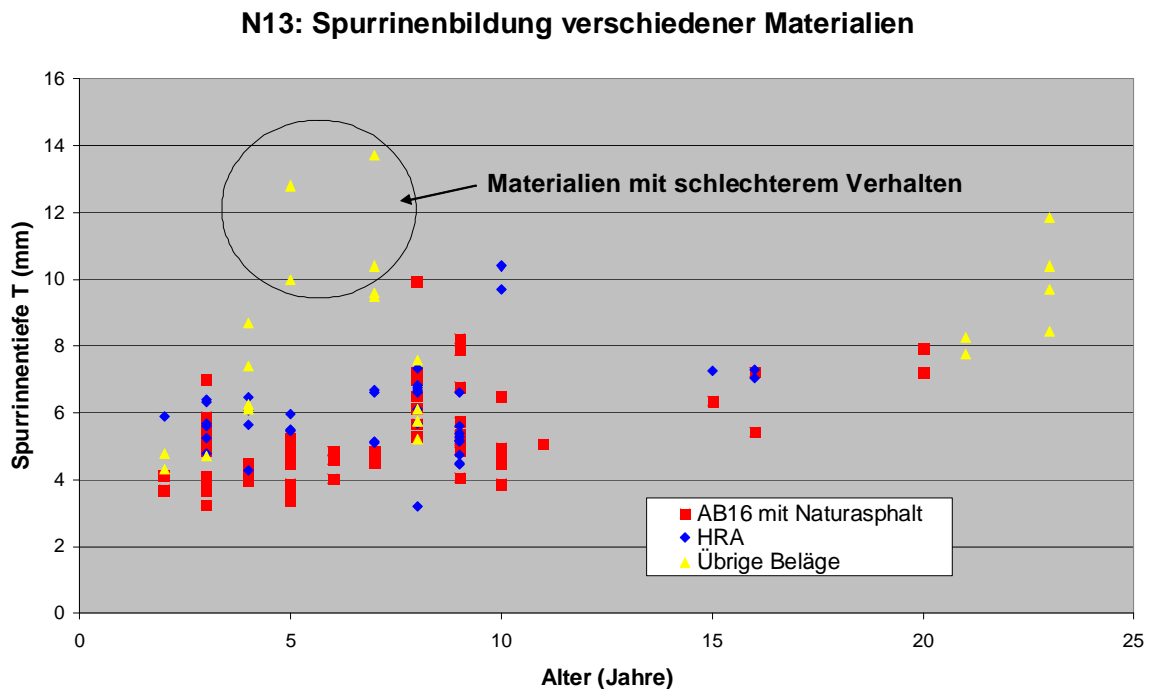
Die oben erwähnte Anpassung der Dimensionierung vermag zwar weiterhin das Auftreten von strukturellen Schäden weitgehend zu verhindern. Gegen die Schadenbildung an der Oberfläche, bzw. in den oberflächennahen Schichten, sowohl aus belastungsabhängiger als auch aus belastungsunabhängiger Ursache kann auch die beste Oberbaudimensionierung nichts ausrichten.

Bei der Entwicklung neuere Beläge im Rahmen des Gesamtprojektes Unterhalt 2000 wird auch eine Betrachtung bisher "bewährter" Beläge in Erwägung gezogen. Im Hinblick auf deren Verwendung unter heutigen Bedingungen muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass heute eine vergleichbare Gebrauchsdauer in Jahren einer wesentlich höheren Anzahl Lastwechsel entspricht. Dies sollte deshalb auch bei der Festlegung der Lastwechselzahlen für Laborversuche und andere Prüfungen Berücksichtigung finden.

# Erhaltungsgeschichte des Nationalstrassennetzes

## Allgemeines

Die in diesem Abschnitt beschriebene Untersuchung der Erhaltungsgeschichte des Nationalstrassennetzes ist eine Übersicht betreffend eine Auswahl von Nationalstrassen, deren Ergebnisse in erster Linie über eine Mittelwertbildung dargestellt werden. Bei dieser Mittelwertbildung ist zu berücksichtigen, dass das Verhalten jeder Strecke (gilt ebenso für die bei dieser Untersuchung nicht berücksichtigten Strecken) durch ein gewisses Mass an Zufälligkeiten, respektive an besonderen Bedingungen gekennzeichnet ist (siehe auch Abschnitt 2.7: Besondere Bedingungen), welche dazu geführt haben, dass die Mittelwertbildung stark durch Einzelereignisse beeinflusst wird. Dazu gehört auch die vereinzelte Experimentierbereitschaft der Verwaltungen (diese ist für den Fortschritt unerlässlich und positiv), neben Standardlösungen auch neue Produkte und Materialien zu testen, dies mit unterschiedlichem Erfolg. Die nachfolgende Abbildung 17, welche auf eine Untersuchung aus dem Jahre 1992 zur Verwendung verschiedener Belagsmaterialien unter dem Aspekt der Spurrinnenbildung herrührt [20], zeigt deutlich das Ergebnis der genannten Verwendung alternativer Lösungen.



**Abbildung 17:** Ergebnisse einer Untersuchung zur Spurrinnenbildung verschiedener Beläge auf der N13/GR (1992).

## Arten der Erneuerungsmassnahmen

Die Auswertung der berücksichtigten Strecken, und weiterer bekannter Erneuerungsfälle, nimmt eine Auflistung der verschiedenen bisher praktizierten Erhaltungsmassnahmen vor. Diese Auflistung ist umfangreich und umfasst praktisch die gesamte Palette der möglichen Lösungen, wie sie auch in den Normen SN 640 730 ff beschrieben sind. So sind auf dem Nationalstrassennetz folgende Arten von Erhaltungsmassnahmen durchgeführt worden, die sowohl zu den Instandsetzungen als auch zu den Erneuerungen gezählt werden können:

- Oberflächenbehandlungen
- einschichtige Überzüge (inklusive Dünnschicht- und Kaltmikrobeläge)
- mehrschichtige Überzüge
- Erneuerung Deckschicht
- Teilerneuerung Belag
- Gesamterneuerung Belag
- Teilerneuerung Oberbau
- Gesamterneuerung Oberbau.

Die Ergebnisse der Auswertungen zur Gebrauchsdauer der Beläge (der Deckschichten) auf den betrachteten Nationalstrassenabschnitten sind in der folgenden Tabelle 13 zusammengefasst.

**Tabelle 13:** Mittelwerte des Alters der Deckschichten im Zeitpunkt der ersten und der zweiten Massnahme auf den untersuchten Nationalstrassen

Strecke	Verkehrslastklasse	Alter bei erster Massnahme (Jahre)		Alter bei zweiter Massnahme (J.)
		rechter FS	linker FS	
N2 TI	T5/T6	14.8	22.9	11.0 (7.9)
N1/N5 VD	T4/T5	19.5	20.4	
N9/N12 VD	T5/T6	14.8	14.9	
N13 GR/TI	T4/T5	16.1	16.8	

Bezüglich des Vergleiches und der Interpretation der Ergebnisse in der Tabelle ist festzuhalten, dass die Voraussetzung eines vergleichbaren "Endzustandes" nicht für alle betrachtete Abschnitte und Kantone zwingend erfüllt ist. Dennoch wird hier angenommen, dass trotz kantonaler Unterschiede bei der Beurteilung der Dringlichkeit einer Massnahme, ein gewisser Ausgleich durch die Aufsichtstätigkeit des ASTRA und die entsprechende Freigabe der Kredite erfolgte.

Unter den oben erwähnten Voraussetzungen führen die Betrachtung und die Analyse der vorstehenden Ergebnisse zu den folgenden drei wesentlichen Feststellungen:

1. Die Praxis einer fahrstreifenbezogenen Erhaltungstätigkeit (wie im Kanton Tessin) führt zu einer längeren mittleren Lebensdauer für die Gesamtheit aller Beläge; auf dem linken Fahrstreifen wird eine um gut 50% längere Lebensdauer erreicht. In denjenigen Fällen, wo gleichzeitig auf beiden Fahrstreifen Massnahmen erfolgen, wird der rechte Fahrstreifen eher zum "richtigen" Zeitpunkt saniert, der linke Fahrstreifen eher zu früh. Auch wenn an sich aus der alleinigen Optik des Belagspezialisten ein Deckschichteinbau ohne Nähte die optimale Lösung darstellt, könnten andere Kriterien, wie die Kostenfrage (Strassenbetreiberkosten und Nutzerkosten) diesen Aspekt durchaus anders gewichten. Zudem muss die Sanierung einzelner Fahrstreifen nicht unbedingt zu unzulässigen Mängeln in der Längsnaht führen.

2. Die Lebensdauer der Beläge (Deckschichten) auf dem rechten Fahrstreifen ist für die drei untersuchten Kantone in etwa gleich und beträgt 15 bis 16 Jahre. Die etwas höheren Werte der N1 im Abschnitt Lausanne-Genf sind unter anderem auch auf den gegenüber den übrigen Strecken frühen Eröffnungszeitpunkt (1963) und auf die anfänglich geringere Verkehrsbelastung zurückzuführen.

3. Die Anpassung der Normen an erhöhte Beanspruchungen und ihre Umsetzung in der Praxis, zum Teil im Rahmen eines gezielten Innovationsschubes (sogar vor der entsprechenden Normierung), zahlte sich deutlich aus. So wurde bei den im Rahmen einer ersten Erhaltungsmassnahme eingebauten "traditionellen" Deckschichten auf der N2 eine deutlich geringere Lebensdauer gegenüber den ursprünglichen Materialien festgestellt, währenddem beim frühzeitigen Umstieg auf die Verwendung modifizierter Bindemittel deutlich bessere Ergebnisse erzielt wurden (Beispiele: N1 Genf-Lausanne).

*Diese Ergebnisse sind nicht überraschend und soweit plausibel, als:*

- Wegen der Fahrstreifenverteilung des Schwerverkehrs die Belastung auf dem linken Fahrstreifen deutlich geringer ist als auf dem rechten Fahrstreifen; dafür können mit der Zeit die belastungsunabhängigen Komponenten (Bindemittelversprödung, Haftungsmängel, Verwitterung) auf dem linken Fahrstreifen stärker zum tragen kommen.*
- Der Unterschied im Ergebnis der vier untersuchten Nationalstrassen vielmehr im Vergleich rechter/linker Fahrstreifen als im Vergleich der Lebensdauer auf dem rechten Fahrstreifen allein liegt, wo die Reihenfolge der Werte auch der umgekehrten Reihung der entsprechenden Verkehrsbelastungen entspricht (tiefere Mittelwerte der Lebensdauer bei höherer Verkehrslastklasse), was die oben aufgeführte Erklärung zu den Werten für die N1 VD bestätigt.*

- Die reduzierte Gebrauchsdauer der im Rahmen einer ersten Erhaltungsmassnahme eingebauten Beläge ist weniger auf schlechtere Materialien zurückzuführen (doch können auch hier Fehler auftreten) als vielmehr auf die gestiegene Verkehrsbeanspruchung, wie in Kapitel 4 deutlich hervorgehoben wurde. Diese Zunahme der Beanspruchung führt dazu, dass die früher verwendeten (und damals als gut befundenen) Materialien diesen erhöhten Anforderungen nicht mehr genügen.

Schliesslich sei noch darauf hingewiesen, dass die auf der N13 ermittelten Werte der Lebensdauer der ursprünglichen Beläge, die zu einem grossen Teil Betonbeläge betreffen, nicht als repräsentativ für die Gesamtheit der Betonbeläge auf den Nationalstrassen (Kantone VD, BE, AG, SG) gelten können, da sie einen ausgesprochenen Spezialfall darstellen.

### **Zusammenhänge zwischen Belagsalter und Netzzustand**

#### **Vorbemerkungen**

Im vorliegenden Kapitel wird eine Auswertung der Daten aus der vom ASTRA in den Jahren 2000 und 2001 in Auftrag gegebenen netzweiten Zustandserfassung auf den Nationalstrassen vorgenommen. Diese Auswertung dient der Beurteilung des Zustandes der Nationalstrassen aus der spezifischen Optik dieser Forschungsarbeit und die Daten wurden vom ASTRA zu diesem Zweck zur Verfügung gestellt.

Die Durchführung der Auswertung erfolgte im Anschluss an die ordentliche Auswertung der netzweiten Zustandserfassung, welche im Auftrage des ASTRA vom IVT der ETH Zürich durchgeführt wurde [21]. Die entsprechenden Ergebnisse wurden im Schlussbericht "Zustandserfassung und –Bewertung der Nationalstrassen (Fahrbahnen) ZEB\_NS (1999-2002)" vom Oktober 2003 veröffentlicht.

Aus diesem Bericht werden die Graphiken der Verteilung der Zustandswerte I2, I3 und I4 für die Nationalstrassen mit einem 2+2 Querschnitt übernommen. In den Auswertungen des vorliegenden Berichtes wurde die Einteilung leicht anders gewählt, indem unabhängig vom Querschnittstyp die einzelnen Fahrstreifen ausgewertet wurden. Da der 2+2 Querschnitt ohnehin den grössten Teil der Netzlänge ausmacht (ca. 80%) sind die Unterschiede in den Ergebnissen daher sehr gering. Die Interpretation der Zustandsdaten (Kapitel 6.2) erfolgt ausschliesslich aus der Sicht der Aufgabenstellung der vorliegenden Forschungsarbeit.

## Grundlagen

Die in Abschnitt 5.5 erwähnte Problematik der Vergleichbarkeit der Ergebnisse wegen eines unterschiedlichen Schadenzustandes im Zeitpunkt einer neuen Massnahme führt dazu, dass der festgestellten mittleren Gebrauchsdauer der Beläge (Deckschichten) keine entsprechenden Angaben über den Zustand zugeordnet werden können. Aus den Auswertungen ergeben sich somit faktische Gebrauchsdauern, welche mit einer qualitativen Gebrauchsdauer, welche mit dem Erreichen von im voraus festgelegten Grenzwerten definiert werden kann, (noch) keine erkennbare Korrelation aufweisen.

Um diesem Mangel entgegenzuwirken wurde nach alternativen Möglichkeiten gesucht, die zu einer Aussage über den mittleren Zustand im Zeitpunkt von Erhaltungsmassnahmen führen. Hier hat sich die Auswertung der kürzlich erfolgten netzweiten Aufnahmen des Nationalstrassennetzes als eine der Möglichkeiten anboten. Seitens des ASTRA wurden zu diesem Zweck der Forschungsstelle folgenden Daten zur Verfügung gestellt:

- Messkampagne 2000 über die Erfassung der Ebenheit in Längs- und Querrichtung, Indizes I2 und I3,
- Messkampagne 2001 über die Erfassung der Griffigkeit (SCRIM bei 80 km/h)

Die zuvor im Jahre 1999 durchgeführte Aufnahme des Oberflächenzustandes (visuelle Aufnahme, Index I1) wurde aus verschiedenen Gründen als Grundlage für die beabsichtigte Untersuchung ausgeschlossen. Ergänzend zur generellen Problematik subjektiver Aufnahmen mit einer ausserordentlich grosser Streuung der Ergebnisse sind die Daten der Netzaufnahmen 1999 auch noch durch erhebliche Unterschiede in den Erfassungseinheiten (vielfach die üblichen 100-m Abschnitte, teilweise aber auch sog. "homogene" Abschnitte), in der Durchführung und beim Strichprobenumfang der Evaluation von Spurrinnen und schliesslich in der teilweisen Verwendung unterschiedlicher Normfassungen (SN 640 925 und SN 640 925a) charakterisiert. Mit dem begründeten Verzicht auf die Ergebnisse der visuellen Zustandserfassung gehen allerdings wichtige Grundlagen für eine umfassende Beurteilung des Zustandes vor einer Massnahme verloren, sind es doch auch die Belagschäden (eine Hauptgruppe der visuellen Zustandserfassung) welche zu den häufigen Auslösern einer Massnahme zählen.

## Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

### **Zusammenfassung der Ergebnisse**

Aus der vorliegenden Forschungsarbeit leiten sich gesamthaft die folgenden wesentlichen Feststellungen ab:

#### **Aus Bericht - Kapitel 4:**

- Die Verkehrsbelastung hat in über einen Zeitraum von 35 Jahren bei den DTV-Werten um einen Faktor 4 und bei den TF-Werten eher noch stärker zugenommen. Dies hat Auswirkungen auf die Dimensionierung des Oberbaus und auf die Beanspruchung der Beläge.
- Bezüglich Dimensionierung bedeutet dieser Anstieg der Verkehrslast, dass etwa alle 15 bis 20 Jahre gleichzeitig mit der Durchführung von Erhaltungsmassnahmen eine Anpassung der Gesamtschichtdicke um zusätzliche 30 mm Belag erforderlich wird, dies zumindest auf den rechten Fahrstreifen.
- Aus der Sicht der Beanspruchung müssen Deckschichten mit der gleichen Gebrauchsdauer wie in den vergangenen 15 bis 20 Jahren unter der Vorgabe von mindestens der doppelten Anzahl Belastungswiederholungen gegenüber den bisherigen Belagschichten als Zielgrösse entwickelt und geprüft werden.

#### **Aus Bericht - Kapitel 5:**

- Die Lebensdauer der ersten Beläge auf dem rechten Fahrstreifen hat im allgemeinen 15 bis 16 Jahre betragen, das heisst, die ersten Beläge der Nationalstrassen wurden nach einer durchschnittlichen Gebrauchsdauer von 15 bis 16 Jahren ersetzt oder erneuert.
- Die Praxis einer fahrstreifenbezogenen Erhaltungstätigkeit führt zu einer längeren mittleren Lebensdauer für die Gesamtheit aller Beläge; die Zeitperiode bis zur Instandsetzung der ersten Beläge auf dem linken Fahrstreifen liegt um gut 50% höher als bei den Belägen auf dem rechten Fahrstreifen. In den Fällen, in denen gleichzeitig auf beiden Fahrstreifen Massnahmen erfolgen, wird der rechte Fahrstreifen zum "richtigen" Zeitpunkt saniert, der linke Fahrstreifen somit zu früh.
- Die Gebrauchsdauer der im Rahmen einer ersten Erhaltungsmassnahme eingebauten Beläge ist deutlich geringer als die Gebrauchsdauer der ursprünglichen Beläge - was auf die gestiegene Verkehrsbeanspruchung zurückzuführen ist – wenn bei der Erhaltungsmassnahme traditionelle Beläge ohne modifizierte Bindemittel verwendet werden. Die Angaben aus dem Kanton Waadt (vor allem N1 Genf-Lausanne) zeigen, dass bei einer gezielten Materialwahl – Beläge modernerer Konzeption mit modifizierten Bindemitteln – im Zeitpunkt der Sanierung deutlich bessere Ergebnisse erzielt werden können.

## **Aus Bericht - Kapitel 6:**

Das Nationalstrassennetz befindet sich gemäss den Ergebnissen der netzweiten Zustandserfassung der Längsebenheit, Querebenheit (2000) und der Griffigkeit (2001) in einem insgesamt guten Zustand. Auch allfällige gerätebedingte Wertverschiebungen beeinflussen das Gesamtergebnis nicht. Diese Aussage muss jedoch dahin relativiert werden, als die mittels visueller Zustandserfassung erhobenen Belagschäden – ein häufiger Auslöser von Massnahmen – im Rahmen dieser Untersuchungen nicht evaluiert werden konnten.

## **Schlussfolgerungen und offene Fragen**

*Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wurde der Versuch unternommen, rückblickend Aussagen über das Verhalten der Beläge auf den Nationalstrassen zu machen, um diese als Grundlage für eine bessere Materialwahl, beziehungsweise für die Entwicklung besserer Beläge zu verwenden. Die eingehende Auseinandersetzung mit der Thematik hat gezeigt, dass sich die Erfahrungen früherer Jahre nur sehr bedingt auf die Zukunft übertragen lassen. Dies hat folgende Gründe:*

- *Die früher unter Verkehr liegenden Flächen waren einer deutlich geringeren Verkehrsbelastung ausgesetzt, als sie heute auf den Nationalstrassen vorliegt. festgestellt werden kann. In der Zeitperiode 1970 bis 2000 musste durchschnittlich mit einem vierfachen Verkehrszuwachs sowohl bei den Gesamtfrequenzen als auch bei der äquivalenten Verkehrslast gerechnet werden.*

*Zudem ist bei den Erhaltungsmassnahmen zu beachten, dass die Verkehrsbeanspruchung auf neu eingebauten Flächen wesentlich früher einsetzt als beim Neubau und deshalb besondere Vorsichtsmassnahmen und entsprechende Regelungen erfordert.*

- *Seit Beginn des Nationalstrassenbaus wurden die geltenden Normen für die Dimensionierung, die Baustoffe und die Zusammensetzung der Beläge laufend geändert, mit dem Ziel der Erreichung einer erhöhten Qualität und Dauerhaftigkeit der Beläge. Die in den Ergebnissen dieser Studie festgestellte reduzierte Gebrauchsdauer der traditionellen Beläge der ersten Erhaltungsmassnahme und die besseren Ergebnisse mit widerstandsfähigeren Belägen neuerer Konzeption zeigt tendenziell, dass die bisherige Entwicklungs- und Normierungstätigkeit mit den Bedürfnissen Schritt zu halten vermochte. Wichtig ist dabei, dass neue Lösungen frühzeitig eingeführt werden, mit dem Risiko, auch einmal die falsche Wahl zu treffen. Auch hier gilt: Fortschritt wird nur durch Innovation erreicht.*

*Dennoch konnte im Rahmen dieser Untersuchungen die bisherige Gebrauchsdauer als Zielgrösse für neue Beläge, die auch den gesteigerten Anforderungen zu genügen vermögen – mit einer Zeitperiode von 15 bis 16 Jahren für die Beläge auf dem rechten Fahrstreifen – definiert werden. Auf den durch den Schwerverkehr weniger belasteten Überholspuren sollte eine um 50% längere Nutzungsdauer erreicht werden können.*

Die Feststellungen und Schlussfolgerungen dieses Berichtes lassen aber auch noch einige Fragen offen:

- Bei welchem Zustand wird eine Massnahme angeordnet?

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse der Analyse der netzweiten Zustandserfassungen – insbesondere aus der Sicht der Anteile "kritischer" Werte – mit den tatsächlichen Gebrauchsdauern bestätigt die Feststellung, dass die Durchführung von Massnahmen zeitlich so angesetzt wird, dass kritische Zustände und schwere Schäden auf dem Nationalstrassennetz weitgehend vermieden werden. Die vorhandenen Ergebnisse deuten aber auch darauf hin, dass offenbar die Belagschäden in der Praxis als Auslöser von Massnahmen neben den Verformungen (Spurrinnenbildung) eine grössere Bedeutung haben. Griffigkeit und Längsebenheit sind oft noch in Ordnung, wenn sich die beiden anderen genannten Parameter (Belagschäden, Spurrinnen) einem noch präziser zu definierenden "Interventionsgrenzwert" nähern.

Zusätzlich ist zu beachten, dass neben den Aspekten des Zustandes auch andere Faktoren, wie z.B. die Baustellenkoordination zu berücksichtigen sind, ohne sich ausschliesslich auf technische und ökonomische Fragen zu beschränken.

- Wird nach Lösungen in der richtigen Richtung gesucht?

Der im Quervergleich der Kantone TI und VD festgestellte Unterschied bezüglich des Zeitpunktes der Einführung neuer Beläge zeigt, dass der aus einem interkantonalen Erfahrungsaustausch potentiell sich ergebende Nutzen noch erhöht werden kann, was bezüglich des Betriebes und des Unterhaltes des Nationalstrassennetzes unter den Bedingungen des neuen Finanzausgleichs zusätzlich gesteigert werden kann.

Der erwähnte Zeitunterschied lässt sich aber auch durch den generell stärkeren Einfluss der französischen Bautechnik in den Westschweizer Kantonen erklären. Frankreich ist bekanntlich in der Strassenbautechnik bezüglich der Innovation führend.

Im Rahmen der Bearbeitung dieser Forschungsarbeit wurden (entsprechend deren Anteil auf dem Nationalstrassennetz) mehrheitlich bituminöse Beläge betrachtet. Die Suche nach dauerhafteren Belägen in den Forschungsprojekten FP2, FP3 und FP4 befasst sich ebenfalls ausschliesslich mit bituminösen Belägen.

Betonbeläge wurden im vorliegenden Bericht im Rahmen der Ausführungen zur Entwicklung des Normenumfeldes und der Netzentwicklung behandelt. Bei der Auswertung der untersuchten Strecken waren Betonbeläge allerdings deutlich in der Unterzahl und zum Teil auch bloss als "Beläge der 1. Generation" enthalten. Es sei dennoch darauf hingewiesen, dass Teile des ursprünglichen Betonbelages der N1 Genf-Lausanne – nunmehr über 40-jährig – unter einer bituminösen Deckschicht immer noch unter Verkehr stehen. Verschiedene andere Nationalstrassenabschnitte mit Betonbelag haben Gebrauchsdauern von 30 und mehr Jahren erreicht, was deutlich über den hier festgestellten Gebrauchsdauern von 15 Jahren liegt.

Es ist unbestritten, dass der Endzustand der erwähnten Betonbeläge deutlich schlechter war als derjenige vieler bituminöser Abschnitte vor der Durchführung einer Massnahme, und dass eine immer noch "weisse" Belagsoberfläche auch einiges an baulichem Unterhalt erfordert hat, auch wenn man noch nicht von flächendeckenden Erhaltungsmassnahme spricht. Dennoch sollte die Verwendung dieser Bauweise bei den am stärksten belasteten Strecken, wieder als Alternative geprüft werden.



## **2. FP 2, UMSETZUNG Projekt „Dauerhafte Komponenten“**

Abt. Strassenbau / Abdichtungen der EMPA.

### **Beschreibung des Forschungsvorhabens**

#### **Ausgangslage**

*Die Dauerhaftigkeit und Performance von Asphaltbelägen hängen entscheidend von der Dauerhaftigkeit von Zuschlagstoffen, Bindemittel und Zusätzen sowie dem Zusammenwirken (inkl. Verträglichkeit) der einzelnen Komponenten im Verbund ab. Die steigende Tendenz und Notwendigkeit zum Einsatz von Recyclingmaterial und anderer Wertstoffe bewirkt, dass die Dauerhaftigkeit nicht nur hinsichtlich "jungfräulicher" Komponenten sondern auch bezüglich gealterter bzw. (z.T. mehrfach) wiederverwendeter Komponenten bewertet werden muss.*

*Leider wird die Dauerhaftigkeit der einzelnen Komponenten sowie ihres Zusammenwirkens im Verbund in der Schweizer Belagmethodologie und damit in den einschlägigen Normen bisher nur ungenügenden berücksichtigt. Das Schwergewicht bei der Materialauswahl und Belagskonzipierung stützt sich entsprechend immer noch hauptsächlich darauf ab, die Hochwertigkeit der Materialien lediglich im Anfangszustand (d.h. im Zeitpunkt der Inbetriebnahme) sicherzustellen, ohne den systematischen Nachweis ihrer Dauerhaftigkeit zu erbringen. Beispielsweise wird die Eignung von Bindemitteln aber auch die mechanische Festigkeit von Mineralstoffen fast ausschliesslich aufgrund des Zustandes bei Anlieferung und nicht nach gezielter performanceorientierter Vorbewitterung beurteilt. Das Risiko zu Fehlschlägen und das Potential zur Optimierung der Dauerhaftigkeit ist entsprechend hoch und wird durch die immer grössere Vielfalt an Komponenten und die dem Nachhaltigkeitsprinzip entsprechende Zunahme wiederverwendeter Bestandteile noch verstärkt.*

*Die Erarbeitung massgebender Dauerhaftigkeits-Kriterien für hochwertige Mischgutkomponenten einzeln und im Verbund wird somit zur entscheidenden Forderung.*

#### **Konzeptionelle Basis**

*Übergeordnete konzeptionelle Basis für die Untersuchung in FP2 bildete das in der Abb. 01 dargestellte Schema der Risikobeanspruchungen [Partl, 1995 Str & Verk]. Demzufolge ist die Gefahr von Spurrinnen infolge Kriechen besonders akut im jungen noch nicht gealterten Zustand bei sommerlich warmen Temperaturen während Ermüdungsrisse infolge wiederholter Biegebeanspruchung als Risikofaktoren insbesondere bei gemässigten Temperaturen und versprödetem, gealtertem Material anzusehen sind. Extrem rasche Abkühlung von versprödetem, gealtertem Material an der Belagsoberfläche weit unter den Gefrierpunkt ist als besonders kritisch für Abkühlrisse infolge Zugspannungen aufzufassen. Letzteres spielt in der Schweiz aufgrund bisheriger Erfahrungen bei Autobahnen eine eher untergeordnete Rolle, weshalb die Problematik des Kälteverhaltens für das Projekt FP2 als nicht relevant betrachtet wurde. Mehr im Detail zeigt Tabelle 01 die Einflüsse und Belastungen auf das Prüfgut.*



Abbildung 0.1 Zeit-Temperatur Matrix mit Risikobereichen in Abhängigkeit von Mischungstyp, Belagsaufbau und Verkehrslast (Schäden, Beanspruchungen).

Tabelle 0.3 Mögliche Einflüsse und Belastungen auf Prüfgut (ohne Gewichtung)

Prüfgut	Mechanische Beanspruchung				Klimabelastungen			Identifik. & Charakterisierung
	Heiss	Sommer	gemässigt		Sommer-Winter Zykl.		kalt; Winter	
	Beanspr. beim Einbau (Hitze, Verdichtung,...)	bleibende Deform.	mechan. Ermüdung	Oberflächen-defekte (Abrieb,...)	hygrale Beanspr. (Wasserempf.)	thermische Ermüdung	Frost-Abkühlung	
Bindemittel	X	X	X	X		X		X
Mineralstoffe	X			X	X			X
Filler	X				X			X
Mischgutsorten		X	X	X	X	X	X	X
Belag/Strassenabschn. (reproduziert)	X	X				X	X	X
Verbund Komponenten (Bdm/Mineral)	X			X	X	X	X	X
In-Layer (Mischgut)	X	X	X		X	X	X	X
Inter-Layer	X				X			X

### Zielsetzung

Im Rahmen des Projektes Unterhalt 2000 als Beitrag zur Umsetzung der Massnahme 17 gemäss Schlussbericht "Substanzerhaltung" und in Verbindung mit der COST-Aktion 343 "Reduction in Road Closures by Improved Pavement Maintenance Procedures" sind performanceorientierte, international ausgerichtete und moderne Dauerhaftigkeits-Kriterien zur Evaluation und Bewertung dauerhafter, hochwertiger Mischgut-Komponenten einzeln und auch im Verbund für bituminöse Beläge zu erarbeiten, um Fahrbahnsperungen zu Unterhaltszwecken zu reduzieren und den hohen technischen Stand in unserem Lande mit Blick auf die europäischen bzw. globalen Entwicklungen sicherzustellen und zu erweitern. Diese Kriterien sind auf verschiedene für die Schweiz relevante Material-Komponenten anzuwenden. Dabei ist eine entsprechende Klassierung der untersuchten Komponenten vorzunehmen. Zu untersuchen und zu bewerten ist die Dauerhaftigkeit

- der Einzelkomponenten
- des Verbundes zwischen Bindemittel und Zuschlagstoffen

Das engere Ziel der Forschungsarbeit bestand somit im Festlegen und Erarbeiten von massgebenden, performance-orientierten, international ausgerichteten Dauerhaftigkeits-Kriterien für hochwertige Mischgutkomponenten; einzeln und im Verbund betrachtet.

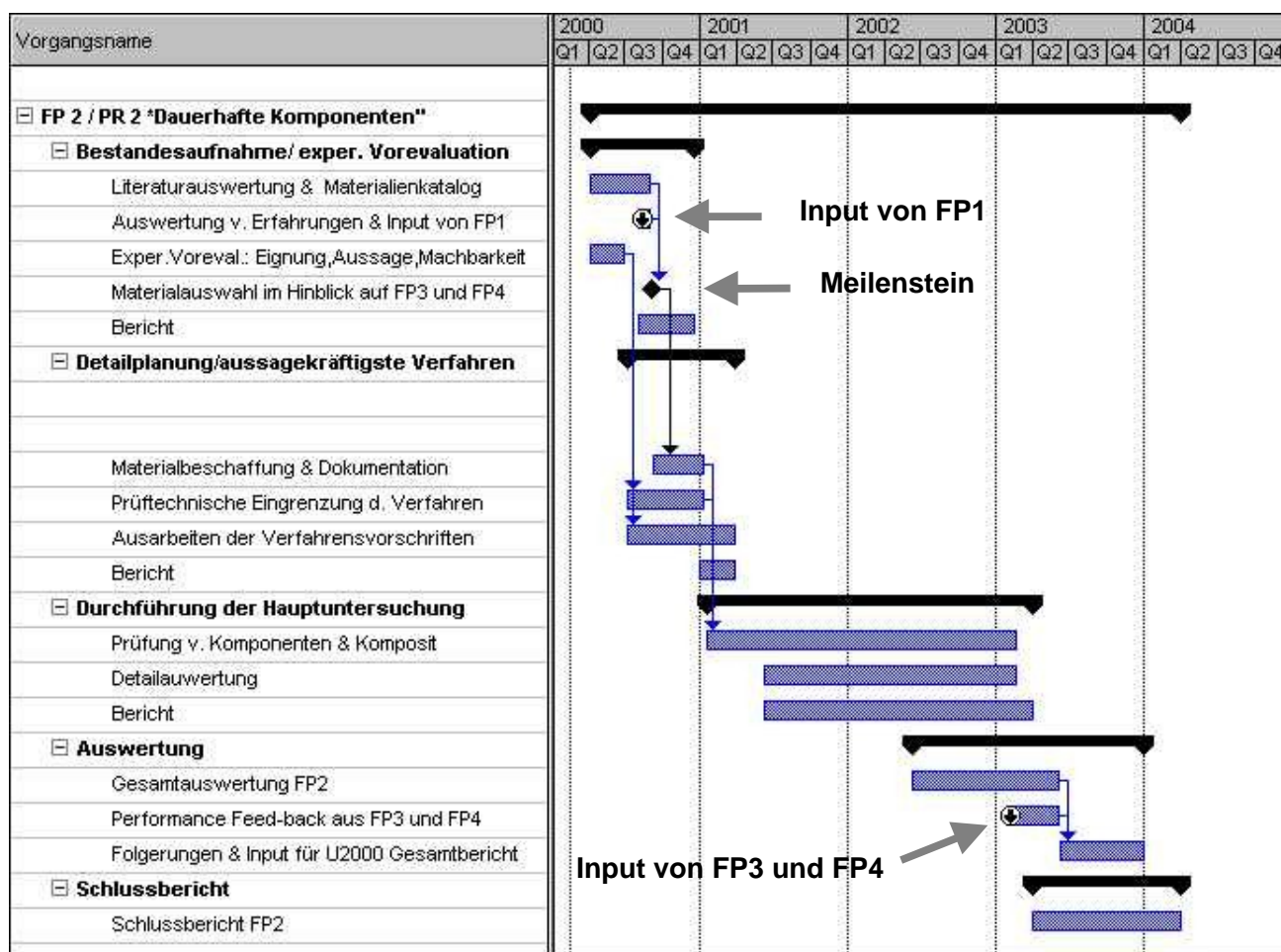
## Methodik der Untersuchungen

Vergleich der Ergebnisse bezüglich:

- Schichten aus Belagsausschnitten
- rekonstruiertem Mischgut
- Varianten Mischgut

Generell wurde auf bekannte Prüfmethode und Untersuchungsverfahren zurückgegriffen. Eine Ausnahme bildete die Rekonstruktion von Belagsschichten erfolgreicher Strassenabschnitte mit neuen Komponenten. Dafür existierten keine anerkannten und eingeführten Verfahren, und es musste daher eine spezielle Untersuchungsmethodik erarbeitet werden.

Schema zur Lokalisierung des FP2 im Gesamtprojekt:



Die Abbildung 0.2 Ablaufschema und Lösungsansatz FP2 zeigt, dass das FP2 stark mit den anderen Forschungspaketen vernetzt ist.

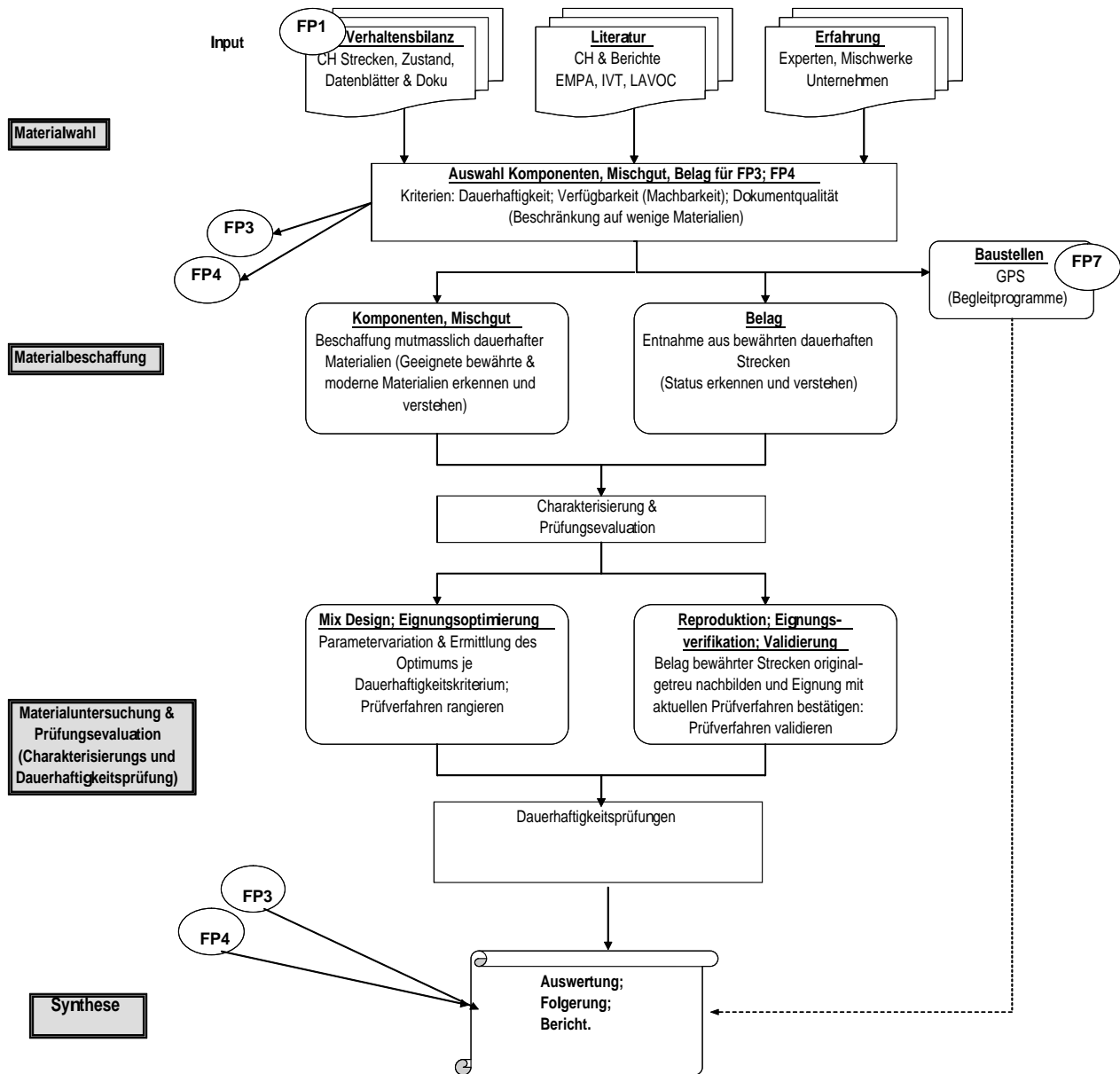


Abbildung 0.2 Ablaufschema und Lösungsansatz FP2

## Auswahl der untersuchten Strassenabschnitte und Komponenten

Die Evaluation erfolgreicher Beläge erfolgte aufgrund folgender in Abstimmung mit der Begleitkommission des ASTRA festgelegter Kriterien:

- Alter  $\geq 10$  Jahre
- Normalspur
- Verkehrslastklasse T5 oder höher
- kein Teer
- Spurrinnen minimal
- wenig Risse
- offene Strecke (kein Tunnel, keine Überdachung)
- Dokumentation vorhanden

Es zeigte sich, dass solche „ideale“ Stassenabschnitte sehr selten waren, Abstriche konnten deshalb nicht vermieden werden. Die untersuchten und ausgewählten Strecken sind in Tabelle 0.1 Bezeichnung der in der Umfrage bei den Kantonen als dauerhaft bezeichneten Strassenabschnitte, und in

Tabelle 0.2 Untersuchte Strassenabschnitte zusammengestellt. Schwergewichtig stützt sich die Untersuchung auf die Strassenabschnitte Uri, Schwyz und Wallis ab.

### **Bewertung der Komponenten, Wahl der Entnahme**

Die ausgesuchten alten Strassenabschnitte sind, je nach Änderungen der entsprechenden Normen, sowohl was die Baustoffe angeht als auch was die Anforderungen an Mischgut und eingebaute Beläge betrifft, nicht nach heute geltenden Normen erstellt worden. Da das Alter unterschiedlich ist, galt beim Einbau jeder Strecke ein spezifischer Satz von Normen der sich auch nicht mit dem eines anderen der ausgewählten Abschnitte decken muss.

Somit musste einerseits im Sinne der Einheitlichkeit, andererseits in Hinblick des Nutzens der Forschungsarbeit für den heutigen Zeitpunkt, die Untersuchung nach den bei Beginn des Projektes im Jahre 2000 gültigen „aktuellen“ Normen durchgeführt werden. Dies bedeutet aber, dass die mittlerweile eingeführten EN Normen nur nachträglich in einzelnen Vergleichen berücksichtigt werden konnten. Somit kann es sich also durchaus ergeben, dass Komponenten, die beim Einbau der damals gültigen Norm entsprachen, den Anforderungen der im Jahre 2000 aktuellen Normen nicht mehr genügten. Dies ist insbesondere bei den Siebdurchgängen der Fall, da hier nicht nur Normanforderungen geändert haben, sondern auch die Umstellung von Rund- auf Quadratlochsiebe erfolgt ist.

Aus den Ergebnissen dieses Berichts darf deshalb nicht auf die vorhandene oder fehlende Normkonformität zum Zeitpunkt des Einbaus geschlossen werden.

Entnahmestellen wurden soweit möglich repräsentativ festgelegt. Insbesondere wurden Entnahmen nicht nahe bei Einbaugrenzen, offensichtlichen Schadenstellen sowie Stellen mit speziellen, mikroklimatischen Bedingungen (extremer Schattenwurf) durchgeführt. Von diesen Grundsätzen wurde im Tessin abgewichen, wo der Kanton die Entnahme in eigener Regie während des Abbruchs der Strasse durchführte.

*Für die Bewertung der Abschnitte ist dabei auch in Betracht zu ziehen, ob zwischen Normal- und Überholspur Unterschiede bestehen. So wurde von den Verantwortlichen der Kantone Uri und Tessin versichert, dass zwischen der Normal- und Überholspur kein baulicher Unterschied besteht. Angesichts der bautechnischen Zwänge willigte die Empa deshalb in eine Entnahme aus der Überholspur ein.*

*Die Ermittlung geeigneter erfolgreicher Strassenabschnitte erfolgte mittels Studium vorhandener Unterlagen und Dokumente der Forschungspartner sowie mittels Umfrage bei den Kantonen. Die Umfrage wurde im Rahmen des FP2 durchgeführt, vom FP1 kam der Hinweis zum Strassenabschnitt SZ. Zu Unterlagen und Dokumenten gehören :*

*FA 25/78 Untersuchung stark beanspruchter Autobahnbeläge*

*FA 26/84 Einfluss des Mischprozesses*

*FA 8/86 Untersuchung zur Zertrümmerungsprüfung*

*FA 10/86 Polierwiderstand von Mineralstoffen*

*FA 8/90 Polierverhalten von Mineralstoffen*

*FA 10/94 Influence des formes des granulats*

*FA 8/98 Einfluss von Füllern auf die Alterung von Bindemitteln*

*Die Umfrage, welche vor der Festlegung der Auswahlkriterien durch die Begleitkommission des ASTRA erfolgte, führte zu 11 Abschnitten, wobei jedoch 5 vermutlich teilweise mit Teerbitumen ausgeführt worden waren. Im Falle der möglichen Abschnitte des Kantons Zürich war aufgrund der Angaben zwar nicht mit TB jedoch teilweise mit Teer in Tränkungen unter dem Belag zu rechnen. Aufgrund des hohen Anteils dauerhafter bewährter Strassenabschnitten mit TB suggeriert das Resultat dieser Umfrage, dass ein vollwertiger technischer Ersatz von TB offenbar nur bedingt gelungen ist.*

*Auch wenn TB aus gesundheitlichen Gründen keinesfalls mehr verwendet werden darf, ist es doch bemerkenswert festzustellen, dass eine erhebliche Zahl gerade solcher Abschnitte mit TB als dauerhaft eingestuft werden können und dass diese Beläge somit auch als Vorgabe für die zu erreichenden dauerhaften mechanischen Belageigenschaften dienen können. Es wäre daher durchaus erstrebenswert, auch Belagsschichten mit TB als Vorgabe für die Rekonstruktion benutzen zu können, wobei selbstverständlich mit einem anderen Bindemittel dieselben Eigenschaften erreicht werden müssten. Weil aber die Begleitkommission teerhaltige Beläge klar ausgeschlossen hat, wurde nach diesem Entscheid die Bearbeitung dieser Abschnitte eingestellt. Die deshalb fehlenden Informationen in den folgenden Tabellen sind mit "n.e." für nicht ermittelt eingetragen.*

*Zudem wurde eine Reihe von alten Strassenabschnitten im Kanton Zürich, besprochen im telefonischen Gespräch mit dem Verantwortlichen, nicht im Detail erfasst, weil sie verschiedene schwerwiegende Nachteile aufwiesen (starke Spurrinnen, in einem Fall starke Rissbildung, geringes Verkehrsaufkommen beim Ast Urdorf wegen verzögertem Weiterbau, nicht mehr Originalzustand). In den Tabellen 2.2 und 2.3 ist der Abschnitt Wallis A9, Planche 11, nicht aufgeführt, da der Strassenabschnitt nachträglich vom LAVOC vorgeschlagen wurde.*

**Tabelle 0.1** *Bezeichnung der in der Umfrage bei den Kantonen als dauerhaft bezeichneten Strassenabschnitte*

Kurzbezeichnung	Abschnitt Nr:	Bezeichnung des Strassenabschnittes
Uri	1	Plattisbach, Uri, A2
Arisdorf	2	Arisdorf Richtung Basel, A2
Augst	3	Augst Sissach, Richtung Zürich A2
Sursee	4	Sursee Emmen, A2
Luterbach	5	Luterbach Kriegsstetten, Überholspur, A1
Härkingen	6	Härkingen A1
Tessin	7	Tessin, Chiasso A2
Oberwinterthur	8	Oberwinterthur Mazingen, nur untere Schichten alt, A1
Nordring Zürich	9	Nordring Zürich
Schwyz	10	Wollerau, A3, eigene Anfrage auf Vorschlag FP1
Wallis	11	Wallis, A9, Planche 11, Vorschlag LAVOC

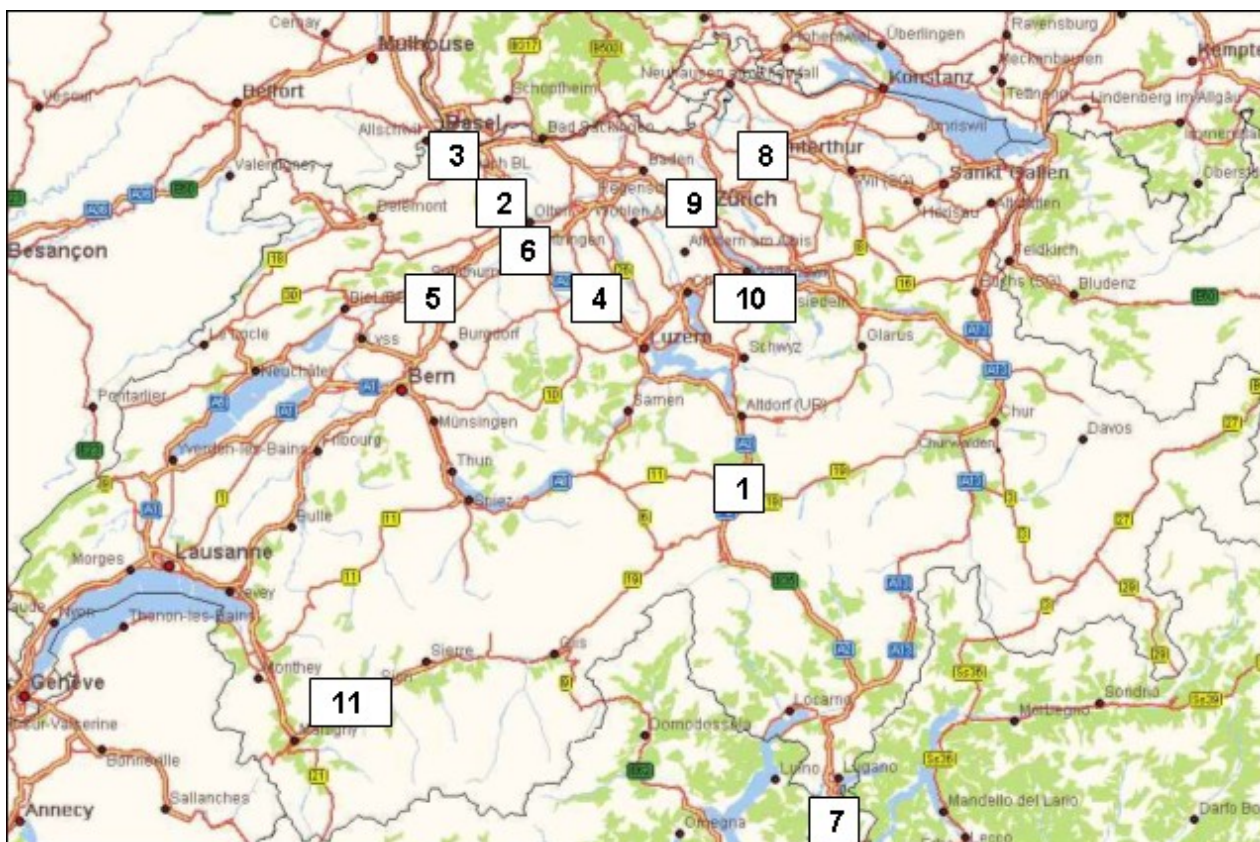


Abbildung 0.1 In Umfrage gemeldete dauerhafte Strassenabschnitte

**Tabelle 0.2 Untersuchte Strassenabschnitte**

<b>Abschnitt Nr.</b>	<b>Uri 1</b>	<b>Schwyz 10</b>	<b>Zürich Nordring 9</b>	<b>Tessin 7</b>	<b>Wallis 11</b>	<b>Arisdorf 2</b>
Kilometrierung	157	128.3	297.4	0.295	92,9 bzw. 93.4 nach Plan	19.0
Einbau	1972 ... 1975	1976	1985	1965 ... 1969	1988	1970..1975
Verkehr DTV 2000	22300	46000	85000	44000	29000	47000
TF (10%LW)	1200	2500	4600	2400	1600	2500
Verkehrslastklasse	T5	T5	T6	T5	T5	T5
Belagsart Tragschicht	u-HMT und o- HMT	HMT B 32	HMT 32 auf Stabi	HMT 25	AB 25 u + HMT B	n.e.
Belagsart Deckschicht	Ausgleichsschicht und Deckschicht AB16	AB 16, Trinidad	AB 16	AB 25u, AB 10	AB 16	n.e.
Zustand	geringe Spurrinnen 10..15mm; mässige Rissbildung (Normalspur)	mässige Rissbildung	Spurrinnen schwach bis mässig; Kornzertrümmerung ca 10% der grossen Körner; Oberfläche relativ offen	<i>nicht ermittelt</i>	keine Spurrinnen, keine Rissbildung	geringe Spurrinnenbildung unter 10mm. mässige Rissbildung, Oberfläche wirkt etwas poliert
Entnahme	Überholspur	Normalspur	Normalspur	Überholspur	Überholspur	Normalspur
Art des Bindemittels	B80/100, Venezuela	Bitumen mit Trinidad	TB	B80 / 100	PmB- C70/100- 48	TB2000 + TB 200/500

## **Beurteilung der Korngrössenverteilung der untersuchten Schichten**

*Alle Schichten wurden nach älteren Normen gebaut, dennoch entsprechen Deckschichten im Mittel sowohl einem AB11 gemäss [SN640431a] und auch einem AC 11 gemäss [SN640431-1aNA]. Einzelne Deckschichten weichen davon ab; sie sind bei den Strassenabschnitten UR und VS tendenziell gröber.*

*Obwohl die Tragschichten B nach wesentlich älteren Normen gebaut wurden, entsprechen sie im Mittel sowohl einem AB 16 gemäss [SN640431a] als auch AC B 16 gemäss [SN640431-1aNA]. Im groben Bereich weichen die einzelnen Deckschichten davon ab. UR und VS sind tendenziell gröber, TI feiner. UR ist insgesamt gröber und entspricht eher einer HMT 22.*

*Obwohl die Tragschichten nach wesentlich älteren Normen gebaut wurden, entsprechen sie im Mittel sowohl den Anforderungen einer HMT 22 gemäss [SN640431a] als auch einer AC T 22 gemäss [SN640431-1aNA]. Abgesehen von einem einzigen, knapp ausserhalb der Grenzen liegenden Wert gilt das auch für jede einzelne Schicht.*

*Der Aufbau der vier erfolgreichen Strassenabschnitten kann also als bestehend aus Deckschicht AC 11, Binderschicht AC B 16 und Tragschicht AC T 22 aufgefasst werden. Die Ergebnisse weisen somit darauf hin, dass mit einem solchen Aufbau erfolgreich Strassen gebaut werden können. In Frage kommt dabei insbesondere der Ersatz der Deckschicht durch eine modernere Bauweise, etwa durch einen MR 11, und der Binderschicht AC B 16 durch AC B22.*

## **Bestimmen mechanischer Kennwerte bitumenhaltiger Schichten**

*Durch die detaillierten Untersuchungen des mechanischen Verhaltens konnten Einsichten in den Zusammenhang zwischen Eigenschaften von Bindemitteln und bitumenhaltigen Schichten nach langer Liegedauer gewonnen werden. Mit einem normalisierten Verhältnis zwischen Modul der Schicht und des aus ihr rückgewonnenen Bindemittels lassen sich folgende Folgerungen ziehen:*

- *Die Deckschichten weisen ein klar tieferes Verhältnis auf als die beiden Tragschichten, die nahezu den gleichen Wert aufweisen. Einerseits kann die gröbere Körnung der Tragschichten sich positiv auswirken, andererseits weisen die alten Deckschichten auch kumulierte Schäden auf.*
- *Davon ausgehend kann für die Ausschnitte des Strassenabschnittes TI eine vergleichsweise grosse Schädigung angenommen werden, was für die anderen drei Abschnitte als Ganzes weniger zutrifft.*
- *Bei den Schichten des Strassenabschnittes UR fällt dagegen der grosse Unterschied zwischen den Modul-Verhältnissen auf. Insbesondere weisen zwei sehr tiefe Werte für  $N_{50}$  lokale Schwachstellen hin. Nach Interpretation der Forschungsstelle hat diese Schicht während des Gebrauchs erheblich gelitten. Die im Übrigen hohen Modulwerte für die Tragschichten lassen darauf schliessen, dass die verwendete scharfkantige Mineralkomponente es erlaubt, besonders steife und auch standfeste Schichten zu realisieren.*

## Zur Methodik der „Rekonstruktion“ von Belagsschichten

Die Rekonstruktion von Belagsschichten ist eine im Rahmen dieses Forschungsprojektes eingesetzte Methode. Vor- und Nachteile ihrer Durchführung können wie folgt zusammengefasst werden:

Die Methode funktioniert grundsätzlich und liefert Ergebnisse, aufgrund derer Aussagen zu den untersuchten Mischguten gemacht werden können.

- Der Vergleich zwischen der gemäss Originalrezeptur rekonstruierten Schicht und Variationen davon ist gut machbar.
- Die Methode ist relativ aufwändig.
- Die Zielgrösse DSR des rückgewonnen Bindemittels ist nicht optimal. Die sich über die verschiedenen Schritte (Probenvorbereitung, Extraktion, Rückgewinnung des Bindemittels, Probenteilung und Prüfung mit dem DSR) hin addierenden Einflüsse und Messfehler reduzieren die Aussagekraft. Insbesondere bringt ein Verfahren wie die Rückgewinnung des Bindemittels zusätzliche Unsicherheit mit sich.
- Es müsste deshalb ein relativ einfach und rasch durchzuführender Labortest an verdichtetem bitumenhaltigem Material entwickelt werden, um eine bessere Zielgrösse zu haben. Die Modulbestimmung mit einem uniaxialen Versuch bei 10 °C und 25 °C und ein dynamischer Kriechversuch bei 40 °C könnte theoretisch an einem Prüfkörper durchgeführt werden und voraussichtlich hinreichend aussagekräftige Resultate liefern.
- Die Rekonstruktion berücksichtigt die mechanische Alterung nicht. Die Ermüdungsprüfung kann da Hinweise geben, doch müsste dazu der Prüfumfang erweitert und bei mehr als einem Lastniveau geprüft werden.

Aus den festgestellten Unterschieden von im Labor hergestellten Probekörpern lassen sich folgende Schlussfolgerung ziehen:

- Laborprüfkörper weichen von denen der Strasse bezüglich Ermüdungsverhalten ab, wenn die Strasse bereits kumulierte Schäden aufweist. Das muss aber weniger als Mangel der Methode betrachtet werden, sondern eher als Möglichkeit, Schwächen alter Tragschichten aufzuzeigen.
- Die Prognosefähigkeit des Verfahrens der Rekonstruktion wird in diesem Punkte eingeschränkt. Es liegen noch zu wenig Datenmaterial und Erfahrungen mit Ermüdungsprüfungen vor, als dass schon gesagt werden könnte, wie die Ermüdungsprüfung eventuell in Kombination der Rekonstruktion geeignet ist, die mechanische Alterung des Belages vorherzusagen. In der Praxis treffen ja die Ermüdung des Belages und die Alterung des Bindemittels in unterschiedlichem Ausmass gekoppelt auf, wobei bei Deckschichten die Alterung des Bindemittels überwiegt, bei Tragschichten die Ermüdung dominiert.

In der praktischen Anwendung interessiert natürlich nicht der Vergleich Ist-Zustand mit der rekonstruierten Belagsschicht, sondern die Prognose über einen längeren Zeitabschnitt, also ein Zielalter. Die Suche nach für den Fall optimalen Alterungsbedingungen entfällt und kann durch ein am gebrauchorientiertes Altern ersetzt werden.

Ein Vorschlag für die Bedingungen für das gebrauchorientierte Alterung kann sich auf die Ergebnisse der Rekonstruktion in diesem Forschungsauftrag abstützen. Das gab für die Belagsschicht URB 16 h bei 110 °C bei VSA 16 h bei 120 °C. In beiden Fällen wurde für die Rekonstruktion ein sortengleiches Bindemittel verwendet. Die Ergebnisse der Schicht SZB

sind nicht zu berücksichtigen, da hier kein Bindemittel gleicher Sorte für die Rekonstruktion verwendet wurde. Der Unterschied in der Temperatur ergibt sich daraus, dass Deckschichten wesentlich stärker altern als Binder- und Tragschichten, was beispielsweise die Prozedur gemäss dem SHRP - Programm mit generell 120 h bei 85 °C nicht berücksichtigt. Der Vorschlag für die Alterung ist somit

- Alterung am losen Mischgut, Schichtdicke 40 bis 50 mm
- Für Deckschichten 16 Stunden bei 120 °C
- Für Binder- und Tragschichten 16 h bei 110 °C
- Probeteilung und Verdichtung zu Prüfkörpern ohne zwischenzeitliches Abkühlen

Aus den Erfahrungen mit den Prüfverfahren lässt sich die Folgerung ziehen, dass fundamentale Prüfverfahren den empirischen überlegen sind, wenn es um das Verständnis des Materialverhaltens geht. Da das Materialverhalten für die Praxistauglichkeit hochbelasteter Strassen entscheidend ist, ist anzustreben, für hochbelastete Strassen von den empirischen Prüfverfahren wegzukommen und sie durch fundamentale zu ersetzen.

## Antworten aufgrund der Forschungsarbeit

Das Projekt erlaubt es, zu den eingangs erwähnten Fragen Stellung zu nehmen:

- **Sind im Anlieferungszustand hochwertige Komponenten auch dauerhaft?**

Die Untersuchungen der Strassenabschnitte zeigen, dass generell hochwertige Zuschlagsstoffe verwendet worden waren. Die ermittelten mechanischen Eigenschaften der Schichten zeigen, dass diese Komponenten auch nach langer Gebrauchsdauer immer noch den erforderlichen Beitrag zur Funktionalität leisten. Für hochwertige Zuschlagstoffe ist das Polieren der obersten Kornlage der Deckschicht als einziger ins Gewicht fallender Minderwert zu betrachten. Ansonsten sind hochwertige mineralische Komponenten dauerhaft.

Beim Bindemittel kann immerhin das für die Schicht B des Strassenabschnittes SZ verwendete Bindemittel als weich taxiert werden. Der Abschnitt weist auch eine gewisse Spurbildung auf, die angesichts der langen Gebrauchsdauer aber nicht als dramatisch bezeichnet werden muss. Die Methode der Rekonstruktion weist richtig dieses Bindemittel als klar zu weich aus.

Das mit SBS - Blockpolymer modifizierte Bindemittel zeigt nicht nur in der Praxis, sondern auch in der rekonstruierten Belagsschicht positive Eigenschaften.

Die in Projekt verwendeten Bindemittel konnten für die Rekonstruktion verwendet werden. Aufgrund der Ergebnisse können sie als tauglich erachtet werden, dauerhafte Strassenabschnitt zu realisieren, eine korrekte Rezeptur vorausgesetzt.

Die rekonstruierten bitumenhaltigen Schichten sind vor allem im hohen Temperaturbereichen weicher als die originalen Asphalte. Im Falle des modifizierten Bindemittels (mit allerdings kürzerer Gebrauchsdauer des Abschnittes) war das nicht der Fall. Das deutet auf eine gewisse Oxidation verbunden mit einer Minderung der Funktionalität beim Bindemittel hin.

Gemäss den Untersuchungen der Strassenabschnitte sind hochwertige Zuschlagstoffe dauerhaft. Bei Deckschichten muss auch ein ausreichender Widerstand gegen das Polieren gefordert werden. Gemäss den Ergebnissen des Forschungsauftrages ist des SBS - Blockpolymer modifizierte Bindemitteln auch bei den im Rahmen der Rekonstruktion angewendeten Bedingungen dauerhaft.

- **Ist das Zusammenwirken dieser Komponenten dauerhaft?**

Da nur erfolgreiche Strassenabschnitte in die Untersuchung einbezogen wurden, kann durch diese Forschung keine umfassende Antwort auf diese Frage gegeben werden. Es fehlt der wesentliche Vergleich mit kritischen oder gar mangelhaften Beispielen. Einzige im Falle des Strassenabschnittes UR weisen Ermüdungsprüfung und dynamische Wasserempfindlichkeit daraufhin, dass nach 20 Jahren Gebrauch die Zusammenwirkung nicht mehr optimal ist.

- **Welche Prüfverfahren und Kriterien sind besonders aussagekräftig und notwendig?**

**Physikalisch orientierte Prüfverfahren** wie das Bestimmen der Steifigkeit und des Widerstandes gegenüber Ermüdung konnten im Projekt erfolgreich eingesetzt werden. Sie liefern aussagekräftige und detaillierte Informationen über das Material. So können auch auf Basis dieser Prüfungen die Relationen zwischen den Bindemittleigenschaften und Schichteigenschaften besser ermittelt werden.

Das gilt sowohl für Mischgut wie für Bindemittel. Empirische Kennwerte wie Penetration und Erweichungspunkt ergaben gleiche Werte, ob die beiden damit realisierten Mischgute sich unterschiedlich verhielten. Im Gegensatz dazu wurden bei den Untersuchungen mit dem DSR Unterschiede festgestellt, die zum Verhalten des Mischgutes passten.

**Das Bestimmen der Steifigkeit als komplexer Modul** erlaubt es, das viskoelastische Verhalten über einen grossen Temperatur- und Frequenzbereich zu bestimmen.

**Die Ermüdungsprüfung** ist in sich schon eine Dauerhaftigkeitsprüfung. Es zeigt sich, dass sie auch geeignet ist, den Zustand eines Belags zu erfassen, indem sie verborgene Schädigungen sichtbar macht. Dies darum, weil sie bei den Schwachstellen ansetzt, indem sie als einen wesentlichen Effekt die Rissausbreitung erfasst.

**Der Druckschwellversuch** liefert differenzierte Ergebnisse bezüglich bleibender Verformung. Was hier allerdings fehlt, ist ein allgemein gültiger Verfahrensbeschrieb. Zudem konnte teilweise beobachtet werden, dass auch innerhalb einer Serie von Prüfkörpern deutliche Unterschiede auftreten. Die Methode hängt somit von der genauen Prüfkörpervorbereitung und Durchführung ab, was die Bedeutung international anerkannter und beschriebener Verfahren unterstreicht.

**Der Spurrinntest** bewährt sich nicht beim Prüfen von Ausschnitten aus der Strasse. Sein Nutzen für die Mischgutoptimierung wird aber durch diese Aussage nicht in Frage gestellt.

**Der Einbezug der angeführten neuen gebrauchorientierten Alterung** zur Dauerhaftigkeitsbeurteilung in das Mix-Design dürfte zu einem verbesserten Langzeitverhalten führen, vorausgesetzt, dass beim Einbau und Mix-Design das gleiche Bindemittel verwendet wird.

**Fazit:** Nach den Erkenntnissen der Forschungsarbeiten sollten in Zukunft für hochbelastete Strassen fundamentale und nicht empirische Anforderungen gestellt werden. Das sind insbesondere die Steifigkeit, der Widerstand gegen Ermüdung und die Verformungsbeständigkeit. Es ist zudem Einfluss auf die europäische Normung zu nehmen, damit in der Schweiz die entsprechenden Prüfungen in einer machbaren Form implementiert werden können. Nur als Beispiel: Die in der EN geforderten 18 Einzelprüfungen für die Ermüdung sind nicht nur sehr aufwändig sondern dauern auch zu lange.

- **Gibt es Ansätze, die Dauerhaftigkeit zu verbessern?**

Das Projekt konnte durch Variation der Komponenten Mischgutrezepturen mit neuen Komponenten ermitteln, welche im Vergleich zu den erfolgreichen Belägen ebenfalls gute Chancen für Dauerhaftigkeit haben.

Das Projekt zeigte klar, dass die Schweiz eine zentrale Stelle benötigt, welche nachhaltig Performancedaten erhebt und diesen ausserordentlich wertvollen Erfahrungsschatz pflegt. Damit wird die Grundlage für die fundierte Forschung ermöglicht und die Gefahr teurer Wiederholungen reduziert.

Bei den im Projekt gefundenen dauerhaften Nationalstrassenabschnitten mit Teerbitumen zeigten sich klar technisch positive Eigenschaften. Es ist anzustreben, nach Konzepten zu suchen, die zu Belägen führen, die sich in ähnlicher Weise wie diese Nationalstrassenabschnitten verhalten, jedoch nicht den Nachteil der Gesundheitsgefährdung aufzuweisen. Wahrscheinliche Faktoren sind die gute Verdichtbarkeit von teerbitumenhaltigem Mischgut, ein eventueller Alterungsschutz von Bestandteilen des Teers und die dauerhafte Haftung dieser Bindemittel am Gesteinen.

**Fazit:** Ein vielversprechender Ansatz zur Erreichen ähnlich dauerhafter Beläge ohne teerhaltige Bindemittel sind Zusätze wie hochschmelzende Paraffine, die den Asphalt bei höheren Temperaturen dünnflüssiger machen. Daneben sollte dem Oxidationsschutz Beachtung geschenkt werden

- **Wie kann die Dauerhaftigkeit evaluiert und bewertet werden?**

**Die Dauerhaftigkeit** kann aufgrund physikalisch definierter Prüfverfahren besser abgeschätzt werden als mittels empirischer Prüfungen. Das Projekt konnte klar die Möglichkeiten und Problemstellungen bei der Rekonstruktion von Belagsschichten aufzeigen und einige Vorschläge und Methoden unterbreiten. Darauf aufbauend wurde die gebrauchorientierte Alterung zur Dauerhaftigkeitsbeurteilung definiert. Diese kann im Rahmen einer erweiterten Eignungsprüfung durchgeführt werden, allerdings muss dann beim Einbau das gleiche Bindemittel gebraucht werden.

**Fazit:** Die Methode der sogenannt gebrauchorientierten Alterung kann bei Grossprojekten eingesetzt werden, um einen ersten Vorschlag für eine Mischgutformulierung vertieft zu prüfen. Voraussetzung dafür ist eine Weiterentwicklung der Methode, wobei die in dieser Arbeit angewandte Suche nach den optimalen Alterungsbedingungen zu verbessern ist. Das würde eine Abschätzung des Gebrauchsverhaltens über einen grösseren Zeitraum erlauben.

## Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

### Zusammenfassung der Schlussfolgerungen aus Bericht- Kapitel 6.1 bis 6.6

- Das Projekt zeigte, dass die untersuchten erfolgreichen und langlebigen Beläge auch den heutigen Normanforderungen für Asphaltbeton genügen. Somit ist es möglich, Beläge für hochbelastete Strassen nach dieser Norm zu bauen. Da aber nur erfolgreiche Beläge untersucht worden waren, kann aus der Forschung nicht geschlossen werden, dass die Beachtung der Normen zwingend zu Belägen langer Gebrauchsdauer führen.
- Die Datenbasis über die in die Untersuchung einbezogenen Strassenabschnitte war in Hinblick auf die verwendeten Baustoffe teilweise mangelhaft. Eine zentrale Stelle, welche nachhaltig Performancedaten erhebt und diesen ausserordentlich wertvollen Erfahrungsschatz pflegt, würde wertvolle Erkenntnisse zum Thema dauerhafte Belagsaufbauten liefern.
- Bei den im Projekt gefundenen dauerhaften Nationalstrassenabschnitten mit Teerbitumen zeigten sich technisch positive Eigenschaften. Es ist anzustreben, nach Konzepten zu suchen, die zu Belägen führen, die sich in ähnlicher Weise wie diese Nationalstrassenabschnitten verhalten, jedoch nicht den Nachteil der Gesundheitsgefährdung aufzuweisen. Ein Ansatz zur Erreichen ähnlich dauerhafter Beläge ohne teerhaltige Bindemittel sind Zusätze die den Asphalt bei höheren Temperaturen dünnflüssiger machen. Zudem sprechen die Ergebnisse des Forschungsauftrages für die Verwendung von mit SBS - Blockpolymeren modifizierten Bindemitteln.
- Physikalisch orientierte Prüfverfahren wie das Bestimmen der Steifigkeit und des Widerstandes gegenüber Ermüdung erwiesen sich im Projekt als erfolgreich. Sie lieferten aussagekräftige und detaillierte Informationen über das Material und über den Zustand der Strassen. Für hochbelastete Strassen sollten in Zukunft fundamentale und nicht mehr empirische Anforderungen gestellt werden.
- Die im Zusammenhang mit den Vergleichsstrecken BL und dem Rundlauf gemachten Untersuchungen zeigen dass auch beim Bindemittel die mechanische Prüfung mit dem DSR die aussagekräftigeren Ergebnisse lieferten als die klassischen Prüfungen Penetration und Erweichungspunkt.
- Für die Rekonstruktion ist die Zielgrösse DSR des rückgewonnen Bindemittels ist nicht optimal, weil die gesamte Verarbeitungskette (Probenvorbereitung, Extraktion, Rückgewinnung des Bindemittels, Probenteilung und Prüfung mit dem DSR) die Aussagesicherheit zu sehr reduziert.
- Das Projekt konnte durch Variation der Komponenten Mischgutrezepturen mit neuen Komponenten ermitteln, welche im Vergleich zu den erfolgreichen Belägen ebenfalls gute Chancen für Dauerhaftigkeit haben. So konnte aus einem erfolgreichen AB 11 rechnerisch ein AB 8 formuliert werden, der gute mechanische Kennwerte aufwies.

*Im Falle der Strecke SZ konnte durch den Wechsel zu einem polymermodifizierten Bindemittel eine deutliche Verbesserung der Eigenschaften erzielt werden.*

- *Die Methode der gebrauchsorientierten Alterung zur Dauerhaftigkeitsbeurteilung kann bei Grossprojekten eingesetzt werden, um einen Vorschlag für eine Mischgutformulierung vertieft zu prüfen. Das erlaubt eine Abschätzung des Gebrauchsverhaltes über einen grösseren Zeitraum.*

### **Zusammenstellung der wichtigsten Antworten aus Bericht - Kapitel 6.7**

- *Sind im Anlieferungszustand hochwertige Komponenten auch dauerhaft?*

*Gemäss den Untersuchungen der Strassenabschnitte sind hochwertige Zuschlagstoffe dauerhaft. Bei Deckschichten muss auch ein ausreichender Widerstand gegen das Polieren gefordert werden. Gemäss den Ergebnissen des Forschungsauftrages erwies sich das SBS-Blockpolymer modifizierte Bindemittel auch bei den im Rahmen der Rekonstruktion angewendeten Bedingungen dauerhaft, es wurde kein Funktionsverlust (etwa durch Abbau der Polymere) des verdichteten Mischgutes festgestellt. Bei den für die Rekonstruktion eingesetzten nicht modifizierten Bitumen konnte keine erhöhte Ermüdungsanfälligkeit bei den gewählten Alterungsbedingungen festgestellt werden.*

- *Welche Prüfverfahren und Kriterien sind besonders aussagekräftig und notwendig?*

*Nach den Erkenntnissen der Forschungsarbeiten sollten in Zukunft für hochbelastete Strassen fundamentale und nicht empirische Anforderungen gelten. Das sind insbesondere die Steifigkeit, der Widerstand gegen Ermüdung und die Verformungsbeständigkeit. Dabei lieferte insbesondere der Druckschwellversuch differenzierte Ergebnisse bezüglich bleibender Verformung. Es ist zudem Einfluss auf die europäische Normung zu nehmen, damit in der Schweiz die entsprechenden Prüfungen in einer machbaren Form implementiert werden können. Nur als Beispiel: Die in der EN geforderten 18 Einzelprüfungen für die Ermüdung sind nicht nur sehr aufwändig sondern dauern auch zu lange.*

*Der Spurrinentest bewährt sich nicht beim Prüfen von Ausschnitten aus der Strasse. Sein Nutzen für die Mischgutoptimierung wird aber durch diese Aussage nicht in Frage gestellt.*

- *Gibt es Ansätze, die Dauerhaftigkeit zu verbessern ?*

*Ein Ansatz zur Erreichen dauerhafter Beläge sind Zusätze, die den Asphalt bei höheren Temperaturen dünnflüssiger machen. Daneben sollte dem Oxidationsschutz Beachtung geschenkt werden.*

- *Wie kann die Dauerhaftigkeit evaluiert und bewertet werden?*

*Die Methode der gebrauchsorientierten Alterung zur Dauerhaftigkeitsbeurteilung kann bei Grossprojekten eingesetzt werden, um einen Vorschlag für eine Mischgutformulierung vertieft zu prüfen. Voraussetzung ist eine Weiterentwicklung der Methode, wobei die in dieser Arbeit angewandte Suche nach den optimalen Alterungsbedingungen zu verbessern ist und durch Bewitterungsversuche zu ergänzen wäre. Das erlaubt eine Abschätzung des Gebrauchsverhaltes über einen grösseren Zeitraum.*

## Was ist die günstigste Methodik aus Sicht von FP 2 ?

Die Methodenbewertung für Bindemittel und verdichtetes Mischgut aus Sicht der Forschungsstelle sind in Tabelle 0.3 zusammengestellt. Die Bewertung bezieht sich auf den Anwendungsbereich dieser Forschung. Es werden nur Alterungsmethoden und die mechanischen Prüfverfahren bewertet.

**Tabelle 0.3 Beurteilung der verwendeten Methoden**

<b>Methode</b>	<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>	<b>Bewertung</b>
Penetration, Erweichungspunkt	Einfach, durch alle Prüflabors anwendbar	Beschränkte Aussagefähigkeit	Geeignet für Klassierung und Routineprüfung, ungeeignet für mechanische Beurteilung
DSR	Einfach durchzuführen, erlaubt vollständige Bestimmung der mechanischen Eigenschaften im Gebrauchsbereich	Relativ teures Gerät	Geeignet für mechanische Beurteilung
Alterung des Bindemittels	Definierte Methoden	Für die Produktion von Mischgut zu aufwändig, weil die Alterungsverfahren mit kleinen Bindemittelmengen arbeiten	Methode ausgeschlossen
Alterung des losen Mischgutes	Definierte Methoden, Bedenken wegen unzureichender Verdichtung erwiesen sich als unbegründet	Keine	Methode der Wahl
Alterung des verdichteten Mischgutes	Normgemässes Herstellen der Prüfkörper	Sehr unhomogene Alterung, Prozess damit ungenügend kontrolliert	Methode wissenschaftlich nicht haltbar
Druckschwellversuch	Einfach durchzuführen, differenziert gut	Mechanische Spannung nicht genau definiert, Anfangsbedingungen beeinflusse das Ergebnis,	Methode liefert rasch relevante Aussagen, setzt aber fachliche Kompetenz voraus

<b>Methode</b>	<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>	<b>Bewertung</b>
Koaxialer Schubtest	Liefert im mittleren und hohen Temperaturbereich gute Ergebnisse, der Prüfkörper ist gegen zerstörenden Einfluss der Belastung während der Prüfung geschützt	Relativ aufwändig, bei hohen Modulen des Asphaltes können aufbaubedingte Fehler auftreten.	Für spezielle Fragestellung geeignet
Modulbestimmung und Ermüdungsprüfung, 4-Punkt-Biegung	Gut definiertes Prüfverfahren.	Relativ aufwändig	Für Ermüdung und Modulbestimmung bis maximal 20 °C geeignet
Wasserempfindlichkeit unter zyklischer Belastung	Kann kombinierte Einwirkung von Wasser und mechanischer Belastung erfassen	Aufwändig	Einzigste Prüfung mit dieser Aussagemöglichkeit, aber nur in wissenschaftlichem Kontext anwendbar
Widerstand gegen Spurbildung mit grossem Rad	Gut definiertes Prüfverfahren	Aufwändig	Gut geeignet für die Erstprüfung von Mischgut, kaum geeignet für das Prüfen von Ausschnitten aus Strassen
In Situ Widerstand gegen Spurbildung mit MMLS	Praxisnähe	Sehr aufwändig	Geeignet für Prüfung in Situ

## Weiterer Forschungsbedarf

*Das Aufgrund dieser Forschung vorgeschlagene Verfahren der gebrauchorientierten Alterung zur Dauerhaftigkeitsbeurteilung sollte im Rahmen objektgebundener Forschung angewendet werden. Zielsetzungen wären dabei*

- *Erweiterte Eignungsprüfung der im Objekt verwendeten Mischgute*
- *Feststellen der Wiederholbarkeit des Verfahrens durch mehrfache Durchführung*
- *Validieren (Überprüfen) des Verfahrens durch Beobachten des Objektes*

*Das Verfahren der Rekonstruktion sollte verbessert werden. Insbesondere müsste zur Bindemittelalterung am Mischgut eine klimatische Alterung am hergestellten Prüfkörper erfolgen. Zudem sollte die Verifikation, ob das hergestellte Mischgut dem Zielasphalt aus der Strasse entspricht, am verdichteten Mischgut selber und rasch durchgeführt werden können. Dabei ist die Europäische Norm über die Bestimmung der Steifigkeit mit dem Indirekten Zugversuchs an die Problemstellung anzupassen. Zielsetzung wäre dabei die Verbesserung des Verfahrens der gebrauchorientierten Alterung.*

*Die mit der MMLS durchgeführte Untersuchung von zwei Feldern auf der Strasse, den gleichen Feldern im Rundlauf und die begleitenden, materialtechnischen Untersuchungen lieferten konsistente Ergebnisse [GUB.R04b]. Das weist den Nutzen eines Verkehrslastsimulators hin.*



### **3. FP 3, UMSETZUNG Projekt „Durabilité des enrobés“**

LAVOC, Laboratoire des voies de circulation, EPFL

#### **3.1 FP 3-1 Modélisation des Charges d'essieu**

##### **ZUSAMMENFASSUNG**

*Die Ausgestaltung der Achse eines Schwerverkehrfahrzeugs hat einen direkten Einfluss auf die Lastverteilung zwischen Reifen und Strasse. Ziel der vorliegenden Studie ist die bessere Beurteilung der drei wichtigsten Einflussparameter: Gesamtlast, Reifendruck und Reifentyp.*

*Die Studie basiert einerseits auf einem empirischen Ansatz, mittels Grossversuchen, und andererseits auf einem analytischen Ansatz, mittels eines mechanischen Verhaltensmodells des Schichtaufbaus. Analyse und Vergleich der Messungen erlauben die Beurteilung des Modells anhand des Grossversuches, sowie andererseits die Bewertung des Einflusses der verschiedenen Parameter auf Verteilung und Stärke der Verformungen in den bituminösen Schichten, dies auch in geringer Tiefe.*

*Zusätzlich kann die Analyse der Spannungsentwicklung in Abhängigkeit der Tiefe mithelfen, die Entstehung von Spurrinnen in bituminösen Schichten zu erklären.*

*Letztlich soll diese Studie auch die Wichtigkeit der Benutzung von analytischen Methoden unterstreichen, welche aus detaillierten Lastmerkmalen den Spannungszustand in geringer Tiefe und unter dem Reifenrand herleiten.*

##### **Problématique**

*Les poids lourds, qui représentent les éléments les plus agressifs du trafic en terme de sollicitations, voient leur configuration évoluer rapidement et constamment. En plus d'une tendance à voir la charge totale maximale admissible augmenter, on constate également que la configuration des essieux<sup>1</sup> et des roues change. La tendance observée, en particulier sur les semi-remorques, est de remplacer les roues jumelées traditionnelles par des essieux à roues simples à large bande. De plus, le diamètre des pneus tend à diminuer, ce qui nécessite un accroissement de leur pression de gonflage. Ces évolutions ont pour conséquence de modifier de façon importante, le transfert de charge en surface de la chaussée. Des dégradations observées sur des revêtements, qui jusqu'alors ne posaient aucun problème, sont là pour le confirmer.*

*Les récentes études entreprises dans ce domaine montrent que la répartition de la charge au contact pneu-chaussée n'est pas uniforme. Or à ce jour, les modèles de dimensionnement font généralement appel à une modélisation de la charge basée sur l'hypothèse d'une répartition uniforme de la pression de contact sur une surface circulaire. De plus, les critères de dimensionnement utilisés ne concernent jamais directement l'état de sollicitation (contraintes ou déformations) à faible profondeur, alors que c'est à cet endroit qu'il faut s'attendre à ce que les modifications dans l'application des charges aient des influences marquées.*

---

<sup>1</sup> On utilise, par abus de langage, le terme "essieu" pour désigner un "axe". Un essieu est parfois constitué de plusieurs axes (tandem, tridem)

*Si l'on veut mettre au point des matériaux capables de performances accrues, il convient de déterminer tout d'abord précisément les sollicitations générées par les charges de poids lourds dans le revêtement à travers un modèle de calcul d'une part, et de mettre au point des essais qui traduisent les performances des matériaux vis-à-vis de ces sollicitations d'autre part. En outre, il est nécessaire de pouvoir différencier les sollicitations subies par les matériaux bitumineux en fonction de leur position dans la chaussée (profondeur).*

*Les nombreux paramètres pouvant avoir une incidence sur la répartition des pressions au contact pneu-chaussée sont multiples. La forme du pneu, sa pression de gonflage et sa rigidité, la charge appliquée, la température du lieu, la vitesse et la trajectoire des véhicules lourds, la planéité de la chaussée, la suspension du véhicule, sont des éléments qui exercent chacun une influence significative sur les pressions de contact.*

## **Objectif de l'étude**

*La présente recherche, vise à proposer une nouvelle approche pour la modélisation des charges de trafic. Elle définit par ailleurs les paramètres entrant dans la description des charges de trafic qui influencent de façon significative les sollicitations des couches bitumineuses des chaussées routières. Elle suggère également des méthodes permettant d'intégrer la prise en compte de ces paramètres dans le calcul des charges de trafic.*

## **Démarche de l'étude**

*Après un premier chapitre d'introduction, le deuxième chapitre de cette étude est consacré à la problématique du dimensionnement des chaussées. Il commence par une brève présentation de deux types de méthodes de dimensionnement : les méthodes purement empiriques et les méthodes dites mécaniques empiriques. Il se poursuit par un état des connaissances concernant la prise en compte des charges dans les méthodes de dimensionnement et les conditions réelles d'application des charges sur les chaussées. Ce chapitre se termine par une brève description des outils analytiques permettant le calcul des sollicitations dans les chaussées.*

*Le chapitre trois est consacré à l'analyse des déformations dans les couches bitumineuses, analyse basée aussi bien sur des données expérimentales que sur les résultats de modélisations effectuées selon les principes des méthodes mécaniques empiriques de dimensionnement. Le chapitre commence par une description des expériences ayant fourni les résultats expérimentaux, par des considérations sur l'analyse des signaux de déformation enregistrés dans les couches bitumineuses des chaussées souples et par une définition des hypothèses retenues pour les modélisations. La suite du chapitre est consacrée aux résultats obtenus, soit à :*

- une étude des amplitudes maximales de déformation au bas des couches bitumineuses pour différentes conditions de chargement (cette étude permet notamment de définir l'influence relative des paramètres de charge - intensité, pression de gonflage, type de roue - sur les amplitudes maximales)*
- une étude des signaux de déformation au bas des couches bitumineuses*
- une étude des signaux de déformation à faible profondeur, soit au bas de la couche de roulement.*

*Le quatrième chapitre émet des propositions pour exploiter les résultats obtenus au chapitre trois. Ces propositions consistent en des formules permettant d'intégrer les principaux facteurs décrivant les charges de trafic – intensité de la charge, pression de gonflage et type de roue - dans le calcul du trafic équivalent.*

*Le cinquième chapitre étudie l'effet des variations des conditions d'application des charges sur les contraintes et les déformations calculées à partir d'un comportement élastique. Il consiste à appliquer différentes hypothèses pour la répartition des pressions de contact exercée par le pneu sur la chaussée, ceci pour un même chargement en termes d'intensité de la charge et de pression de gonflage des pneus. Les effets sont étudiés à deux profondeurs, soit au bas de la couche de base et en surface. Le chapitre se termine par des considérations sur les variations des sollicitations agissant sur les matériaux bitumineux en fonction de la profondeur où ils se trouvent dans la chaussée.*

## **Sollicitations et dimensionnement des chaussées routières**

### **Les différentes sollicitations**

*Les dégradations des structures routières peuvent être associées à trois types de sollicitations qui peuvent avoir des origines différentes:*

- *sollicitations d'origine mécanique*
- *sollicitations d'origine climatique*
- *phénomènes d'altération chimique*

*Les processus de dégradations sont en général le résultat de la combinaison de ces trois types de sollicitation, si bien qu'il conviendrait d'envisager le comportement des structures routières sous leur effet simultané. Toutefois, il n'existe pas actuellement de méthode d'analyse complète permettant de combiner l'ensemble de ces différents effets, raison pour laquelle les approches théoriques visant à décrire le comportement des structures routières tendent généralement à les séparer pour se focaliser principalement sur un nombre restreint de ces aspects, adoptant des hypothèses simplificatrices pour les autres.*

*Lorsque l'on parle de sollicitations mécaniques, on pense en premier lieu à celles qui sont induites par le trafic circulant sur les infrastructures et qui constituent l'objet principal de cette étude. Cependant, il faut signaler que des sollicitations mécaniques peuvent avoir d'autres origines, notamment en rapport avec les conditions climatiques ou hydrogéologiques.*

*Le trafic peut être divisé en deux catégories: le trafic léger et le trafic lourd. Cette distinction se fait en général à partir de considérations légales ou techniques et par une limite de la charge totale des véhicules. En Suisse, le trafic lourd selon la norme « Dimensionnement - Trafic pondéral équivalent » (SN 640320) se compose de l'ensemble des véhicules dont le poids total excède 3,5 to. Le trafic lourd est donc essentiellement composé de camions et de bus, dont les silhouettes (nombre et type d'essieux) sont extrêmement variables. En raison de l'effet quasi insignifiant du trafic léger, seul le trafic lourd est pris en compte pour le dimensionnement des structures routières<sup>2</sup>.*

---

<sup>2</sup> Comme ordre de grandeur, on admet que le passage d'un seul camion correspond aux passages d'environ 10'000 voitures

## **Les différents types de méthodes de dimensionnement**

Ce chapitre contient la description et les principes de trois différents types de méthodes de dimensionnement :

- méthode empirique
- méthode mécanique empirique (ou analytique empirique)
- méthode incrémentale.

*Si les deux premières méthodes sont largement utilisées actuellement, la troisième est en fait une proposition émise par un groupe d'experts européens sur les principes qui devraient être appliqués pour définir une méthode permettant de suivre au mieux l'évolution de l'état réel des chaussées pendant leur utilisation.*

### **Méthode empirique : exemple de la méthode suisse**

*Les méthodes empiriques de dimensionnement font appel exclusivement à des expériences comparant le comportement à long terme de diverses structures pour différentes conditions climatiques et de trafic. Des essais en vraie grandeur (test de structures réelles sous des conditions réalistes de trafic et de climat) apportent également des informations nécessaires à la mise en place des règles empiriques de dimensionnement. La méthode de dimensionnement définie par les normes routières suisses éditées par la VSS<sup>3</sup> est un exemple représentatif des méthodes empiriques.*

*Cette méthode se base sur les résultats de l'AASHO Road Test<sup>4</sup> (AASHO 1986) dont les normes suisses sont issues. Durant cet essai, un grand nombre de structures routières de conceptions différentes ont été sollicitées par des véhicules présentant différentes configurations de charge (intensité et nombre d'axes par essieu). L'exploitation des résultats a essentiellement été faite en terme d'équivalence, tant en ce qui concerne les charges de trafic par la notion de trafic équivalent, que les matériaux des chaussées, par la notion de valeurs de portance ( $a$ ). Ces dernières, combinées avec les épaisseurs des couches, servent à quantifier la capacité portante d'une chaussée par sa valeur SN (Structural Number)<sup>5</sup>.*

*Le dimensionnement des chaussées routières en Suisse est défini par la norme « Dimensionnement - Superstructure des routes » (SN 640324). Il nécessite que les deux données fondamentales définies précédemment (trafic et sol) soient définies par des classes de trafic et des classes de portance du sol d'infrastructure.*

*Les classes de trafic pondéral  $T_i$  sont définies à partir du trafic pondéral équivalent calculé selon la norme « Dimensionnement - Trafic pondéral équivalent » (SN 640320). Les classes de trafic sont au nombre de 6, allant de T1 pour un trafic très léger à T6 pour un trafic extrêmement lourd. Des explications plus détaillées pour le calcul du trafic équivalent sont données ultérieurement (cf. §).*

---

<sup>3</sup> Association suisse des professionnels de la route et des transports

<sup>4</sup> Essai en vraie grandeur sur piste d'essai réalisé aux Etats-Unis de 1958 à 1960, AASHO : American Association of State Highway Officials

<sup>5</sup> On distinguera la notation SN pour Structural Number de celle de SN Schweizer Norm

Les classes de portance sont au nombre de 5, allant de S0 pour une portance très faible à S4 pour une portance très élevée. Les sols de classe S0 n'entrent pas dans le dimensionnement traditionnel des chaussées : ils doivent être améliorés ou faire l'objet d'une étude particulière. Les classes de portance sont définies dans la norme « Sols, essais - essai de plaque  $M_E$  et  $E_v$  » (SN 670317) et la norme « Dimensionnement - Superstructure des routes » (SN 640324) à partir d'un des paramètres suivants :

- module  $M_{E1}$  (en  $kN/m^2$ ) selon (SN 670317)
- module  $E_{v1}$  (en  $kN/m^2$ ) selon (SN 670317)
- coefficient CBR (en %) selon (SN 670316) et (SN 670320)
- module de réaction de Westergaard (en  $MN/m^3$ ) selon (SN 670319).

Pour le dimensionnement des chaussées souples et semi-rigides, la norme fixe une valeur SN nécessaire pour des classes de trafic et de portance définies. La valeur SN effective d'une superstructure se calcule de la manière suivante :

$SN = \sum_i^n a_i \cdot D_i$	Eq. 1
-------------------------------	-------

avec :

- $a_i$  = valeur de la portance équivalente d'un cm d'un matériau  $i$  par rapport à la valeur d'une grave ronde, prise comme matériaux de référence (-)
- $D_i$  = épaisseur de la couche du matériau  $i$  dans la superstructure (cm)

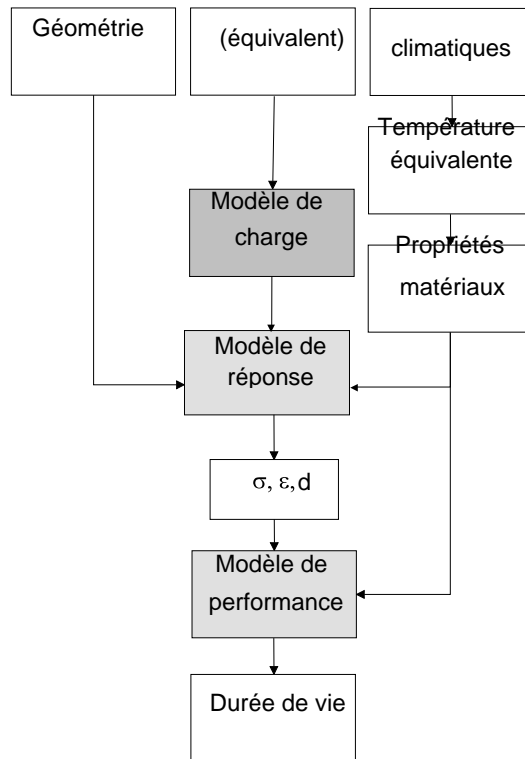
Un catalogue des structures a été établi sur ce principe et est proposé dans la norme « Dimensionnement - Superstructure des routes » (SN 640324).

## **Méthode mécanique empirique**

Ces méthodes font appel à une approche analytique qui est complétée par des données empiriques. Décrites dans le rapport final de l'action COST 333 intitulée « Development of New Bituminous Pavement Design Method » (COST\_333 1999) ou dans « Pavement Analysis and Design » (Huang 1993), elles procèdent généralement en deux étapes :

- détermination des sollicitations dans une superstructure sous l'effet d'une charge définie de trafic
- mise en relation de ces sollicitations avec les dégradations des chaussées.

En plus du modèle pour la charge de référence, ces méthodes utilisent deux types de modèles pour les matériaux auxquels elles ont recours : des modèles de calcul (ou de réponses) et des modèles dits de performances (Figure 1).



**Figure 1 : Principe de fonctionnement des méthodes de dimensionnement mécaniques empiriques (COST\_333 1999)**

*Le modèle de charge, qui est au centre de ce travail, consiste à donner une image aussi réaliste que possible des charges de trafic appliquées par les roues des véhicules lourds.*

*Les modèles de réponse permettent d'obtenir la réponse immédiate d'une chaussée, en termes de contraintes et déformations, sous l'effet d'une charge et dans des conditions bien définies. Ils nécessitent la définition de paramètres pour décrire la structure (géométrie et lois de comportement) et les conditions de chargement (intensité de la charge, pression de contact, etc.). Ils fournissent des résultats théoriques correspondant aux hypothèses retenues pour la modélisation. Dans la plupart des cas, ces modèles se basent sur un comportement élastique des matériaux, mais rien ne s'oppose à l'utilisation d'autres types de comportement.*

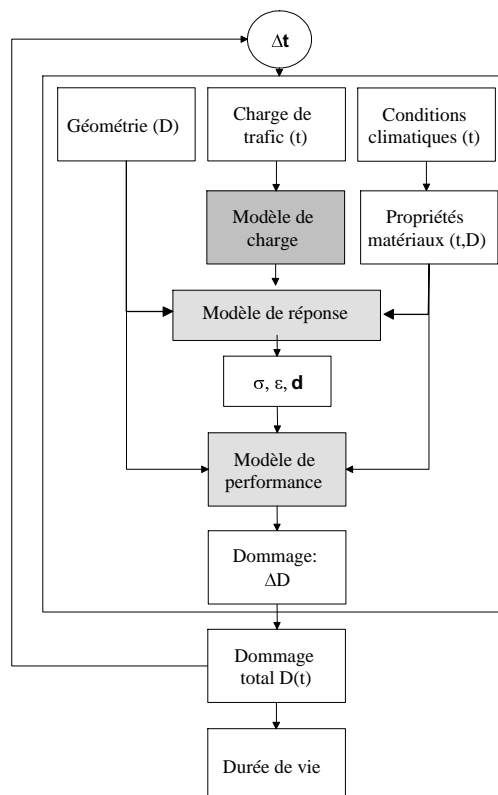
*Les modèles de performance relient les états de sollicitations issus des modèles de réponse avec les dégradations des chaussées. Ils sont généralement obtenus en combinant des résultats d'essais en laboratoire avec l'observation du comportement réel de chaussées. Ils permettent d'exprimer le nombre de cycles d'une sollicitation donnée qu'une chaussée est à même de supporter avant de présenter une dégradation jugée inadmissible.*

*Ces deux types de modèles dépendent d'un même et unique phénomène : le comportement des matériaux bitumineux, et ne sont en principe pas indépendants. L'existence d'une séparation de ceux-ci dans les méthodes de dimensionnement provient généralement de la prise en compte de données empiriques dans les modèles de performance.*

*Etant donné que les normes routières suisses ne proposent pas de méthodes mécaniques empiriques, les hypothèses retenues pour cette étude seront tirées de la méthode française de dimensionnement des chaussées décrite dans le guide technique « Conception et dimensionnement des structures de chaussée » (SETRA-LCPC 1994).*

## Méthode incrémentale

Au niveau européen, un projet de fonctionnement pour une méthode incrémentale a été proposé (Figure 2).



**Figure 2 :** Schéma de fonctionnement pour une méthode incrémentale de dimensionnement (COST\_333 1999)

Cette méthode envisage d'étudier l'évolution d'une chaussée dans le temps ( $t$ ) en cumulant l'effet, exprimé en terme de dommage ( $D$ ), de chacune des sollicitations induites par les charges de trafic. Une telle méthode doit permettre de limiter, voir de supprimer, l'importance des données empiriques pour le dimensionnement des chaussées routières. Cette démarche prévoit de tenir compte de l'effet d'une sollicitation non seulement sur l'état de la chaussée (géométrie), mais également sur l'évolution des propriétés des matériaux en fonction du dommage subi. Elle doit également intégrer l'effet des variations de température et les données réelles de trafic, sans avoir recours à la notion de trafic équivalent. La mise en place d'une telle méthode s'avère cependant très complexe à cause des nombreuses interactions entre les phénomènes pris en compte. Ainsi, pour chaque nouvelle charge de trafic agissant à l'instant  $t_i$ , il s'agit de déterminer un supplément de dommage en tenant compte non seulement de l'influence des conditions climatiques sur les propriétés des matériaux à cet instant  $t_i$ , mais également des dommages déjà subis par la structure.

L'intérêt d'une telle méthode réside dans la possibilité de suivre l'évolution d'une chaussée au cours du temps : outre une estimation de sa durée de vie, il serait possible d'évaluer son état structurel à tout instant. Cette évaluation permettrait d'introduire la notion de cycle de vie d'une structure routière pour des analyses économiques prenant en compte les investissements, les coûts d'exploitation et les coûts d'entretien.

Toutefois, une telle démarche nécessite un nombre très important de données (trafic, climat, lien entre les deux, etc.) qui sont actuellement difficilement disponibles. D'autre part, les études sur l'évolution des propriétés mécaniques des matériaux routiers en fonction de l'historique de leurs sollicitations ne sont pas encore à même de fournir des lois de comportement utilisables, rendant actuellement impossible la mise en place d'une telle méthode.

Cette démarche nécessite donc encore de nombreux efforts de recherches. Des propositions récentes ont montré qu'il est possible d'introduire, dans le cadre de méthodes mécaniques empiriques, des notions de variabilités des facteurs intervenant dans le dimensionnement des chaussées. Ces travaux proposent que les dégradations mécaniques des matériaux puissent également être incluses dans cette notion de variabilité (Kim and Buch 2003).

## **Problématique des charges de trafic**

Les sollicitations mécaniques prises en compte pour le dimensionnement des chaussées proviennent des charges de trafic. Rappelons qu'elles peuvent avoir d'autres origines, en rapport avec les conditions climatiques ou hydrogéologiques, mais ces aspects ne sont pas abordés dans le cadre du présent travail. Le trafic est décomposé en deux catégories : trafic léger ou trafic lourd. Le trafic lourd pris en compte en Suisse comprend l'ensemble des véhicules dont le poids total est supérieur à 3,5 to.

La plupart des méthodes de dimensionnement, y compris les méthodes mécaniques empiriques, utilisent la notion de trafic équivalent qui permet d'exprimer l'effet d'une multitude de charges différentes à partir d'une charge de référence. Une excellente description de la notion de facteur d'équivalence est donnée au premier chapitre du livre de David Cebon « Handbook of Vehicle-Road Interaction » (Cebon 1999).

## **Outils pour la modélisation des superstructures routières**

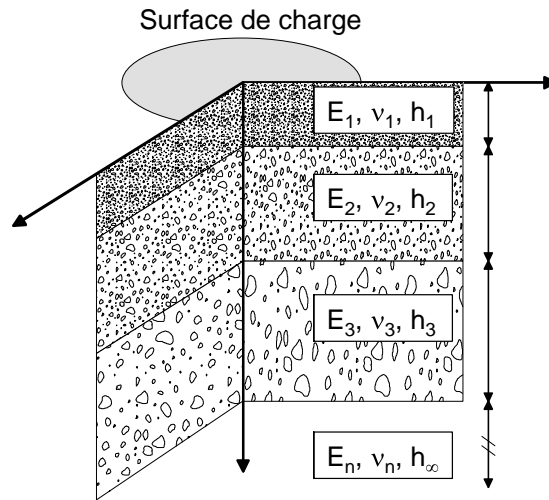
La modélisation des chaussées routières dans le cadre des méthodes mécaniques empiriques de dimensionnement se fait généralement en admettant une décomposition de la superstructure en couches successives d'épaisseur constante. La plupart des calculs élastiques sont effectués avec des logiciels basés sur le modèle multicouche de Burmister présenté ci-après.

### **Le modèle multicouche de Burmister**

Burmister a traité le problème général d'une structure de  $n$  couches sollicitée par une charge circulaire uniformément répartie, selon le schéma suivant :

Ce modèle est à la base des modèles dits multicouches utilisés dans les méthodes mécaniques empiriques de dimensionnement et exige les hypothèses suivantes :

- la charge est introduite par une pression uniforme appliquée sur une surface circulaire de rayon  $a$
- chaque couche est constituée d'un matériau homogène, isotrope, suivant un comportement élastique linéaire
- les couches sont infinies en plan et ont une épaisseur constante
- la couche la plus profonde a une épaisseur infinie
- les interfaces entre les couches sont collées, partiellement collées ou libres.



**Figure 3 : Schématisation du modèle de Burmister**

Chaque couche est définie par trois paramètres : son épaisseur  $h$ , son module d'élasticité  $E$  et son coefficient de Poisson  $\nu$ . Il est généralement possible d'introduire différentes conditions aux interfaces entre les couches, allant d'un collage parfait (déplacement identiques des deux couches) à un glissement total entre les couches (déplacement libre d'une couche par rapport à l'autre).

Les contraintes et les déplacements dans un tel modèle sont déterminés à partir de la fonction de contrainte suivante (Van Cauwelaert 1995) :

$\varphi_i = pa \int_0^{\infty} \frac{J_0(mr)J_1(ma)}{m} [A_i e^{mz} - B_i e^{-mz} + zC_i e^{mz} - zD_i e^{-mz}] dm$	Eq. 2
--	-------

- avec :
- a = rayon de la surface de chargement
  - p = pression de chargement uniformément répartie
  - r = distance radiale en coordonnées cylindriques
  - z = profondeur
  - $A_i, B_i, C_i, D_i$  = paramètres inconnus déterminés par les conditions aux limites
  - $J_0$  = fonction de Bessel de première espèce d'ordre 0
  - $J_1$  = fonction de Bessel de première espèce d'ordre 1
  - m = paramètre d'intégration

Le détail des équations pour le calcul des contraintes et des déplacements obtenues à partir de cette fonction de contrainte est donné en annexe.

## **La charge dans le modèle de Burmister**

*Dans un tel modèle, la charge doit être définie par le type de roue, la pression verticale et le rayon de la surface de contact. L'hypothèse communément retenue consiste à admettre que la pression de contact est égale à la pression de gonflage du pneumatique et que le rayon de la surface se calcule à partir de l'intensité totale de la charge<sup>6</sup>.*

*La fonction de contrainte servant au calcul des contraintes et des déplacements n'utilise que deux paramètres pour décrire la charge : la pression verticale ( $p$ ) et le rayon ( $a$ ) de la surface sur laquelle elle agit. L'équation de base, et par suite toutes celles utilisées pour le calcul des contraintes et déplacements, montre que les résultats sont directement proportionnels à la valeur de la pression  $p$ , mais qu'il n'existe pas de relation directe avec le rayon  $a$  de la surface sur laquelle la charge verticale est appliquée, puisque ce rayon intervient dans le calcul de la fonction de Bessel à l'intérieur de l'intégrale. La relation de proportionnalité entre les résultats des calculs et la pression de contact ne fait qu'exprimer le principe de linéarité du comportement des matériaux.*

## **Déformations des couches bitumineuses**

### **Mesures de déformations sur des structures en vraie grandeur**

*Les réponses utilisées dans les méthodes mécaniques empiriques de dimensionnement proviennent de modélisations impliquant de nombreuses simplifications pour la description de la charge et de la structure. Il est nécessaire que ces calculs puissent être validés par des mesures effectuées sur des structures soumises à des charges réelles et ayant des dimensions réelles. De telles mesures peuvent être obtenues par la construction des structures dans des installations prévues spécialement à cet effet. Ces structures sont alors instrumentées de façon à obtenir des mesures de différentes grandeurs telles que déformations, déplacements, contraintes, etc. On parle alors généralement d'essais en vraie grandeur. Une autre méthode consiste à instrumenter, lors de leur réalisation ou de leur renforcement, des chaussées réellement en service.*

*Les mesures utilisées dans le cadre de ce travail proviennent principalement d'essais en vraie grandeur réalisés par le LAVOC dans la halle-fosse de l'EPFL. Les mesures des déformations dans les couches bitumineuses ont généralement été faites au bas des couches de base. Les mesures effectuées présentent l'avantage que la plupart des paramètres influençant les déformations des couches bitumineuses sont maîtrisés, permettant d'effectuer des comparaisons en faisant varier chacun de ces paramètres.*

*L'expérience ayant fourni les mesures de déformations qui ont été analysées pour la présente étude a été réalisée dans le cadre du mandat de recherche "Evaluation des performances de nouveaux matériaux de revêtement: enrobés à haut module" financé par l'OFROU<sup>7</sup>. Ce mandat avait pour but d'évaluer le comportement mécanique d'enrobés à module élevé par des essais en laboratoire et par la réalisation d'un essai en vraie grandeur,*

---

<sup>6</sup> C'est notamment le cas du logiciel Noah dans lequel la charge est définie à partir de trois paramètres : types de roues (y compris l'espace entre les pneus en cas de jumelage), l'intensité de la charge et la pression de contact

<sup>7</sup> Office Fédéral des Routes, Berne

ceci afin de préparer leur introduction dans les normes routières suisses. Les résultats détaillés de cette recherche, y compris la description complète des expériences en vraie grandeur, sont disponibles dans un rapport (Perret, Dumont et al. 2001).

La première partie de l'expérience consistait à effectuer des mesures de réponses pour différentes conditions de chargements et diverses températures.<sup>8</sup> Deux intensités de charge et trois pressions de gonflage ont été utilisées pour des pneus simples et des pneus jumelés. Les températures de référence étaient de -5°C, 5°C, 15°C et 30°C. Les mesures ont nécessité l'application d'environ 15'000 charges sur chacune des structures. Ce nombre limité de charge permet d'admettre que les structures n'ont pas été endommagées durant les mesures de réponse.

La seconde partie visait à évaluer la résistance des couches de base vis-à-vis de l'orniérage en appliquant un grand nombre de charges sur les sections dans des conditions de température particulièrement défavorables (50°C). Cette expérience a été menée pour un seul cas de charge et n'est pas analysée dans ce travail.

## Description des structures

Trois structures différentes ont été testées (Figure 4).

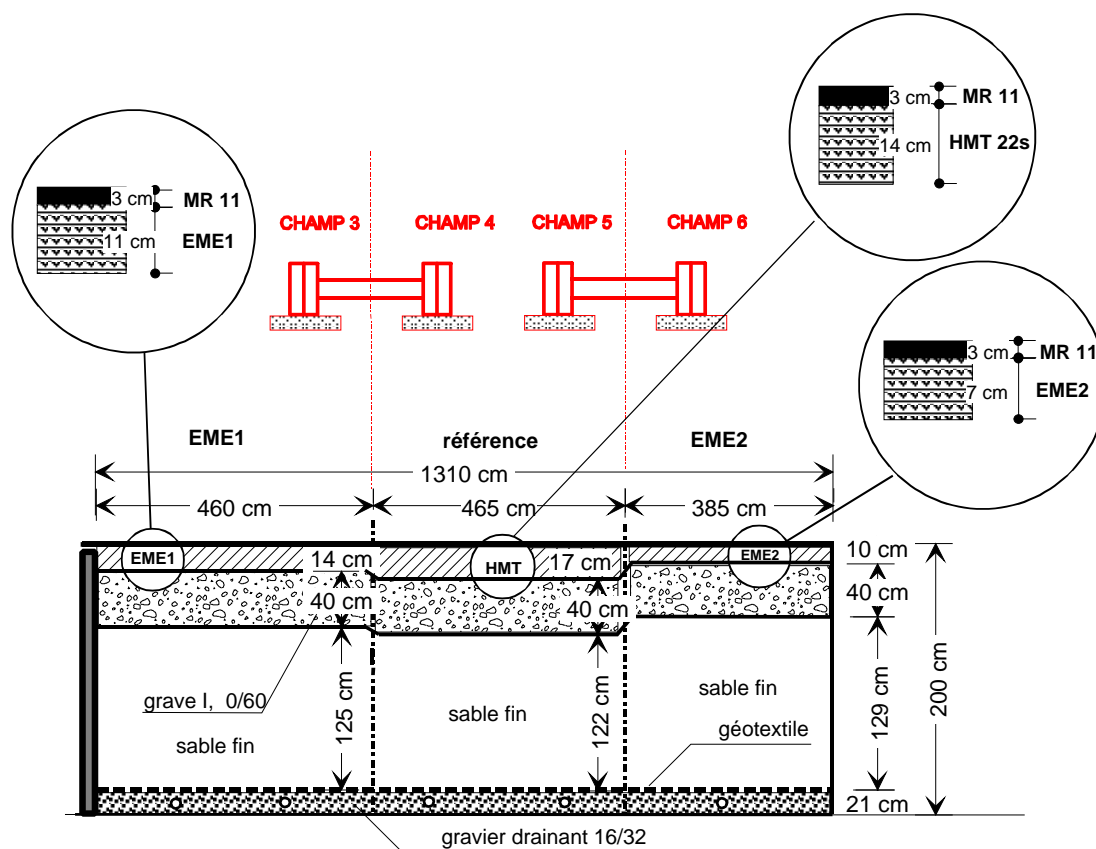


Figure 4 : Structures construites à la halle-fosse pour l'évaluation des enrobés à module élevé (Perret, Dumont et al. 2001)

- MR 11 = macro rugueux 11 selon (SN 640435), couche de roulement
- EME = enrobé à module élevé (type 1 ou 2), couche de base
- HMT 22s = enrobé à chaud pour couche de base selon (SN 640431), couche de base

<sup>8</sup> On entend par "réponses" les déformations instantanées mesurées au passage d'une charge

Grave I = grave de qualité I 0/60 mm selon (SN 670120), couche de fondation

Sable fin = sable 0/2 mm lavé, sol de fondation.

Ces structures ne se différencient que par les épaisseurs et le type de matériaux bitumineux de la couche de base. En revanche, elles ont toutes une même couche de roulement de 3 cm en MR11.

## Instrumentation et mesures

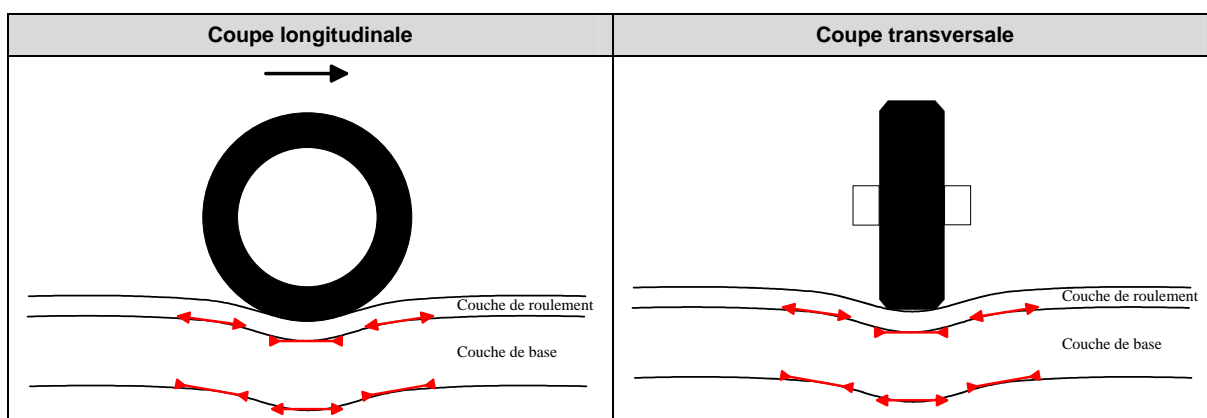
L'instrumentation des champs a notamment permis des mesures de déformations dans les couches bitumineuses au bas des couches de base (à des profondeurs absolues variables selon le champ) et à l'interface entre la couche de base et celle de roulement (à une profondeur constante de 3 cm quel que soit le champ). Des mesures ont été faites en faisant varier trois paramètres des charges de trafic, soit :

1. l'intensité de la charge (par axe) appliquée sur la chaussée :
2. la pression de gonflage des pneumatiques :
3. le type de roue :

La combinaison de ces paramètres aboutit à 12 cas de charge différents qui permettent d'étudier séparément les trois paramètres de chargement. Des déformations ont été analysées pour trois températures (5°C, 15°C et 30°C).

## Signaux de déformations expérimentaux dans les couches bitumineuses

Pour clairement définir les valeurs des déformations utilisées dans ce travail, des remarques préliminaires concernant la forme des signaux enregistrés lors du passage d'une charge sont nécessaires. Ces remarques concernent les signaux de déformations horizontales au bas de la couche de base et au bas de la couche de roulement. La forme de ces signaux se distingue selon la direction - longitudinale ou transversale - dans laquelle les mesures sont effectuées. Pour mieux comprendre l'allure générale des signaux, il est utile d'avoir une idée de la déformée des couches bitumineuses durant le passage d'une charge de trafic (Figure 5).



**Figure 5 : Déformées des couches bitumineuses lors du passage d'une roue**

Ces déformées (fortement exagérées) permettent d'anticiper l'allure générale des signaux de déformations longitudinaux et transversaux en fonction du déplacement de la charge. L'image de gauche montre que les matériaux subissent des déformations longitudinales alternant entre contraction et extension durant le passage de la charge. Cette alternance

existe quelles que soient la position latérale et la profondeur de mesure envisagée<sup>9</sup>. De plus, selon la profondeur, l'alternance se fera toujours dans le même ordre, soit :

- au bas de la couche de roulement : extension – contraction – extension
- au bas de la couche de base : contraction – extension – contraction.

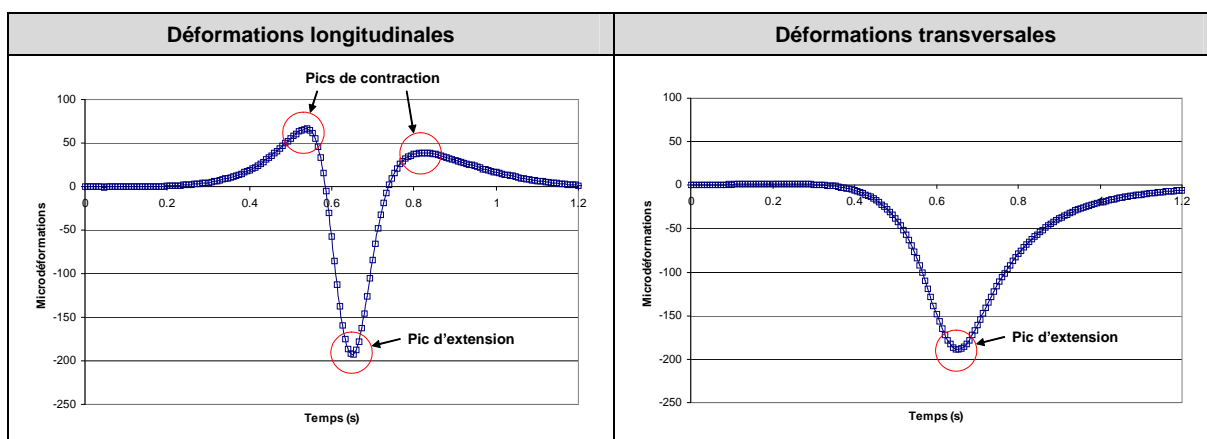
De son côté, l'image de droite montre qu'il n'y a pas d'alternance des déformations transversales durant le passage de la charge : les matériaux sont toujours soit en contraction, soit en extension. Ils sont en contraction ou en extension selon la position du point de mesure, tant latéralement (position par rapport au centre de la charge) que verticalement (profondeur dans les couches bitumineuses). En simplifiant, il est possible de résumer de la façon suivante :

- au bas de la couche de roulement : contraction dans la zone sous la charge et extension en dehors de cette zone
- au bas de la couche de base : extension dans la zone sous la charge et contraction en dehors de cette zone.

Au-delà de ces considérations générales, il est nécessaire de séparer les signaux de déformations en fonction de la profondeur. Les signaux retenus pour ce qui suit correspondent à des mesures effectuées au centre de la charge.

### Déformations horizontales au bas de la couche de base

La forme générale des signaux de déformations au bas des couches de base n'est pas influencée par la température. Les signaux présentés correspondent à une température de 30°C (Figure 6).



**Figure 6 : Exemples types de signaux de déformations au bas de la couche de base**

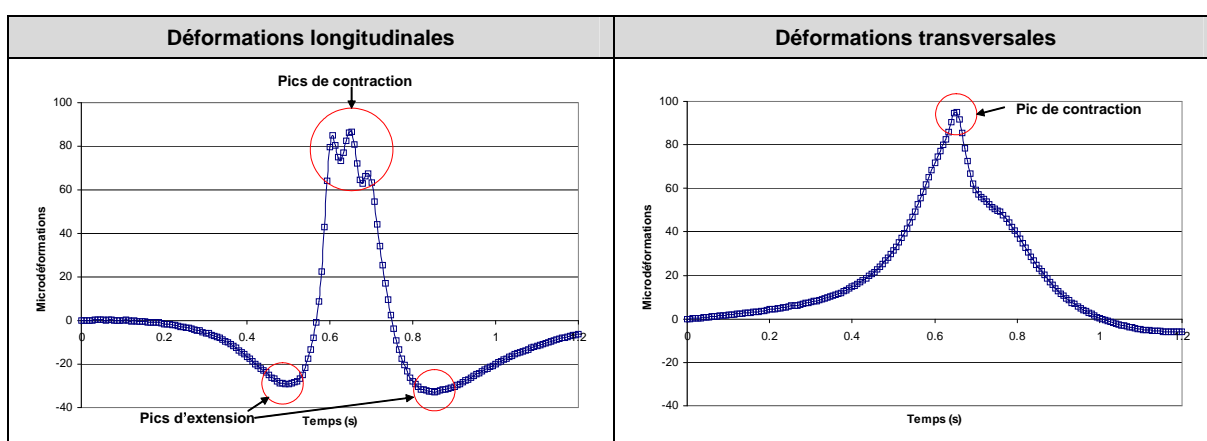
Comme prévu à partir des déformées de la Figure 5, les sollicitations longitudinales présentent une alternance des déformations pendant le passage de la charge, alternance qui se traduit sur les signaux par les pics de contraction visibles sur l'image de gauche. En revanche, les sollicitations transversales sont uniquement en extension. Par ailleurs, tous les signaux présentent une nette dissymétrie des courbes de part et d'autre des pics d'extension, dissymétrie qui s'explique par le comportement viscoélastique des enrobés

<sup>9</sup> Il est utile ici de proposer une analogie avec les déformations d'une poutre encastree soumise à une charge ponctuelle : la fibre inférieure est tendue au droit de la charge (alors que la fibre supérieure est contractée) et cette situation s'inverse au-delà des points d'inflexion situés de part et d'autre de la charge

bitumineux. De plus, pour les mesures longitudinales, le pic de contraction avant le passage de la charge est systématiquement plus important que celui après son passage.

### Déformations horizontales au bas de la couche de roulement

Pour les signaux au bas de la couche de roulement, par analogie avec ce qui a été observé jusque là, il semble logique que les signaux soient des images symétriques de celles obtenues au bas des couches bitumineuses. Si tel est le cas, les signaux longitudinaux doivent présenter des extensions avant et après le passage de la charge alors qu'une importante contraction doit être visualisée lors du passage de la charge. Pour les signaux transversaux, on peut s'attendre à une simple contraction. Toutefois, la visualisation des signaux au bas de la couche de roulement montre que ce n'est que partiellement le cas (Figure 7).

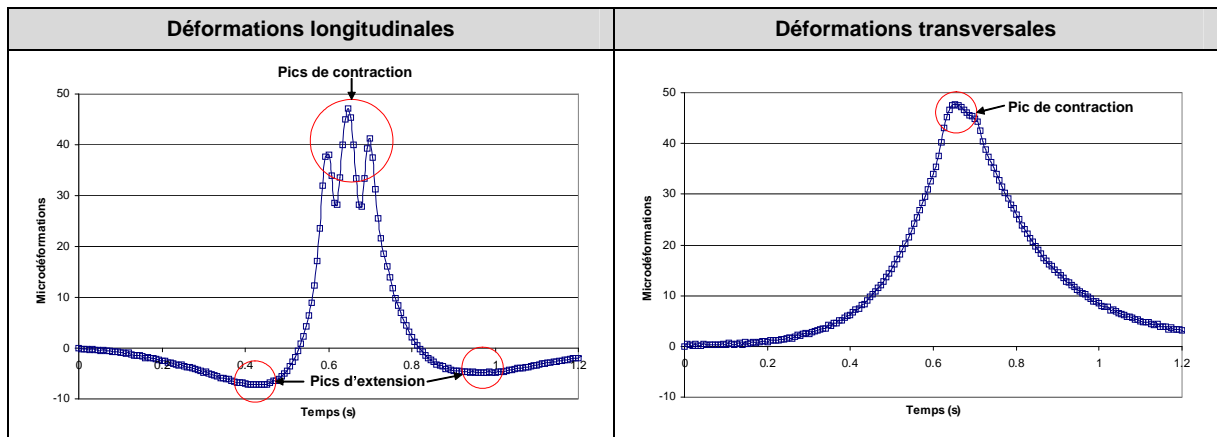


**Figure 7 : Exemples types de signaux de déformations au bas de la couche de roulement (30°C)**

Sur les signaux longitudinaux, les extensions escomptées avant et après le passage de la roue sont bel et bien présentes. En revanche, on observe que la zone de contraction ne présente pas un seul pic clairement défini, mais plutôt une zone avec des « irrégularités » qui semblent indiquer la présence de trois pics de contraction. Les signaux transversaux donnent en revanche une image relativement conforme à celle attendue, avec un seul pic clairement marqué. Toutefois, le signal semble également indiquer des « irrégularités » (variations de déformations étonnantes), surtout après ce pic.

Le comportement viscoélastique se traduit à nouveau par une dissymétrie des signaux, mais celle-ci est inverse à celle observée au bas des couches : l'extension mesurée avant le passage de la charge est inférieure à celle mesurée après. Si cette inversion de tendance concernant la visibilité du comportement viscoélastique est valable pour toutes les mesures à 30°C, elle n'est pas visible pour les deux autres températures, comme le montrent des signaux enregistrés à 5°C (Figure 8)<sup>10</sup>.

<sup>10</sup> Les signaux mesurés à 15°C sont similaires à ceux de 5°C



**Figure 8 : Exemples types de signaux de déformations au bas de la couche de roulement (5°C)**

*Ces figures confirment la présence des trois pics sur le signal longitudinal et des variations étonnantes des déformations transversales. En revanche, elles donnent une image moins surprenante des effets de la viscosité avec une extension supérieure avant le passage de la roue et une contraction résiduelle sur le signal transversal.*

### **Modélisation élastique linéaire des structures de la halle-fosse**

*Les modélisations sont effectuées à l'aide du logiciel multicouche NOAH (Eckmann 1997), basé sur le modèle de Burmister. Les analyses concernent essentiellement les amplitudes maximales des déformations longitudinales au bas des couches de base, amplitudes servant de critère de dimensionnement des chaussées souples.*

*La modélisation de la charge est faite conformément aux hypothèses du modèle de Burmister, soit à partir d'une surface circulaire chargée par une pression verticale uniforme. La charge est définie à partir de son intensité et de la pression de contact sur la surface de roulement alors que le rayon de la surface de contact est calculé à partir de ces deux valeurs. La pression est admise égale à celle des pneumatiques. Les pneus simples sont modélisés par une seule surface de contact alors que les jumelages cumulent l'effet de deux surfaces. Dans ce qui suit, cette modélisation de la charge est appelée **modélisation standard**.*

*La description de la géométrie des structures est donnée au paragraphe 0 alors que les propriétés élastiques retenues pour les matériaux – modules et coefficients de Poisson - sont spécifiées.. Les calculs sont effectués pour des températures de 5°C, 15°C et 30°C, cette variation étant prise en compte par une diminution de la valeur du module élastique avec la température.*

## **Déformations des couches bitumineuses**

### **Mesures de déformations sur des structures en vraie grandeur**

*Les réponses utilisées dans les méthodes mécaniques empiriques de dimensionnement proviennent de modélisations impliquant de nombreuses simplifications pour la description de la charge et de la structure. Il est nécessaire que ces calculs puissent être validés par des mesures effectuées sur des structures soumises à des charges réelles et ayant des dimensions réelles. De telles mesures peuvent être obtenues par la construction des structures dans des installations prévues spécialement à cet effet. Ces structures sont alors instrumentées de façon à obtenir des mesures de différentes grandeurs telles que déformations, déplacements, contraintes, etc. On parle alors généralement d'essais en vraie grandeur. Une autre méthode consiste à instrumenter, lors de leur réalisation ou de leur renforcement, des chaussées réellement en service.*

*Les mesures utilisées dans le cadre de ce travail proviennent principalement d'essais en vraie grandeur réalisés par le LAVOC dans la halle-fosse de l'EPFL. Les mesures des déformations dans les couches bitumineuses ont généralement été faites au bas des couches de base. Les mesures effectuées présentent l'avantage que la plupart des paramètres influençant les déformations des couches bitumineuses sont maîtrisés, permettant d'effectuer des comparaisons en faisant varier chacun de ces paramètres.*

*L'expérience ayant fourni les mesures de déformations qui ont été analysées pour la présente étude a été réalisée dans le cadre du mandat de recherche "Évaluation des performances de nouveaux matériaux de revêtement: enrobés à haut module" financé par l'OFROU<sup>11</sup>. Ce mandat avait pour but d'évaluer le comportement mécanique d'enrobés à module élevé par des essais en laboratoire et par la réalisation d'un essai en vraie grandeur, ceci afin de préparer leur introduction dans les normes routières suisses. Les résultats détaillés de cette recherche, y compris la description complète des expériences en vraie grandeur, sont disponibles dans un rapport (Perret, Dumont et al. 2001).*

*La première partie de l'expérience consistait à effectuer des mesures de réponses pour différentes conditions de chargements et diverses températures.<sup>12</sup> Deux intensités de charge et trois pressions de gonflage ont été utilisées pour des pneus simples et des pneus jumelés. Les températures de référence étaient de -5°C, 5°C, 15°C et 30°C. Les mesures ont nécessité l'application d'environ 15'000 charges sur chacune des structures. Ce nombre limité de charge permet d'admettre que les structures n'ont pas été endommagées durant les mesures de réponse.*

*La seconde partie visait à évaluer la résistance des couches de base vis-à-vis de l'orniérage en appliquant un grand nombre de charges sur les sections dans des conditions de température particulièrement défavorables (50°C). Cette expérience a été menée pour un seul cas de charge et n'est pas analysée dans ce travail.*

---

<sup>11</sup> Office Fédéral des Routes, Berne

<sup>12</sup> On entend par "réponses" les déformations instantanées mesurées au passage d'une charge

## Conclusions et recommandations

*Une des clés du comportement des chaussées routières souples est sans aucun doute la compréhension de la variation de l'état de contrainte et de déformation y régnant durant le passage d'une charge de trafic. La détermination de ces sollicitations peut se réaliser selon deux méthodes à utiliser de façon complémentaire : des mesures expérimentales et des modélisations. Même si les progrès enregistrés dans le développement des outils informatiques et dans la connaissance des lois de comportement des matériaux laissent entrevoir des possibilités importantes pour des démarches théoriques, les données expérimentales doivent cependant continuer à jouer un indispensable rôle de validation pour ces approches.*

*L'analyse comparative des résultats des mesures et de ceux tirés de modélisations, réalisées conformément aux recommandations d'une méthode mécanique empirique de dimensionnement, a permis de déterminer les influences relatives de trois des principaux paramètres définissant les charges de trafic et de la température. Il a été montré que les modélisations permettent une évaluation satisfaisante de l'effet de la plupart de ces paramètres. Des propositions pour la prise en compte de ces paramètres dans la détermination du trafic équivalent ont pu être émises. Elles se basent tant sur les résultats expérimentaux que théoriques.*

*Par ailleurs, cette analyse comparative a montré que l'adéquation entre les valeurs mesurées et modélisées à partir d'un modèle simple – comportement élastique linéaire selon les recommandations de la méthode française de dimensionnement des chaussées souples – est très bonne pour des températures jusqu'à 15°C. Les résultats sont moins concluants à 30°C, notamment en raison du comportement visqueux des matériaux bitumineux.*

*Il ressort des analyses des effets des conditions de charge que les pressions de gonflage des pneus ne sont pas déterminantes pour les calculs des déformations horizontales dans les couches bitumineuses des chaussées souples relativement épaisses. Ceci s'explique en grande partie par un comportement global de ces couches qui peut être assimilé à celui des dalles. Cette faible importance relative de la pression est essentiellement valable pour des couches bitumineuses relativement épaisses, la pression ayant certainement un rôle plus marqué pour des structures minces.*

*Cette similitude de comportement avec les dalles se traduit notamment par une situation à priori paradoxale concernant les contraintes agissant à faible profondeur, à savoir que les composantes horizontales y sont parfois sensiblement supérieures aux verticales. Les premières dépendent essentiellement de l'intensité de la charge et de la rigidité de la structure alors que les secondes ne dépendent que de la pression de contact entre les pneus et la chaussée. Cet état particulier de contrainte a été mis en évidence par l'explication d'« irrégularités » observées sur des signaux de déformations horizontales mesurés à faible profondeur, ce qui souligne une nouvelle fois l'utilité des données expérimentales. Ces « irrégularités » apparaissent aux extrémités de la charge, soit à l'endroit où les contraintes verticales subissent une brusque et importante variation. Cette position est révélatrice de la zone dans laquelle les efforts de recherche doivent être menés, c'est-à-dire au bord de la zone de charge et à faible profondeur. Les importants efforts de cisaillement agissant à cet endroit ont déjà été soulignés par de nombreux chercheurs et ont une origine similaire à celle du poinçonnement des dalles.*

*La mise en évidence, par la mesure et le calcul, de sollicitations importantes à faible profondeur explique certainement la dégradation par fissuration de surface des couches bitumineuses constatée sur bon nombre de chaussées. La détermination classique de la déformation au bas du revêtement doit désormais se compléter par une estimation de l'état de sollicitation à faible profondeur. Il est recommandé de retenir des matériaux particulièrement performants en fatigue et déformation permanente à des profondeurs de 3 à 7 cm.*

*Finalement les méthodes de dimensionnement empiriques des chaussées (méthode VSS) devront progressivement être remplacées par des méthodes faisant appel à une approche analytique (méthode mécanique empirique). Il sera alors possible d'intégrer les caractéristiques détaillées des charges et d'en déduire l'état de sollicitation à faible profondeur et sous le bord du pneu.*

*Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude devraient faire l'objet de recherches complémentaires dans diverses directions. Premièrement, les efforts concernant la précision des mesures expérimentales doivent être poursuivis et les types de mesures être diversifiés. Il est souhaitable de pouvoir disposer de plus de mesures de l'état de sollicitation à proximité des charges. Deuxièmement, un lien devrait être trouvé entre les résultats par les mesures in situ et les paramètres des essais en laboratoire. Enfin, il serait intéressant d'introduire des variations statistiques des nombreux paramètres intervenant dans la modélisation des chaussées, notamment en ce qui concerne l'épaisseur réelle des couches et la répartition de la température dans ces couches.*

## 3.2 FP 3-2 Formulation et optimisation des formules

### ZUSAMMENFASSUNG

*Die Mischgutzusammensetzung wirkt sich in starkem Mass auf die Beständigkeit und die Eigenschaften der Beläge aus. Noch immer wird die Zusammensetzung der bituminösen Mischgute mit Hilfe eines empirischen Ansatzes optimiert, welcher auf den herkömmlichen Laborversuchen beruht und häufig nur wenig mit der wirklichen Eignung der Baustoffe zu tun hat.*

*Das Hauptziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist die Entwicklung eines neuen Ansatzes für die Mischgutzusammensetzung, welcher sich an Leistungstests orientiert und bituminöse Baustoffe mit verbesserter Leistungsfähigkeit und Stabilität liefern soll.*

*Die neue Optimierungsmethode basiert auf einem volumetrischen Ansatz, sowie auf analytischen Modellen, welche die Eignung von bituminösen Schichten unter gewissen vorliegenden Umständen voraussagen können. Tatsächlich ist es möglich, die Eignungsprüfung, deren Optimierung, sowie die Auswertung der Langzeit - Leistungsfähigkeit der Beläge mit Hilfe der Kombination einer berechneten Prognose und zusätzlichen Laborversuchen durchzuführen.*

*Die sorgfältige Auswahl der in der Schweiz verbreitetsten eignungsorientierten Prüfungen erlaubt es zudem, wichtige Informationen über die Eignung und die Dauerhaftigkeit verschiedener Mischgute zu erhalten. Zur Zeit ist eine Studie im Gang, welche die Auswahl dieser Versuche anhand einiger Versuchsstrecken bestätigen soll.*

### Problématique

*Le besoin d'améliorer ou d'optimiser la durabilité des chaussées routières, tant lors de la conception des chaussées neuves que lors de la maintenance des chaussées routières, est un souci majeur des gestionnaires de réseaux routiers. Dans cette optique, l'évaluation des performances des enrobés bitumineux, à long terme, au travers d'essais de laboratoire pertinents s'avère indispensable.*

*Les nouvelles configurations de charges des poids lourds ont modifié de manière significative les sollicitations des revêtements routiers, entraînant l'apparition de dégradations prématurées sur des chaussées qui se comportaient normalement jusqu'alors, et dont les matériaux répondaient aux spécifications en vigueur. En particulier, les chaussées endurent le remplacement progressif des roues jumelées des poids lourds par des pneumatiques super-larges (de 300 à 500 mm de largeur), ainsi que des pressions de gonflage généralement plus élevées. Ces constatations ont mis en évidence le fait que certains essais actuellement utilisés ne sont pas ou plus adaptés pour évaluer la performance des enrobés et méritent d'être remplacés. En Suisse, les valeurs indicatives en vigueur<sup>13</sup>, basées sur des performances empiriques données par l'essai Marshall, ne sont nullement prédictives de l'évolution de comportement des enrobés en place. Les composants et les enrobés doivent donc être caractérisés par des essais de laboratoire qui permettront d'évaluer les performances à long terme des enrobés bitumineux en vue d'optimiser leur durée de vie. La formulation des mélanges est, à ce titre, déterminante pour l'obtention d'enrobés bitumineux performants.*

---

<sup>13</sup> SN 640 431b: Revêtements en béton bitumineux – conception, exigences, exécution, octobre 1997

## Objectifs

*Afin de satisfaire aux critères de durabilité des revêtements routiers, il conviendra de sélectionner une gamme d'essais qui permettront d'évaluer de façon satisfaisante la performance des mélanges bitumineux constituant le revêtement des chaussées. L'objectif de la partie 2 du PR3 est d'évaluer et de sélectionner des essais existants, en Suisse et de par le monde, qui ont un caractère dit "de performance" ; c'est-à-dire qui permettront de prédire le comportement du matériau sur le long terme. Dans un premier temps, la sélection est faite sur la base d'études menées tant en Suisse qu'à l'étranger. L'évaluation du caractère prédictif des essais retenus est faite en comparant les résultats obtenus au comportement mesuré sur des planches d'essais soumises à des essais de charge accélérés au Rundlauf. De ces résultats, des recommandations sont tirées quant à l'emploi des essais dans les études de formulation. A noter que le but de ce projet de recherche n'est pas de développer un nouvel essai de performance qui demanderait une phase de mise au point et de validation extrêmement longue et coûteuse mais de se diriger vers des essais existants en Suisse ou à l'étranger, ayant déjà une longue période d'application et dont le matériel d'essai nécessaire est facilement disponible et si possible relativement bon marché.*

## Programme

### **Déroulement**

- Inventaire des essais et collecte des documents relatifs à l'aspect prédictif
- Evaluation et sélection des essais selon des critères définis
- Développement d'une méthodologie de formulation
- Réalisation des essais retenus sur les enrobés qui seront mis en œuvre dans les planches d'essais
- *Evaluation des résultats d'essais en fonction du comportement des planches d'essais testées au Rundlauf*
- *Recommandations finales*

*Le suivi du comportement à long terme des structures soumises à des sollicitations accélérées au Rundlauf à Dübendorf et au trafic autoroutier sur les planches d'essais à Pratteln permettra de vérifier la qualité de prédiction des essais, de sélectionner les essais en adéquation avec le comportement des enrobés à long terme et définir les procédures de formulation pour optimiser leur performance.*

## Les sollicitations des chaussées

### Introduction

*Les chaussées routières sont en permanence soumises à des sollicitations mécaniques et thermiques combinées avec des phénomènes chimiques qui vont participer, plus ou moins rapidement selon leurs niveaux de sollicitation, à la dégradation du revêtement [39]. Ces éléments, responsables des dégradations, ont pour origine:*

- *les sollicitations du trafic : principalement les effets dynamiques dus aux passages répétés des poids lourds, les effets statiques lors du ralentissement du trafic et les frottements de surface pneu-chaussée,*
- *les sollicitations climatiques: entraînant des variations de température au sein des enrobés bitumineux. Ces variations sont soit de courte durée (journalières) ou soit de longue durée (saisonniers),*
- *les phénomènes chimiques: dus à l'oxydation naturelle des liants hydrocarbonés, à l'action des sels de déverglaçage provenant des entretiens hivernaux, et aux dégradations de surface de la chaussée par le rayonnement solaire.*

*Ces actions diverses, agissant simultanément sur le revêtement bitumineux conduisent aux dégradations couramment observées [37] [42], notamment:*

- *les fissurations de surface sous la forme de fissures isolées ou, dans les cas les plus graves, sous la forme de faïençage généralisé,*
- *les déformations permanentes (ou orniérage) suite à l'accumulation de déformations irréversibles,*
- *les dégradations de surface sous la forme de polissage des granulats, les désenrobages et perte de gravillons, les pelades et les nids de poule.*

### Sollicitations mécaniques

*En première approximation, chaque couche de chaussée est assimilée à une poutre qui subit des flexions sous l'effet du trafic. Le calcul des efforts et déformations qui apparaissent nécessite, en premier lieu, la connaissance du module complexe et éventuellement du coefficient de Poisson. Soulignons qu'en raison des propriétés particulières apportées par le bitume (viscoélastique), les enrobés bitumineux ont un comportement (donc un module) fortement dépendant de la température et de la vitesse de chargement.*

*Les tractions répétées à la base des couches sous l'effet du passage des véhicules créent des « micro » dégradations qui s'accumulent et peuvent entraîner la ruine du matériau. Ce phénomène est la fatigue qui s'observe pour de nombreux matériaux.*

*Les chaussées sont, en général, dimensionnées pour que la ruine ne se produise pas avant  $10^6$  cycles ou pour le nombre de cycles de chargement équivalents créés par le trafic sur une période comprise entre 15 et 20 ans. Les effets du trafic ont été abondamment étudiés de par le monde et les publications y relatives sont abondantes.*

*Les compressions répétées sous le passage des véhicules peuvent induire des déformations permanentes qui, si elles sont trop importantes, se traduisent par un orniérage à la surface de la chaussée.*

## **Sollicitations thermiques**

*Mis à part l'accélération du vieillissement du matériau et les pertes de portance des chaussées en période de dégel dues à la présence de sols gélifs dans les couches d'infrastructure, les variations de la température ont deux effets mécaniques principaux :*

- *variation du module de l'enrobé bitumineux (facteur jusqu'à 100x),*
- *création de contraintes et déformations au sein du matériau en raison des dilatations-contractions thermiques lors des changements de température (couplage thermomécanique).*

## **Inventaire des essais**

### **Introduction**

*Introduisons une terminologie des essais selon Bonnot [9] qui propose de scinder les essais mécaniques en trois catégories. Cette distinction est plus liée à l'interprétation de l'essai qu'à sa nature, ainsi :*

- *La première catégorie est celle "des essais empiriques" dans lesquels le mode de sollicitation est très différent de celui existant in situ, et qui ne permettent pas de déterminer une propriété intrinsèque du matériau. Seule l'expérience du praticien et des comparaisons pour de nombreux cas permettent de tirer une conclusion toute relative sur le comportement en place de l'enrobé bitumineux.*
- *La deuxième catégorie est celle "des essais de simulation" dans lesquels on soumet le matériau à des sollicitations les plus proches possibles, bien qu'à l'échelle réduite, de celles qui existent dans l'ouvrage considéré, pour une propriété d'usage donnée. La simulation de la propriété d'usage de l'ouvrage (orniérage, fissuration à basse température...) par un modèle expérimental ne permet pas une simulation précise des sollicitations, notamment du fait des conditions aux limites et des phénomènes des lois d'échelle (passage du modèle à l'ouvrage).*

- *La troisième catégorie est dénommée "essais de détermination" dans lesquels on soumet le matériau à des sollicitations simples, parfaitement définies, qui permettent d'isoler les propriétés intrinsèques des matériaux, c'est-à-dire indépendantes des conditions d'essais. Ainsi les résultats de ces essais permettent de passer, grâce à une modélisation de la structure de l'ouvrage et l'utilisation des lois de comportement de l'enrobé, à la propriété d'usage désirée.*

*Une autre terminologie est proposée par Di Benedetto selon l'état de contrainte et de déformation [16]. Il considère deux grandes catégories : les essais non homogènes et les essais homogènes :*

- *les essais non homogènes, correspondent à des essais de structure dont l'interprétation est empirique et dont les caractéristiques de l'ouvrage sont déterminées par l'utilisation de loi de similitude (modèle réduit),*
- *les essais homogènes donnent, sans hypothèse complémentaire, accès à la loi de comportement du matériau, l'état de contrainte et de déformation est le même en chaque point de l'éprouvette testée.*

### **Performances recherchées**

*Il est raisonnablement admis, par les professionnels de la route et en particulier par le "European Standards Working Group CEN" [22], que les propriétés recherchées afin de caractériser les performances des chaussées à long terme sont :*

- *Le module*
- *La résistance à la fatigue mécanique*
- *La résistance aux déformations permanentes*
- *La résistance aux sollicitations thermiques*
- *La résistance aux fissurations de retrait hydraulique*

*D'autres performances non mécaniques doivent être considérées afin de caractériser les performances des chaussées, ce sont :*

- *L'adhérence*
- *La résistance à l'arrachement*
- *Le vieillissement*
- *La susceptibilité hydraulique*

*A l'exception de la susceptibilité hydraulique, ces dernières propriétés non mécaniques ne sont pas traitées dans le cadre de cette recherche, de même que la résistance aux fissurations de retrait hydraulique qui ne concerne que les chaussées rigides ou semi-rigides.*

## **Critères de sélection**

*Le but principal de la sélection des essais de performance est de proposer aux praticiens et aux ingénieurs de la route en Suisse, une gamme d'essais qui permettront d'évaluer de manière adéquate la performance des enrobés constituant le revêtement des nouvelles chaussées routières. A cet effet, les essais retenus doivent satisfaire à des critères de sélection qui sont en adéquation avec les attentes des gestionnaires routiers. Ces critères sont notamment :*

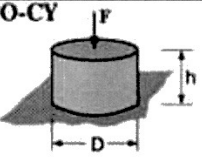
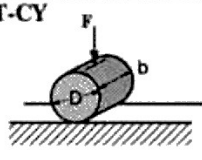
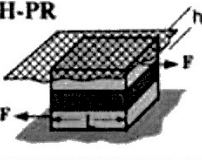
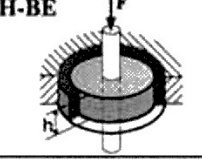
- [1] Le caractère prévisionnel des essais au regard d'une durabilité optimum des chaussées*
- [2] La pertinence des essais aux regards des modes de sollicitation*
- [3] La fiabilité des essais du point de vue de la reproductibilité*
- [4] La réalisation des essais selon des procédures normalisées et en particulier selon les nouvelles normes européennes CEN*
- [5] L'interprétation des résultats de l'essai, c'est-à-dire les caractéristiques mesurées fournissent-elles une propriété intrinsèque de*
- [6] l'enrobé ayant un caractère de performance ou une propriété empirique dont l'interprétation dépend fortement de l'expérience des praticiens*
- [7] La diffusion dans les laboratoires des centres de recherche nationaux et privés en Suisse, notamment sur le plan de l'accessibilité de l'équipement (disponibilité, coûts) et de l'exploitation des résultats.*

*Le point 5 propose de sélectionner les essais selon les caractéristiques mesurées par les essais. A titre d'exemple, l'essai Marshall fournit des valeurs limites dont l'interprétation est empirique et ne permet que d'effectuer une comparaison entre différents produits. Les valeurs limites Marshall standardisées ont été fixées selon l'expérience des praticiens.*

## **Essais de caractérisation du module et de la fatigue**

### **Recensement des essais**

*Dans le cadre d'un projet inter-laboratoire lancé à partir de 1990 par le comité RILEM 101 BAT, des essais dynamiques, caractérisant le module et la fatigue d'un enrobé dense, ont été comparés et analysés. Deux propriétés ont été examinées, ce sont le module complexe et la loi de fatigue. Partl et Francken ont présenté, au symposium RILEM à Lyon de 1997 [25], les recommandations en matière d'essais de module. Di Benedetto, De la Roche et Francken [18] ont présentés, au même symposium, les recommandations sur les essais de fatigue. Le tableau suivant, issu du programme RILEM, énumère les essais qui ont été réalisés par les 15 laboratoires participants:*

Essais homogènes	Test	Type of loading	Shape of specimen
	<b>CO-CY</b> 	Tension Compression	Cylindric
	<b>IT-CY</b> 	Indirect tensile Diametric Compression	Cylindric
	<b>SH-PR</b> 	Shear on square Sandwich	Prismatic
	<b>SH-BE</b> 	Shear-bending Load applied by an axial rod	Anular with central rod

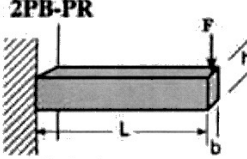
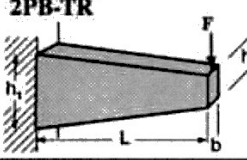
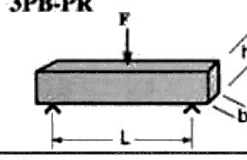
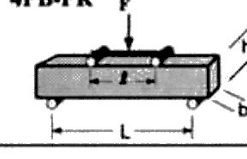
Essais non homogènes	Test	Type of loading	Shape of specimen
	<b>2PB-PR</b> 	2 Point bending	Prismatic beam
	<b>2PB-TR</b> 	2 Point bending	Trapezoidal beam
	<b>3PB-PR</b> 	3 Point bending	Prismatic beam
	<b>4PB-PR</b> 	4 Point bending	Prismatic beam

Figure 9: Essais de module et de fatigue recensés [25]

Parmi les essais recensés à la Figure 9, tous les essais de flexion sont des essais non homogènes selon la définition donnée au point 0, les autres essais étant des essais homogènes. Ces essais permettent de mesurer le module complexe des enrobés et la fatigue sous sollicitations cycliques pour la plupart d'entre eux.

Chacun des principaux essais fait l'objet par la RILEM d'un descriptif repris dans l'annexe.

## Conclusions

*Par élimination, le choix de l'essai de module et de fatigue se dirige sur l'essai de flexion en 2 points sur des éprouvettes trapézoïdales, de plus notons que cet essai est :*

- couramment appliqué en Suisse au LAVOC depuis 20 ans et bénéficie d'un background, au niveau européen, conséquent.*
- commercialisé par le LCPC en France et a fait l'objet de nombreuses applications tant au niveau de la recherche fondamentale que des applications dans le dimensionnement des chaussées par les entreprises privées*
- utilisé dans le cadre de la méthode de dimensionnement des chaussées en France [43] et en Belgique qui permet de déterminer des durées de vies de l'enrobé en se basant sur les résultats obtenus par l'essai. Cette approche permet d'utiliser les résultats d'essai en laboratoire pour estimer la durée de vie d'une chaussée.*

## ***Essais de caractérisation des déformations permanentes***

### ***Recensement des essais***

Le tableau suivant propose une synthèse des essais de caractérisation des déformations permanentes recensés de part le monde :

<b>Essai</b>	<b>Centre de recherche / Pays</b>
Ornièreur LPC	LAVOC, EMPA, VIAGROUP, ERTEC CH, LCPC F
Essai de fluage dynamique	IMP Bautest, EMPA CH
Wheel-Tracking Test (WTT)	British Standards Institution, UK
Repeated Load Axial Test (RLAT)	University of Nottingham, UK Infrastructure Division, Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, UK
Vacuum Repeated Load Axial Test (VRLAT)	University of Nottingham, UK Infrastructure Division, Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, UK
Dynamic Triaxial Compression Creep Test	Delft University of Technology, NL

**Tableau 1: Recensement des essais de caractérisation des déformations permanentes**

*Sur la base des essais recensés et des publications traitant de la problématique des déformations permanentes des enrobés bitumineux, citons les points suivants :*

- *De nombreux auteurs ont étudiés la caractérisation des déformations permanentes par des essais de fluage dynamique confiné et non confiné. En particulier, des investigations réalisées en 1990 par Valkering et en 1995 par Molenaar ont mis en évidence, d'une part, l'intérêt accru d'un essai de fluage dynamique par rapport à un essai de fluage statique en particulier pour des enrobés constitués de liants modifiés aux polymères [47], et d'autre part, qu'un confinement radial de l'éprouvette lors d'un essai de fluage dynamique était nécessaire afin de permettre une comparaison pertinente entre différents types d'enrobés bitumineux de granulométries différentes [34]. Toutefois, Molenaar précise qu'un tel essai triaxial de fluage dynamique ne permettait pas d'obtenir une caractéristique intrinsèque de l'enrobé ; la réponse de l'essai est dépendante des dimensions de l'éprouvette et de la forme de la sollicitation.*
- *Il apparaît que les essais à disposition ne permettent pas d'obtenir une caractéristique intrinsèque du comportement de l'enrobé face aux déformations permanentes, les résultats obtenus dépendent du type d'appareillage et de la procédure de l'essai.*

### **Références sur l'approche performancielle in situ**

*Une étude prospective a été menée dans l'état du Colorado par le département des transports de l'état du Colorado et le centre de recherche routière Turner Fairbanks avec l'orniériste LCPC [4]. Il s'agissait pour l'essentiel de vérifier les capacités de prédiction du matériel en procédant à des essais sur des enrobés dont le comportement sur le terrain était connu. Des échantillons de chaussée ont été identifiés et soumis à l'orniériste LPC. L'originalité de l'étude a consisté à tester les enrobés à différentes températures. Les résultats ont montré qu'il y avait corrélation entre les résultats de l'essai et l'orniériste mesurée en place lorsque l'on prenait en compte le volume du trafic et la température du site.*

*En Suisse, un mandat de recherche en cours de réalisation a pour objectif de permettre la prédiction en laboratoire de l'évolution de l'orniériste d'un enrobé bitumineux en place compte tenu des sollicitations générées par le trafic et des conditions climatiques qui sont propres à la Suisse. Ce mandat est actuellement en cours au LAVOC [32].*

### Analyse multicritère des essais de caractérisation des déformations permanentes

Essai	Critères de sélection					
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
Ornièreur LPC	+	+	++	++	-	++
Essai de fluage dynamique	0	-	0	++	-	++
Wheel-Tracking Test (WTT)	0	+	0	++	-	--
Repeated Load Axial Test (RLAT)	0	-	0	++	-	--
Vacuum Repeated Load Axial Test (VRLAT)	0	+	0	--	+	--

**Tableau 2: Comparatif multicritère des essais de caractérisation des déformations permanentes**

### Conclusions

Le choix d'un essai de mesure des déformations permanentes se dirige vers l'essai d'orniérage LPC, notamment par l'analyse des points suivants :

- il est couramment appliqué en Suisse au LAVOC depuis 20 ans et bénéficie d'un background conséquent, de plus L'EMPA, ERTEC, IMP-Bautest ainsi que VIAGROUP SA sont de même équipés de l'orniérage LPC,
- En France, il est commercialisé par le LCPC et a fait l'objet de nombreuses applications tant au niveau de la recherche fondamentale que des applications dans le dimensionnement des chaussées par les entreprises privées,
- L'essai fournit un indicateur fiable sur la performance des chaussées vis-à-vis des déformations permanentes. Cet indicateur est utilisé depuis de nombreuses années dans l'évaluation des performances sur les déformations permanentes en France.

## Essais de caractérisation du comportement aux basses températures

Les chapitres suivants sont repris du travail de thèse réalisé au LAVOC par Pucci [39].

### *Recensement des essais*

Dans le cadre du programme américain SHRP, Vinson [48] a recensé les essais de caractérisation du comportement à basse température des enrobés bitumineux. Le

Tableau 3 présente cette synthèse :

Type d'essai	Caractéristiques mesurées	Référence
Traction directe	Contrainte et déformation - contrainte de rupture, module de rigidité	[1] [7] [31] [48]
Compression diamétrale (traction indirecte)	Contrainte et déformation - contrainte de rupture, module de rigidité	[48] [54]
Essai de fluage et de relaxation	Contrainte et déformation –module de rigidité	
Essai de flexion répétée en 3 points	Contrainte et déformation – contrainte de rupture, module de rigidité	
Essai de retrait thermique empêché (TSRST)	Contrainte induite thermiquement, contrainte et température de rupture	[1][3][30][35][48] à [52] et [54]
Détermination des coefficients de dilatation et contraction thermique	Coefficients de dilatation/contraction	[27][36][48]
Essai de détection acoustique	Détection acoustique des microfissurations	[52]

**Tableau 3: Synthèse des essais de caractérisation du comportement des enrobés bitumineux à basse température**

Notons que ces essais sont réalisés à des températures inférieures à 0°C

## Bilan international

### Europe

*Sous l'égide du projet européen de recherche COST 333 dont le thème principal est : "Développement d'une nouvelle méthode de dimensionnement des enrobés bitumineux", une sous-commission WG4 a été mise sur pied dans le but de recenser les facteurs intervenant dans les méthodes de dimensionnement vis-à-vis des conditions climatiques [46]. Dix-huit pays, dont la Suisse, ont pris part à ce programme de recherche. Un large éventail de climats européens y est représenté, notamment les climats des pays méditerranéens, pays scandinaves et pays d'Europe centrale. Au travers ce recensement, il apparaît que la problématique de la fissuration par sollicitation thermique à basse température n'est traitée uniquement que par la Suède et la Finlande. En Suède, la "Division of Highway Engineering" de l'Université "Royal Institute of Technology" de Stockholm participe activement aux recherches sur le comportement des enrobés bitumineux à basse température par le biais d'un essai de retrait thermique empêché sur enrobé.*

*En Allemagne, à la fin des années septante, la fréquence élevée de la fissuration de surface des routes a motivé le développement d'un essai de laboratoire simulant le comportement à basse température des enrobés. Le professeur Arand, de l'université technique de Braunschweig, est le précurseur des études menées dans ce sens [2][3]. Il a axé ces travaux sur un essai permettant d'effectuer du retrait thermique empêché, de la traction directe et des essais de relaxation sur des enrobés.*

### Etats-Unis

*Initié aux débuts des années nonante, le programme américain SHRP (Strategic Highway Research Program) avait comme objectif, au niveau des chaussées routières, de relier des caractéristiques rhéologiques des enrobés bitumineux au comportement observé in situ. Ce programme a abouti aux spécifications SUPERPAVE applicables aux bitumes et aux enrobés bitumineux. Ces spécifications ont pour objectif de limiter les risques de déformation permanente des chaussées, les risques de fissuration par sollicitations mécaniques répétées et les risques de fissuration par sollicitations thermiques à basse température [28]. Pour ces dernières, les recommandations se basent uniquement sur des caractéristiques rhéologiques du bitume ; celles-ci sont liées aux caractéristiques mesurées à l'aide du Bending Beam Rheometer (BBR) et si nécessaire, par un essai de traction directe sur bitume. L'essai de retrait thermique empêché, issu du programme SHRP, sur enrobés a été utilisé comme outils de validation du BBR; l'essai, qui se nomme TSRST, est considéré par Vinson et al. [48] comme l'essai accéléré simulant le mieux les conditions de sollicitations thermiques des couches d'enrobés bitumineux en place dans les chaussées routières.*

## **Références sur l'approche performancielle in situ**

*L'essai TSRST a été validé in situ par l'analyse de cinq sections routières en Alaska, en Pennsylvanie, et en Finlande [49]. Les résultats du TSRST ont été comparés à des indices de fissuration caractérisés par la fréquence des fissures transversales. L'ensemble des sections testées présente des températures en surface de l'ordre de  $-20^{\circ}\text{C}$  à  $-25^{\circ}\text{C}$ . Il apparaît que les résultats des essais TSRST, réalisés sur des éprouvettes de laboratoire ainsi que sur des éprouvettes carottées in situ, ont une bonne correspondance avec les indices de fissuration. Toutefois notons que cette validation, basée sur un faible échantillon de population, ne peut fournir une référence satisfaisante au regard de nos conditions climatiques tempérées.*

*En Suisse, une campagne d'essais TSRST a été menée sur des éprouvettes d'enrobé prélevées in situ sur 16 sections d'essais le long de la N9 dans le canton du Valais [39]. Ces 16 sections, dites "les planches comparatives du Valais", diffèrent uniquement par le choix du bitume de formulation de la couche de roulement. Les planches comparatives présentent une palette de bitumes représentative de la tendance du marché de ces dix dernières années, soit des bitumes classiques, des bitumes modifiés et des bitumes composés d'ajouts pulvérulents. Le type de la superstructure, la conformité des matériaux aux exigences fixées dans les normes y relatives et l'exécution de la chaussée dans les exigences requises, ne permettent pas d'introduire un doute sur une fatigue mécanique prématurée de la couche de roulement. Le suivi des planches comparatives pose de nombreuses questions sur la durée de vie des chaussées routières soumises aux sollicitations thermiques contrastées ; en effet, le Valais possède un climat subissant des variations journalières et saisonnières importantes de température. L'analyse des résultats de laboratoire des matériaux prélevés dans la couche de roulement a distingué une caractéristique de l'essai TSRST qui est en adéquation avec l'état de la fissuration de surface relevé après 10 ans de mise en service.*

## **Conclusions**

*L'expérience acquise dans le domaine de la rupture des enrobés bitumineux aux basses températures au travers l'essai de retrait thermique empêché est des plus prometteuses et mérite d'être retenu dans le cadre de ce projet de recherche. Cet essai de simulation sur enrobé est le plus répandu dans les laboratoires routiers de par le monde, et a fait l'objet de validation in situ aux Etats-Unis, dans le nord de l'Europe et particulièrement en Suisse.*

*Néanmoins cet essai n'est pas encore très répandu dans les laboratoires suisses et vu sa complexité il reste un outil de recherche important. La caractérisation du comportement aux basses températures est surtout important pour les enrobés à module élevé (EME) et les matériaux bitumineux recyclés. Pour ces différentes raisons l'essai de retrait thermique empêché n'a pas été considéré pour établir la méthode de formulation mais est recommandé en tant qu'essai de performance.*

## Synthèse des essais

### Essais retenus sur enrobés

Sur la base de l'inventaire et de l'analyse multicritère déjà mentionnée, une synthèse sur les essais est établie.

Performance souhaitée	Essais sur enrobés			
	LAVOC : Durabilité des enrobés (PR3)		EMPA : Durabilité des composants (PR2)	
	Essais	Détails	Essais	Détails
Module	Flexion 2 points sur éprouvettes trapézoïdales	module 15°C; 10Hz [MPa]	koaxialer Schubtest	différentes temp. et fréq.
Résistance à la fatigue	Flexion 2 points sur éprouvettes trapézoïdales	courbe de fatigue à 10°C, 25 Hertz, 100 à 400 [10 <sup>-6</sup> m/m]	essai en 4 points, éprouvettes de 50·50·500mm	essai à 10°C, 10 Hertz, 180 [10 <sup>-6</sup> m/m]
Résistance aux déformations permanentes			druck-Schwell	deux températures
Résistance à l'orniérage	orniéreur LPC (c.f. annexes)	ornière [%] à 10'000 cycles et 60°C	orniéreur LPC	ornière [%] à 10'000 cycles et 60°C
Comportement aux basses températures	essai de retrait thermique empêché (c.f. annexes)	température de rupture [°C], temp. de transition [°C] et contrainte de rupture [Mpa]		
Susceptibilité à l'eau	compression diamétrale d'éprouvettes (PCG, Marshall, carottes) immergée et non immergée	ITSR : Indirect Tensile Strength Ration [-]	compression diamétrale d'éprouvettes (PCG, Marshall, carottes) immergée et non immergée	ITSR : Indirect Tensile Strength Ration [-]
Adhésivité des couches			essai Leutner selon norme SN	force maximale de cisaillement [kN]

## Essais proposés sur les composants

*La liste des essais proposés pour la caractérisation des composants, dans le but de quantifier leurs propriétés empiriques, semi-empiriques et intrinsèques afin de fournir des indicateurs de performance de ceux-ci, est issu des futures recommandations européennes CEN en la matière. La norme SN EN 12591 présente les conséquences sur les normes suisses qui restent en vigueur ainsi que sur celles qui sont abrogées.*

### Essais sur les Bitumes

Essai	Normes SN	Normes CEN	COMPETENCE		Essai réalisé
			LAVOC	EMPA	
Détermination de la solubilité	670 500-1	EN 12592:1999	non	oui	✓
Détermination du point de rupture selon Fraass	670 500-2	EN 12593:1999	oui	oui	✓
Détermination de la résistance au vieillissement sous l'influence de la chaleur et de l'air; Partie 1: procédé RTFOT	670 500-11	EN 12607-1:1999	oui	oui	✓
Détermination de la pénétration	670 500-7	EN 1426:1999	oui	oui	✓
Détermination du point de ramollissement; méthode anneau et bille	670 500-8	EN 1427 :1999	oui	oui	✓
Viscosité dynamique à 60°C	670 500-5	EN 12596:1999	non	oui	✓
Viscosité cinématique à 135°C	670 500-4	En 12595 :1999	non	oui	✓
Ductilité	671 746	non	oui	oui	✓
Shear Rheometer	non	non	non	oui	✓
Bending Beam Rheometer	non	non	non	oui	✓
Direct Tensile test	non	non	oui	non	✓

Essai	Normes SN	Normes CEN	COMPETENCE		Essai réalisé
			LAVOC	EMPA	
<b>Cas particulier pour les bitumes modifiés</b>					
Force-Ductilité	670 548	non	non	En cours de préparation	non
Recouvrance élastique	671 747	non	oui	oui	✓
Stabilité au stockage	671 750	non	oui	oui	non

## Essais sur les Granulats

Essai	Normes SN	Normes CEN	COMPETENCE		Essai réalisé
			LAVOC	EMPA	
description pétrographique simplifiée	670 901-3	EN 932-3	Non	Non	non
Analyse granulométrique par tamisage	670 902-1	EN 933-1	Oui	Oui	✓
Détermination de la forme des granulats – Coefficient d'aplatissement	670 902-3	EN 933-3	Oui	Oui	✓
Détermination de la forme des granulats – Coefficient de forme	670 902-4	EN 933-4	Oui	Oui	✓
Evaluation des caractéristiques de surface - Détermination du pourcentage de surfaces cassées dans les gravillons	670 902-5	EN 933-5	Oui	Oui	✓
Evaluation des fines – Equivalent de sable	670 902-8	EN 933-8	Oui	Oui	✓
Qualification des fines – Essai au bleu de méthylène	670 902-9	EN 933-9	Oui	Oui	✓
Détermination des fines – granularité des fillers (tamisage dans un jet d'air)	Non	EN 933-10	Oui	Oui	✓
Détermination de la résistance à l'usure (micro-Deval)	670 903-1	EN 1097-1	Oui	Non	✓
Méthode pour la détermination de la résistance à la fragmentation (Los Angeles)	670 903-2	EN 1097-2	Oui	Oui	✓
Détermination de la porosité du filler sec compacté	670 903-4	EN 1097-4	Oui	Oui	✓
Détermination de la masse volumique réelle du filler – Méthode au pycnomètre	670 903-7	EN 1097-7	Oui	Oui	✓
Détermination du coefficient de polissage accéléré (CPA)	670 903-8	EN 1097-8	Oui	Oui	non
Détermination de la résistance au gel-dégel	670 904-1	EN 1367-1	Oui	Non	non
Essais sur les fillers utilisés dans les mélanges bitumineux; Partie 1: Essai bille-anneau	670 906-1	EN 13179-1	Oui	Oui	✓

# Formulation

## Etat des connaissances

*L'objectif principal de la formulation est de déterminer une composition optimale de granulats, de liants et de vides qui permette d'atteindre les performances visées. Dans la suite on fera une brève description des différentes méthodes de formulation les plus connues.*

## Méthode Hveem

*Les grands concepts derrière cette méthode ont été énoncés par Francis N. Hveem. Ingénieur de la Californian Department of Transportation (CDT), dans les années 30. Cette méthode a par la suite subie diverses améliorations pour devenir la méthode officielle de la CDT [6].*

*La procédure de formulation peut se définir en plusieurs étapes :*

### 1. Le choix des matériaux

*Ce choix doit être en accord avec le cahier des charges du projet. Les matériaux doivent satisfaire les propriétés physico-chimiques fixées dans celui-ci.*

### 2. Le choix de la courbe granulométrique

*La combinaison des différentes tailles d'agrégats doit permettre d'obtenir une courbe granulométrique aussi proche que possible de la courbe de référence fixée dans le cahier des charges.*

### 3. La détermination de la teneur en liant approximative

*Cette estimation découle de deux essais propres à cette méthode : le Centrifuge Kerosene Equivalent (CKE) et le Surface Capacity. En fonction de ces tests et de la densité réelle des fines et des pierres on peut, à travers des abaques spécifiques, obtenir une estimation de la teneur en liant optimale.*

### 4. La préparation des échantillons

*Les échantillons sont fabriqués selon une procédure et dans des moules normalisés. Le compactage se fait grâce à un compacteur mécanique avec une méthodologie qui est aussi normalisée. On devrait préparer un échantillon à la teneur en liant obtenue précédemment, deux avec des teneurs en liant inférieures (-0.5% et -1.0%) et un avec une teneur en liant supérieure (+0.5%).*

### 5. Test de stabilité et de ressuage

*Une fois compactés les échantillons sont soumis à ces deux tests. L'appareillage du test de stabilité est propre à la méthode Hveem ; des valeurs de stabilité minimales sont fixées en fonction du trafic. Le test de ressuage est plutôt qualitatif.*

### 6. Le choix de la teneur en liant optimale

*La teneur en liant optimale est la teneur en liant maximale dont l'échantillon satisfait les conditions de stabilité minimale, ne présente pas un ressuage important et la teneur en liant est au moins égale à 4%. Si cette valeur est celle de la teneur en liant maximale préparée (estimation +0.5%) alors il faut préparer un échantillon supplémentaire avec une teneur en liant supérieure de +0.5% et refaire la procédure.*

## **Marshall mix design**

*Les premiers concepts de cette méthode furent développés par Bruce Marshall vers la fin des années 30, puis révisés et améliorés par la U.S. Army. Cette méthode, recommandée par les normes VSS en Suisse, vise à choisir la teneur en liant, pour une certaine densité du mélange, qui satisfait une stabilité minimale et un fluage évoluant dans un intervalle d'acceptation.[6]*

*La procédure de formulation peut se résumer en six étapes distinctes :*

### *1. Le choix des agrégats*

*Les agrégats sont choisis selon leurs caractéristiques physiques (dureté, propreté, forme,...). Une fois ce choix effectué on détermine leur granulométrie et leur densité puis on choisit les différents agrégats nécessaires à l'obtention de la courbe granulométrique de référence.*

### *2. Le choix du liant*

*Cette méthode ne possédant pas une procédure de sélection et d'évaluation normalisée, le choix est laissé à l'ingénieur qui devra réaliser les essais qu'il juge nécessaires.*

### *3. La préparation des échantillons*

*Les échantillons sont fabriqués dans des moules normalisés. Typiquement on prépare 5 mélanges avec des teneurs en liant différentes, et, pour chaque mélange, trois échantillons. Les échantillons sont ensuite compactés à l'aide d'un marteau aux dimensions normalisées et selon des règles bien précises.*

### *4. Détermination de la stabilité et du fluage*

*Une fois compactés les échantillons sont soumis à un essai de stabilité et fluage. La stabilité est la force maximale que peut supporter l'échantillon et le fluage est la déformation plastique qui s'ensuit. Ces deux valeurs sont en quelque sorte des mesures permettant de prévoir la performance de l'enrobé.*

### *5. Calcul de la densité et des vides*

*La densité et les vides (vides du mélange, vides du squelette minéral, vides remplis par le bitume) permettent de caractériser le mélange.*

### *6. Choix de la teneur en liant optimale*

*Ce choix dépend de la combinaison des résultats de stabilité et fluage, des vides et de la densité. Ainsi 6 graphes représentant l'évolution du pourcentage de vides, de la densité, du fluage, de la stabilité, des vides du squelette minéral (VMA) et des vides remplis par le bitume (VFA) en fonction de la teneur en liant sont tracés. Le choix du pourcentage de vides du mélange permet d'une part d'obtenir la teneur en liant optimale et d'autre part de vérifier si cette teneur en liant satisfait les exigences sur les autres paramètres. Ces deux actions se font graphiquement à l'aide*

## **Superpave mix design**

*Cette méthode de formulation a été développée aux Etats-Unis pour remplacer la méthode Marshall. Elle connaît une grande application dans le domaine. Ainsi en 2000, 62% de la production totale en tonnes de revêtement bitumineux s'est faite par l'utilisation de cette méthode. [53]*

*Dans le cadre du programme de recherche SHRP (Strategic Highway Research Program) dont les objectifs étaient d'améliorer le choix des matériaux et la formulation d'enrobés bitumineux, une nouvelle méthode de formulation a été mise au point au début des années 90 : la méthode SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement).*

*La méthode de formulation SUPERPAVE est basée sur le concept de maniabilité lors de la pose ainsi que de la performance de l'enrobé dans le temps. Elle peut se diviser en quatre étapes [5] :*

### *1. Le choix des agrégats*

*Ce choix suit trois critères différents. La courbe granulométrique qui doit être comprise entre deux limites et doit passer par des points fixes. Les spécifications caractéristiques des agrégats (consensus properties) : angularité, forme et équivalent en sable. Les critères spécifiques à la source des agrégats ( source properties ) : dureté, bruit et propreté.*

### *2. Le choix du liant*

*Ce choix dépend, outre des caractéristiques physiques du liant (pénétration, viscosité, etc.), des conditions climatiques et du type de trafic. Il existe une graduation des liants ( performance grading (PG) system ) qui est fonction de la température maximale et minimale de la chaussée et des conditions de trafic. La détermination de ces trois paramètres associée avec une fiabilité minimale du résultat ( reliability design ) permet de définir le grade minimal du liant à utiliser.*

### *3. Choix de la teneur en liant optimale*

*Des échantillons sont fabriqués avec quatre teneurs en liant différentes (variation de  $\pm 0.5\%$ ) et soumis au compactage dans la Superpave Gyratory Compactor (PCG) (presse à cisaillement giratoire). On trace le graphique densité théorique maximal de l'enrobé en fonction du nombre de girations pour les quatre échantillons. Ensuite on détermine graphiquement la teneur en liant qui satisfait le pourcentage de vides voulu et le nombre de girations nécessaires pour l'obtenir. Le nombre de girations est défini par les conditions de trafic.*

### *4. Essais de performances*

*Cette dernière étape, encore en développement, normalisera les essais à faire pour déterminer les caractéristiques mécaniques des mélanges, à savoir le module dynamique, le flow time et le flow number. [8]*

## **Principe de la méthode française**

Cette méthode repose sur deux grands axes. Le premier est la détermination de la quantité minimale de liant en fonction de la granulométrie du mélange. Le deuxième est l'utilisation de la presse à cisaillement giratoire pour estimer le comportement lors du compactage du mélange.

### **1. Quantité minimale de liant bitumineux.**

Dans l'approche qui s'est codifiée en France dans les années cinquante, pour une composition granulométrique donnée, on définit une quantité de liant bitumineux minimale pour assurer une bonne durabilité du mélange par la notion de module de richesse  $K$ . Cette grandeur, qui est proportionnelle à une épaisseur conventionnelle du film de liant enrobant les granulats, est donnée par l'expression suivante qui relie  $K$  à la teneur en liant  $TL$  et à la surface spécifique conventionnelle des granulats  $\Sigma$  :

$$TL = K \alpha \sqrt[5]{\Sigma}$$

avec  $\alpha$ , coefficient correcteur relatif à la masse volumique des granulats :

$$\alpha = \frac{2,65}{MVR_g}$$

La surface spécifique conventionnelle  $\Sigma$  est calculée à l'aide de l'expression :

avec les proportions massiques :

$G$ , des éléments supérieurs à 6,3 mm

$S$ , des éléments compris entre 6,3 mm et 0,315 mm

$s$ , des éléments compris entre 0,315 mm et 0,08 mm

$f$ , des éléments inférieurs à 0,08 mm

### **2. Essai à la presse à cisaillement giratoire**

Une composition du mélange étant choisie par référence à l'expérience antérieure, son comportement lors du compactage est estimé à l'aide de l'essai à la presse à cisaillement giratoire.

Une quantité prédéterminée du mélange hydrocarboné, portée à la température usuelle de fabrication de l'enrobé en centrale, est placée dans un moule cylindrique de 150 mm ou 160 mm de diamètre. Le compactage est obtenu par l'action concomitante :

- d'une force de compression statique assez faible correspondant à une pression de l'ordre de 0,6 MPa et
- d'une déformation de l'éprouvette à laquelle on impose que son axe longitudinal décrive une surface conique de révolution, de sommet  $O$  et d'angle au sommet  $2\alpha$ , pendant que les surfaces d'extrémité de l'éprouvette restent sensiblement horizontales. L'angle  $\alpha$  est d'environ  $1^\circ$ . Il est déterminé pour chaque type de machine de façon à obtenir des pourcentages de vides fixés sur des matériaux pris comme référence. La vitesse de rotation a peu d'influence sur le résultat, elle est prise couramment égale à 30 tours/min.

- *L'interprétation de l'essai du point de vue de l'appréciation du comportement lors du compactage du mélange est faite en considérant les valeurs de pourcentages de vides obtenues en général après 10 girations et après un nombre de girations, Ng [25, 40, 60, 80, 100, 120 ou 200] qui dépend du type d'enrobé étudié.*

*Après 10 girations, il est en général spécifié une valeur minimale du pourcentage de vide (de l'ordre de 14 % pour des matériaux en couche de base) afin d'éviter d'avoir un mélange trop maniable qui s'avèrerait difficile à compacter sans déformations excessives et conduirait à un matériau qui se révélerait aussi instable sous le trafic.*

*Après Ng girations, il est spécifié cette fois une fourchette de valeurs pour le pourcentage de vides (pour des bétons bitumineux courants utilisés en couche de surface, les pourcentages de vides doivent être compris entre 5% et 10%. Pour des enrobés destinés à des couches de base, seule la valeur maximale est spécifiée, elle peut atteindre 11%). La valeur maximale est destinée à assurer la durabilité du mélange, la valeur minimale vise à éviter une compacité excessive qui favoriserait l'instabilité du mélange et le développement de l'orniérage par fluage sous trafic, ainsi qu'à assurer le maintien d'une macro - texture suffisante pour les couches de roulement.*

## **Formulation C.R.R.**

*Le Centre de Recherche Routière belge a également développé une méthode de formulation pour les enrobés bitumineux. Celle-ci se caractérise par le fait qu'elle est analytique ; l'utilisation d'un essai en laboratoire n'est justifiée que comme moyen de vérification des valeurs déterminées par la formulation volumique.*

*La procédure de formulation est identifiée dans la figure 4 et peut se résumer en trois phases [12][13] :*

*PHASE 1 : Choix et caractérisation des matériaux.*

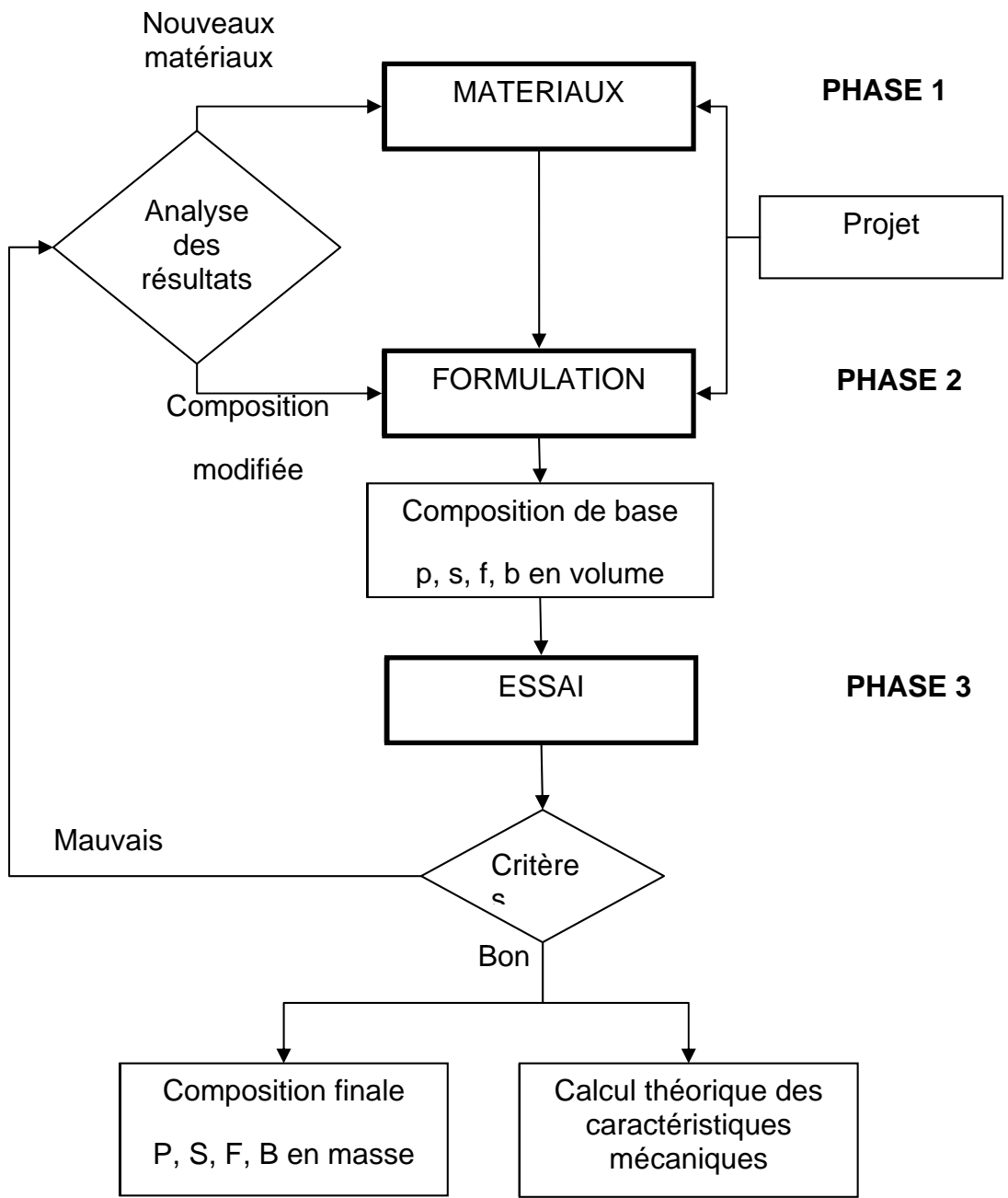
*Comme pour les autres méthodes, le choix des composants du mélange est d'une grande importance pour le résultat et les performances de l'enrobé. Il est important de connaître les caractéristiques physiques des agrégats (granulométrie, dureté, propreté, etc.) et du liant (pénétration, susceptibilité thermique, etc.).*

*PHASE 2 : La formulation*

*La composition d'un mélange doit en premier lieu être conçue sur la base d'une méthode analytique prenant en compte les paramètres importants. Cette phase est intégrée dans le logiciel spécifique PRADO.*

*PHASE 3 : L'essai*

*L'utilisation d'un essai de laboratoire permet de vérifier les résultats de la formulation analytique et, le cas échéant, de corriger les éventuels écarts en agissant soit sur la composition soit sur les matériaux. Ce n'est que lorsque l'essai est en accord avec les résultats que l'on peut passer à l'étape finale qui sont le passage d'une formulation volumique à une formulation massique, grâce aux masses volumiques des composants, et le calcul des caractéristiques mécaniques de l'enrobé ainsi obtenu.*



**Figure 10: Procédure de formulation**

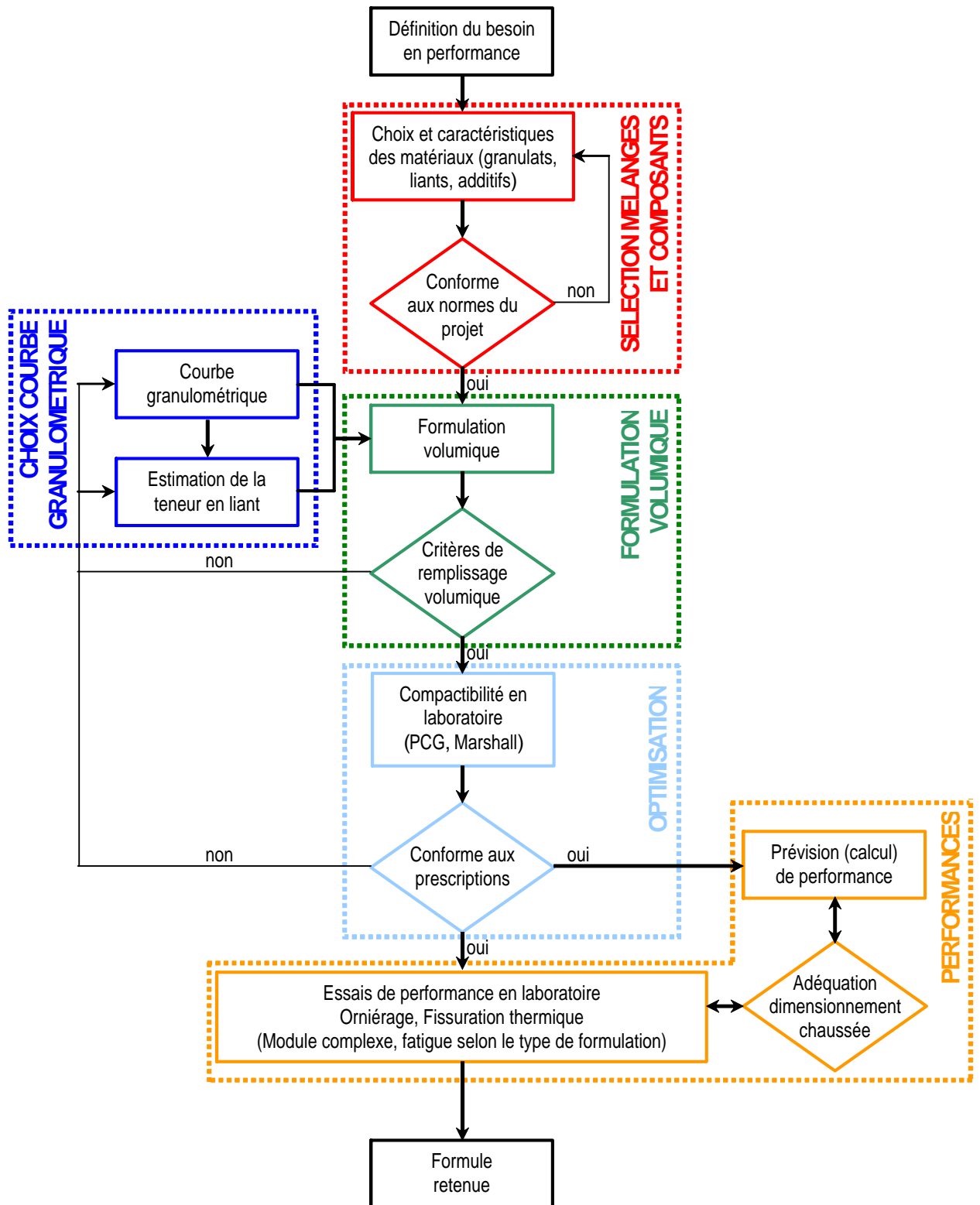
## **Démarche de la formulation**

*Bien qu'à ce jour aucune méthode universelle s'affranchissant totalement de l'empirisme n'ait été mise au point, d'énormes progrès ont déjà été réalisés. La démarche de formulation recommandée par la suite, établie par le Prof. Dumont, se base sur la méthode de formulation belge en y associant une étape supplémentaire d'optimisation (et non seulement de vérification) utilisant l'essai Marshall ou mieux encore la Presse à Cisaillement Giratoire (PCG).*

*Le but de la formulation étant de déterminer une composition optimale de granulats, de liants et de vides qui permette d'atteindre les performances visées, il est primordial de définir les objectifs de performance que l'on souhaite atteindre. La démarche de formulation développée ici comporte cinq phases :*

- 1. Définition du besoin en performance,*
- 2. Sélection des composants,*
- 3. Formulation volumique,*
- 4. Optimisation,*
- 5. Vérification.*

*Cette démarche est détaillée dans l'organigramme qui suit :*



**Figure 11 : Démarche proposée pour l'étude de formulation**

## **Définition des besoins en performance**

*La définition des besoins en performance consiste à choisir la valeur limite souhaitée vis-à-vis des comportements suivants :*

- *susceptibilité à l'orniérage,*
- *valeur(s) du module complexe,*
- *résistance à la fatigue,*
- *résistance à basse température,*
- *susceptibilité à l'eau.*

*En général ces performances sont traduites en pourcentage de vides minimal ou maximal, teneur en liant, caractéristiques des agrégats, etc.*

## **Sélection des composants**

*La sélection des composants consiste à choisir les granulats, le liant et les ajouts utilisés pour la fabrication de l'enrobé. Ceci sur la base des considérations*

- *de trafic (volume, pourcentage de poids lourds, charge par essieu),*
- *de climatologie (pluviométrie, gel-dégel, température, ensoleillement),*
- *de position de la couche (roulement, base, fondation liée),*
- *de fonction de la couche (adhérence, perméabilité, bruit, orniérage, etc.).*

*Sur la base de ces considérations, les normes suisses SN 640 431b « Revêtement en béton bitumineux ; Conception, exigences, exécution », SN 640 432a « Couches de roulement en Splittmastixasphalt ; Conception, exigences, exécution » et SN 640 433b « Couches en enrobé drainant ; Conception, exigences, exécution » fournissent des recommandations pour le choix du type d'enrobé (AB, HMT, SMA, DRA, ...) ainsi que leurs spécifications relatives.*

## **Formulation volumique**

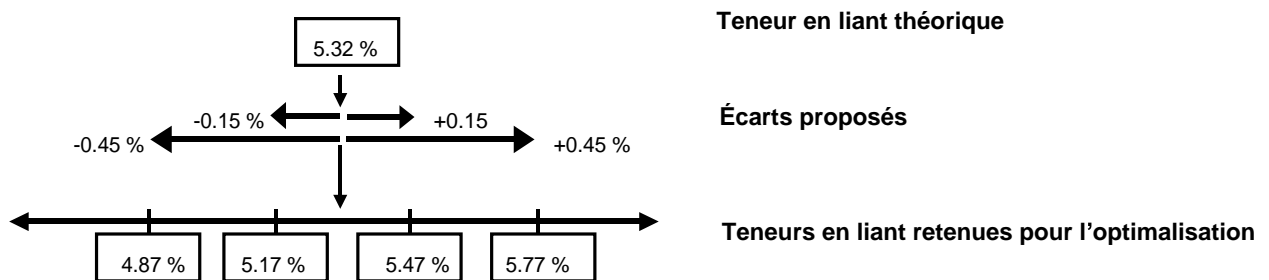
*La formulation volumique doit commencer par la définition des critères de remplissage volumique. Ensuite, il faut déterminer la composition du mélange par la méthode volumique. Cette détermination se fait par les étapes suivantes :*

- *Evaluation de la teneur en vides du squelette minéral*
- *Détermination du volume disponible pour le mastic*
- *Détermination de la composition du mastic en fonction de la nature du bitume et du filler*
- *Vérification des critères de remplissage volumique.*

*L'évaluation de la teneur en vides du squelette minéral a peut se faire avec le logiciel PRADO, développé par le Centre de recherches routières (CRR) [26].*

## Optimalisation

La compactibilité du mélange et le remplissage qui en résulte sont des indicateurs pertinents des performances *in situ* de l'enrobé. En plus de la fabrication de l'enrobé à partir de la teneur en liant déterminée par la formulation volumique, on fabriquera l'enrobé avec au moins quatre teneurs en liants différentes. On choisira des teneurs inférieures et supérieures qui devront varier de l'ordre de  $\pm 0.15\%$  et  $\pm 0.45\%$ . À titre d'exemple, soit un résultat de la formulation volumique de 5.32%, les teneurs qui seront retenues sont :



**Figure 12 : Exemple de choix des teneurs en liant en vue de l'optimalisation par la compactibilité**

Des gâchées d'essai en laboratoire sont élaborées à chacune de ces teneurs et compactées soit en suivant la procédure Marshall, ou mieux encore, en soumettant l'enrobé chaud à un compactage à la presse à cisaillement giratoire (PCG).

## Performance

La performance des enrobés à travers le module complexe et la fatigue peut être réalisée par une approche purement théorique. Pour l'orniérage et le comportement à basse température cette approche théorique découle d'un essai en laboratoire ; on parle alors d'une approche prédictive. La possibilité d'évaluer les performances de manière analytique est une source d'économie tant en moyens économiques qu'en temps. Dans la procédure suivie au Lavoc l'évaluation des performances a été couplée avec des essais de performances en laboratoire pour calibrer et valider ces évaluations.

Il existe plusieurs méthodes prévisionnelles du module (p. ex. la relation de Heukelom et Klomp, Francken, Shell,...) et de la fatigue (p. ex. la relation de L. Francken). Dans le cas précis nous avons opté pour les formules développées par Francken [24] et les avons calibrés avec les essais en laboratoire.

En ce qui concerne l'orniérage il existe une méthode prévisionnelle qui a été développée au Lavoc dans le cadre du mandat de recherche 12/98 «Elaboration d'une méthode prédictive de l'orniérage des revêtements bitumineux » dont le rapport est en cours de relecture et paraîtra en 2005.

À l'heure actuelle, seule les valeurs limites de mesure de l'orniérage sont normalisées et doivent faire l'objet de vérification. Les caractéristiques de module et fatigue ainsi que la résistance à basse température seront appréciées selon l'expérience de l'ingénieur.

## Niveaux de formulation

Cette procédure globale de formulation peut se décomposer en trois niveaux de formulation selon le type de route, le trafic et les considérations climatiques.

Type de formulation	Etapes de formulation
Formulation de base	Formulation volumique + optimisation
Formulation intermédiaire	Formulation volumique + calcul module et fatigue + essai d'orniérage + (essai thermique)
Formulation avancée	Formulation volumique + essai d'orniérage + (essai thermique) + essai module et fatigue

Tableau 4: Niveaux de formulation

## Validation de la méthode

La validation de la méthode a été réalisée en laboratoire avec la fabrication d'échantillons suivant la procédure établie plus haut. Aussi avons-nous réalisés des essais Marshall pour l'optimisation et des essais de module et de fatigue pour la vérification des performances des enrobés. Soulignons néanmoins que outre la procédure d'optimisation on a également voulu procéder à une analyse de sensibilité à la teneur en liant. Ainsi pour les enrobés AB 11S Uri/Valais et HMT 22S des valeurs supplémentaires de teneur en liant ont été rajoutées. Pour l'étude de sensibilité a été retenue une valeur de teneur en liant faisant partie des valeurs d'optimisation et on l'a fait varier de  $\pm 0.5\%$ . Dans les tableaux ces valeurs sont en bleu et ont été intégrés lors de l'optimisation du résultat.

Par ailleurs précisons que l'étude d'un nouveau matériau tel que l'enrobé à module élevé (EME 2) a été prise en compte une fois le projet démarré. Pour cette raison l'étude de formulation n'a pas été menée dans ce projet. Néanmoins le mandat de recherche 20/96 : « Evaluation des performances de nouveaux matériaux de revêtement : 1<sup>ère</sup> partie : enrobés à haut module » [39] mené par le Lavoc a servi de base pour la formulation de l'enrobé EME 2 mis en place au Rundlauf et pour la validation des performances à l'aide d'un calcul analytique.

### Définition des besoins en performance

Les enrobés utilisés pour la validation sont un AB 11S et un HMT 22S. Les besoins en performance de ces matériaux sont légèrement différents. L'AB 11S est utilisé comme couche de roulement, il doit donc présenter une bonne adhérence et une grande résistance à l'abrasion (choix de granulats concassés), une bonne tenue à l'orniérage et doit être suffisamment imperméable pour évacuer l'eau de pluie. Par ses considérations il a été fixé comme objectif un pourcentage de vides Marshall de 4%. Le compactage Marshall est considéré comme proche de la compacité en place.

Le HMT 22S est utilisé comme couche de base. Il est important d'avoir une bonne résistance à la fatigue ainsi qu'aux déformations permanentes. Par ces considérations la valeur cible du pourcentage de vides Marshall est de 5.5%.

## **Sélection des composants**

Les granulats utilisés provenaient de la carrière Gasperini du canton d'Uri. Le liant était un liant 50/70 obtenu par distillation directe.

Ces composants ont un rôle important dans les performances des enrobés et leur choix doit être précédé d'une analyse de leurs caractéristiques.

## **Choix de la courbe granulométrique**

Le choix des courbes granulométriques s'est fait à partir des résultats des analyses des matériaux prélevés fournis par l'EMPA. Ces matériaux ont été prélevés dans le cadre du paquet de recherche PR2 : « Durabilité des composants ». Pour l'enrobé AB 11S, deux courbes ont été retenues. Une courbe standard située au milieu du fuseau, provenant du matériau de Schwyz et une courbe creuse située au bas du fuseau, provenant d'une combinaison des résultats des matériaux provenant d'Uri et du Valais.

## **Estimation de la teneur en liant**

**L'estimation de la teneur en liant a été faite à l'aide du logiciel PRADO.**

### *Optimalisation*

*L'optimalisation a été faite par la teneur en vides Marshall. Plusieurs éprouvettes ont été façonnées avec des teneurs en liants oscillants autour de la valeur obtenue à l'estimation de la teneur en liant. La valeur finale de la teneur en liant est alors calculée par interpolation des résultats afin d'obtenir la teneur en vides Marshall désirée. D'une manière classique, ces éprouvettes sont confectionnées avec des écarts de  $\pm 0.15$  % et  $\pm 0.45$  %. On a rajouté les éprouvettes utilisées pour l'étude de sensibilité dont les résultats sont fournis au 5.3.8*

### **Vérification de la formulation**

*La formulation volumique, à travers le logiciel Prado, a fourni des teneurs en liant en fonction des valeurs cibles des vides Marshall pour chaque enrobé. L'optimalisation a ensuite amélioré cette valeur par interpolation. Pour connaître le niveau de précision entre la formulation analytique et le résultat final, comparons les valeurs obtenues.*

Enrobé	Teneur en vides Marshall souhaitée [%]	Teneur en liant L/A obtenue avec Prado [%]	Teneur en liant L/A après optimisation [%]	Ecart absolu	Ecart relatif [%]
AB 11S Schwyz	4.0	5.68	6.07	0.39	<b>+6.8</b>
AB 11S Uri/VS	4.0	5.76	5.69	0.07	<b>-1.2</b>
HMT 22S	5.5	3.96	4.44	0.48	<b>+12.1</b>

**Tableau 5: Comparaison des résultats fournis par Prado et des valeurs après optimisation**

Les valeurs calculées à travers les formules analytiques sont une très bonne approximation du résultat final en ce qui concerne les deux enrobés AB 11S. En effet l'écart maximal relatif est inférieur à 7%. Par contre pour le HMT 22S cet écart dévient un peu plus important puisqu'il dépasse le seuil des 10% (+12.1%). De ce fait la valeur optimale n'est plus comprise dans l'intervalle d'optimisation ( $4.44 > 3.96 + 0.45$ ).

### **Prévisions de performance**

Il existe la possibilité de modéliser, par une approche théorique, les performances mécaniques (module et fatigue) de l'enrobé. La méthode de formulation adoptée étant très proche de celle du C.R.R., l'approche théorique utilisée sera celle développée par L. Francken [24]. Cette méthode ayant été développée pour les matériaux belges, on peut se demander en quelle mesure les résultats s'adaptent aux matériaux utilisés en Suisse.

- Le module

Le travail de L. Francken a consisté à déduire, à partir d'une analyse statistique de différents résultats trouvés par divers auteurs (Heukelom et Klomp, Saunier, Verstraeten), une méthode permettant de prévoir le module complexe des mélanges bitumineux dans les limites d'erreurs acceptables.

En règle générale l'auteur propose la détermination du module complexe en deux étapes:

- La première se base sur le calcul du module purement élastique ( $E_\infty$ ) qui ne dépend principalement que de la composition du mélange
- La seconde est le calcul d'un module réduit ( $R^*$ ), fonction de la fréquence réduite  $f_R$  (intégrant la fréquence de sollicitation et la température), dont la forme dépend des caractéristiques du bitume. Sa valeur est comprise entre 0 et 1.

La valeur du module complexe s'obtient par le produit de ces deux paramètres :

$$|E^*(f_R) = E_\infty \cdot R^*(f_R)$$

Le logiciel de formulation (PRADO) permet également de calculer les performances en intégrant les formules trouvées par L. Francken. Pour évaluer la précision du calcul des performances nous avons comparé les valeurs obtenues en laboratoire (avec les formulations des enrobés AB 11S Uri/Vs et HMT 22S ; chaque formulation ayant une teneur en liant différente et la formulation de l'enrobé EME 2 avec une seule teneur en liant) avec celles obtenues par le logiciel PRADO.

On peut conclure en remarquant que la prévision analytique des performances peut s'adapter aux nouveaux matériaux pour obtenir des ordres de grandeurs. En effet les écarts dans l'intervalle des valeurs de dimensionnement ( $10000 \text{ MPa} < E < 20000 \text{ MPa}$ ) varient entre 5 et 20%. Vu les écarts inter laboratoires dans l'étude menée par la RILEM on peut qualifier ces différences d'acceptables en n'oubliant pas que pour cet enrobé nous ne disposons que d'une seule formulation !

- La fatigue

Le logiciel Prado permet également de calculer la déformation de fatigue à  $10^6$  cycles, c'est-à-dire la déformation initiale à imposer à l'échantillon pour avoir une « rupture » (souvent définie par une diminution du module de moitié) après  $10^6$  cycles.

La connaissance de la résistance à la fatigue est surtout importante pour les couches de base (HMT22S). Les résultats trouvés avec le logiciel sont très proches des valeurs trouvées par les essais en laboratoire (Tableau 6). Les données sont trop peu nombreuses pour nous permettre de tirer une conclusion définitive quant à la validité générale du logiciel pour les matériaux suisses, néanmoins on peut déjà voir que les résultats sont encourageants.

L/A	3.91	4.41	4.91
Déformation de fatigue obtenue par des essais en laboratoire ( $10^6$ )	81	85	102
Déformation de fatigue obtenue par le logiciel Prado ( $10^6$ )	82	92	103
Ecart absolu	1	7	1
Ecart relatif (%)	+1.2	+8.2	+1.0

**Tableau 6: Comparaison des valeurs des déformations de fatigue pour la couche de base**

Pour ce qui concerne l'enrobé EME 2 le résultat de l'essai de fatigue a été tiré d'une étude). Le résultat obtenu est comparé avec la valeur estimée par un calcul analytique. Le tableau suivant montre les deux valeurs mais aucune conclusion quant à la validité ou fiabilité des résultats de prévision ne peut être avancée avec un seul essai de fatigue.

Enrobé	Déformation de fatigue obtenue par des essais en laboratoire ( $10^{-6}$ )	Déformation de fatigue obtenue par le logiciel Prado ( $10^{-6}$ )	Ecart absolu	Ecart relatif
EME 2	143	129	14	-9.8

**Tableau 7 : Comparaison des valeurs de prévision et de laboratoire pour la déformation de fatigue.**

- L'orniérage

*Pour pouvoir prédire l'orniérage d'une chaussée on se base sur une procédure développée au Lavoc dans le cadre du mandat de recherche 12/98 de la VSS.[32] Cette méthode permet de prédire la profondeur d'ornière d'une chaussée en fonction du trafic, de la vitesse du trafic poids lourd et de la température d'une part ainsi que des caractéristiques des matériaux d'autre part. Les caractéristiques des matériaux sont définies à l'aide de deux coefficients  $\alpha$  et  $\beta$ , qui peuvent être obtenus à l'aide d'un essai PCG réalisé sur ce matériau. Ces deux coefficients sont caractéristiques du matériau, ainsi pour obtenir ces valeurs on peut aussi regarder dans le rapport du projet où une liste non exhaustive de ces coefficients par matériau a été établie. La méthode complète est détaillée dans l'annexe.*

*Dans le cadre de cette étude nous n'avons pas validé cette méthode car celle-ci a déjà fait l'objet d'une validation pour les matériaux utilisés en Suisse dans 11 planches d'autoroutes dans le mandat de recherche « Elaboration d'une méthode prédictive de l'orniérage des revêtements bitumineux ».*

*L'étude s'est contentée d'évaluer les enrobés obtenus en comparant les résultats d'essai PCG aux critères de la norme SN 640 431b (voir analyse de sensibilité).*

### **Analyse de sensibilité**

*Cette analyse a été menée dans le but d'évaluer la variation des différents paramètres lors d'une légère variation de la teneur en liant ( $\pm 0.5\%$ ). Ceci a permis de mettre en évidence le fait qu'il n'existe pas une teneur en liant optimale pour toutes les caractéristiques mais que l'essentiel d'une bonne formulation est d'avoir un bon compromis entre les différents paramètres (Marshall, module, orniérage,...). Cette étude de sensibilité faite autour de la valeur optimale pour chaque type d'enrobé met en évidence ce bon compromis dans les cas étudiés.*

## Conclusions et recommandations

*Une méthode globale de formulation des enrobés bitumineux a été développée. Elle se base sur une approche volumique et permet d'évaluer les caractéristiques de module et de fatigue sans recourir systématiquement à des essais complexes de laboratoire.*

*Il ressort qu'il est possible de réaliser une étude de formulation, son optimisation et l'évaluation des performances à long terme en combinant un calcul de prévision et des essais complémentaires d'optimisation et de performance.*

*Les modèles de prévision ont un domaine de validité restreint ce qui diminue fortement la possibilité de les utiliser pour tous les matériaux. En effet, la variété des sortes d'enrobés (« asphaltes coulés », « enrobés drainants », « macrorugueux », ...) rend le problème de la formulation complexe au point qu'une formule universelle n'est pas envisageable. Ces outils restent néanmoins de bonnes approximations de la réalité pour les enrobés traditionnels et les liants classiques et permettront de repérer très vite des erreurs de formulation.*

*Une phase d'optimisation est préconisée en considérant la compactibilité du mélange par l'essai PCG et Marshall. La résistance à la déformation permanente est évaluée par l'essai d'orniérage. D'autre part, le comportement aux basses températures (fissuration thermique) est quantifié si nécessaire par un essai de retrait empêché et/ou un essai de traction directe.*

*En fonction du type de route, du trafic et des conditions climatiques, des essais de vérification sont recommandés. On distinguera trois niveaux de formulation : formulation de base, formulation intermédiaire, formulation avancée. Les limites d'application restent à établir avec les commissions techniques en charge de la normalisation.*

*Au vu de cette étude il est indispensable de recommander l'utilisation des essais de performances pour caractériser au mieux les enrobés. L'essai Marshall encore très répandu dans plusieurs pays ne peut plus « définir » la performance d'un enrobé*

*Une analyse de sensibilité a permis de mettre en évidence qu'il n'existe pas, à proprement parler, d'optimum en relation avec les performances testées. Pour certaines caractéristiques une augmentation de la teneur en liant de +0.5% diminue la performance (orniérage, fluage Marshall,...). Par contre il existe d'autres caractéristiques qui voient leur performance s'améliorer avec une augmentation de la teneur en liant (fatigue, ...). La formulation doit donc être capable de trouver le bon compromis entre toutes ces caractéristiques.*

*A ce jour les expérimentations sur les performances à long terme sont en cours sur l'installation d'essais en vraie grandeur (Rundlauf de l'IGT-ETHZ) et sous circulation sur l'autoroute A2 dans la région de Pratteln (BL).*

*L'adéquation du comportement in situ avec les prévisions du modèle sera vérifiée lorsqu'un nombre suffisant de charges sera appliqué.*



## **4. FP 4, UMSETZUNG Projekt „Grossversuch Rundlauf“**

IGT, Institut für Geotechnik der ETHZ, Zürich

### **Auftrag**

*In einem Grossversuch (Massstab 1:1) auf der Rundlaufanlage sollte das Verhalten verschiedener Belagsaufbauten unter gleichen Bedingungen direkt verglichen werden. Der Versuch dient der Evaluation und Bewertung dauerhafter Beläge und Aufbausysteme. Die zu testenden Aufbauten wurden aufgrund von Ergebnissen und Erfahrungen der Forschungspakete FP1, FP2 und FP3 ausgewählt, wobei bei Bedarf auch Recyclingmaterialien zu verwenden sind.*

*Dauerhafte Komponenten (FP2) und dauerhafte Mischgutarten (FP3) garantieren nicht automatisch ein dauerhaftes, mehrschichtiges Belagssystem. Das Zusammenspiel der einzelnen Schichten im Gesamtsystem kann auf dem Rundlauf mit verschiedenen Aufbauten unter vergleichenden Bedingungen getestet, beobachtet und optimiert werden. Der Versuch erlaubt es, selbst im Hinblick auf hochbelastete Strassen innerhalb relativ kurzer Zeit die Auswirkungen einer mehrjährigen Belastung praxisnah abzuklären. Frühere Versuche zeigten, dass mit dem Rundlauf Materialien im Hinblick auf die Dimensionierung zweckgemäss getestet und beurteilt werden konnten.*

### **Beschreibung der Anlage**

#### **Allgemeines**

##### *„Full-scale“ Versuchskonzeption auf der Rundlaufanlage*

*1:1 Versuche bildeten in den letzten Jahrzehnten die Grundlage der Straßendimensionierung in vielen Ländern, sowie auch im Frankreich oder den USA.*

*Das Ziel ist, die Gebrauchsdauer eines Straßenoberbaus in einer im Verhältnis zur Wirklichkeit stark verkürzten Zeit (Zeitraffer) simulieren zu können. Durch diese Simulation können die größten Probleme und die möglichen Schwachstellen der Projektierung und Bemessung festgestellt werden.*

*Zu dieser Thematik gehören die vom Klima beeinflussten externen Bedingungen, sowie die Wahl der Geometrie und Verteilung der Lasten.*

*Aufgrund der hohen Kosten von Grossversuchen und der zunehmend neu entwickelten Möglichkeiten von Computersimulationen werden heutzutage solche grossmassstäblichen Versuche immer seltener geplant, und neue, billigere Anlagen vorgesehen. Ob diese eine gleichwertige Beurteilung des Verhaltens von Oberbaustrukturen liefern können, ist im heutigen Zeitpunkt offen.*

*Nachteile dieses Versuches sind die nicht konstant einstellbare Temperatur, der sehr schwierige Einbau der Felder und auch die hohen Kosten.*

## **Die Infrastruktur**

*Die in 1978 gebaute Versuchsanlage besteht aus verschiedenen Elementen:*

**Fixe Elemente :** Die einzelnen fixen Elemente der Anlage sind die Betonwanne, die Zufahrten, die Kabelkanäle und der Messraum. Die Testmaschine lässt sich durch folgende Parametern beschreiben: Der Durchmesser beträgt 32 Meter, der Querschnitt ist trapezförmig mit einer Tiefe von 2 Metern. Der Querschnitt ist unten 2.5 Meter breit, oben 4.5 Meter.

### **Konzeption der Testmaschine**

*Die von der Firma Streiff AG konstruierte Belastungsapparatur besteht aus drei Stahlrohrarmen (Durchmesser 650 mm), die gelenkig an einer zentralen Führungssäule befestigt sind. Jeder Arm wird durch einen eigenen Elektromotor von 55 kW Leistung angetrieben, der über Schleifringe an der zentralen Führungssäule gespeist wird. Die elektronische Steuerung ermöglicht eine gleichmässige Belastung aller drei Gleichstrommotoren.*

*Zusätzlich wurden die drei Arme mit Stahlseilen miteinander verbunden und verspannt. Die Seilschwingungen wurden mittels Stossdämpfern auf ein tolerierbares Maß eingeschränkt.*

*Die Zwillingsreifen sind in der Querrichtung verschiebbar. Die Querverteilung der Last kann damit so programmiert werden, dass sie, wie im vorliegenden Fall, den gemessenen Fahrverhältnissen des Schwerverkehrs auf Fahrstreifen von Autobahnen entsprechen.*

*Die befahrene Fahrbahnbreite beträgt 1.35m.*

*Die maximale Geschwindigkeit beträgt 80 km/h. Die Belastung kann durch Füllen der Belastungstanks mit Wasser von 50 kN (entspricht einer Achslast von 10 Tonnen) bis 80 kN gesteigert werden.*

### **Eingebaute Sensoren**

*Mit Hilfe der in verschiedenen Tiefen eingebauten Sensoren kann die mechanische Leistung des Materials an bestimmten Orten untersucht werden.*

*Um eine ausreichende Charakterisierung zu ermöglichen, wurden die unten beschriebenen Messinstrumente eingesetzt:*

#### **Temperatursensoren**

*Sensoren gemessen. Das Zeitintervall besteht aus einer Messung pro Stunde Für die Temperaturmessung wurden die bisher erprobten und bewährten Messwiderstände PT100 angewendet (welche an vieradrige Kabel angeschlossen sind, um so die Messleitung zu kompensieren). Der Messaufnehmer und ein kleines Stück Kabel stecken in einer 6 cm langen Stahlhülse, die mit Asphalt ausgegossen wurde. Die Kabel wurden durch die Kabelkanäle geleitet und von dort in den Steuerraum zu einer zentralen Messdatenerfassungsanlage geführt. Die Daten werden in einem Speicher abgelegt und können später für Auswertungen auf Disketten überspielt werden.*

*In diesem Versuch wurden 15 Messsensoren in der Foundationsschicht, Tragschicht und Deckschicht eingebaut. Die Temperaturen im Untergrund und der Luft wurden mit den alten eingebauten Gebern erfasst.*

Die eingebauten DMS bestehen aus einem 120 mm langen Streifen aus Acryl, und das Messprinzip basiert auf einer Widerstandsänderung der in einer Wheatstoneschen Brückenschaltung zusammengekoppelten DMS Sensoren.

Die Geometrie und die Abmessungen des DMS Sensors sind aus den folgenden Bildern: nachvollziehbar.

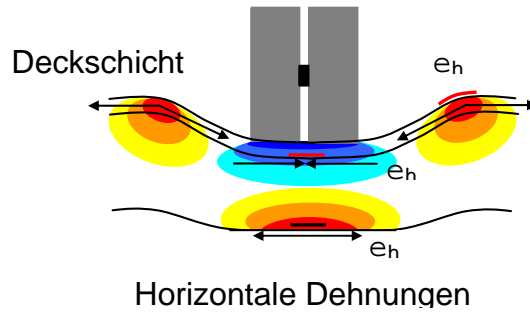


Bild 1 Positionierung der DMS in den kritischen Bereichen

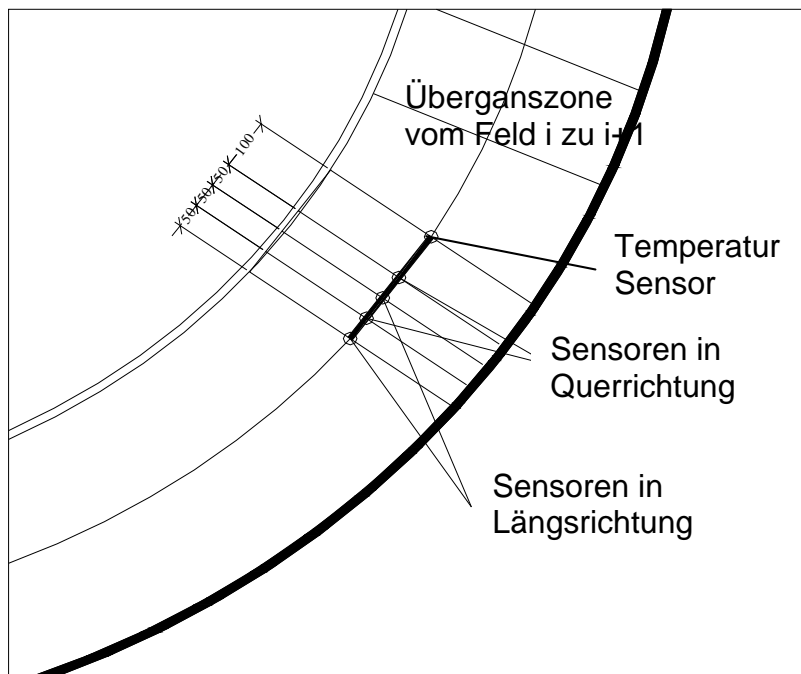
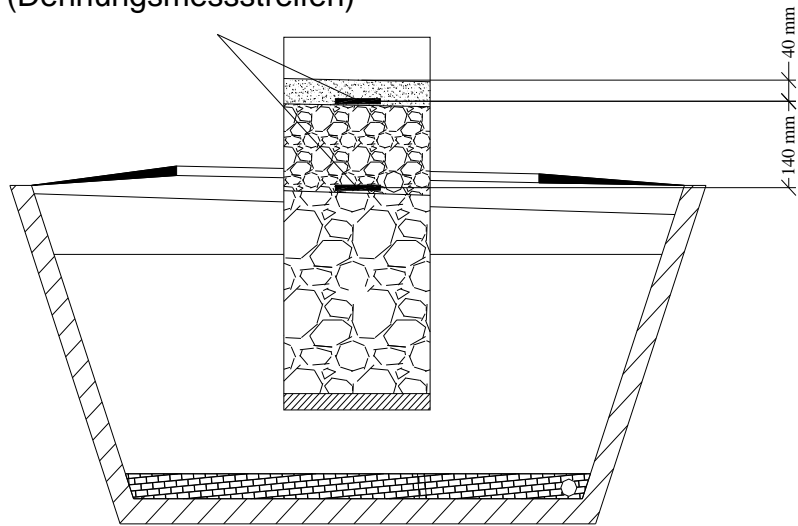


Bild 2 Lage der Sensoren

DMS (Dehnungsmessstreifen)



*Bild 3 Tiefe der Sensoren in allen Felder*

### **VVS (Vertikale Verformung Messsensoren)**

*Die Anfertigung dieser bekannten Sensoren (häufig verwendet in der Materialforschung), wurde spezifisch für diesen Versuch hergestellt, damit sie die Verformung des Asphaltpakets aufnehmen konnten.*

## Zeitplan und Versuchsdurchführung

### *Betriebszeit*

*Der Betrieb während der Sommer 2003/2004 hat verschiedene technische Problemen gegeben, da die extrem hohen Temperaturen die Elektromotoren sehr beansprucht haben. Vor dem Einbau wurden die Fahrachslasten gewogen und den Luftdruck kontrolliert.*

*Jede Messkampagne wurde regelmässig durchgeführt, nach ungefähr 100 – 150000 Anzahl Überrollungen.*

*Die Betriebsgeschwindigkeit wurde mit 25 km/h gewählt, für dynamische Messungen wurde bis auf 50km/h erhöht.*

*Die regelmäßig durchgeführten Messungen (Bild 5) und Versuche umfassten:*

- *Material- und Bohrkernuntersuchungen im Labor*
- *Längsebenheit*
- *Querebenheit*
- *Tragfähigkeit auf dem Planum und auf der Foundationsschicht*
- *Deflektionen (dynamisch und statisch)*
- *Zusammendrückung (dynamisch und statisch)*
- *Temperaturen in verschiedenen Tiefen*
- *Dehnungen in verschiedenen Tiefen*
- *Rückrechnung mit FEM Programme*

*In der Winterperiode wurde der Versuch jeweils unterbrochen. Im Frühjahr, sobald die Temperaturen nicht mehr unter Null Grad fielen wurde der Versuch wieder gestartet.*

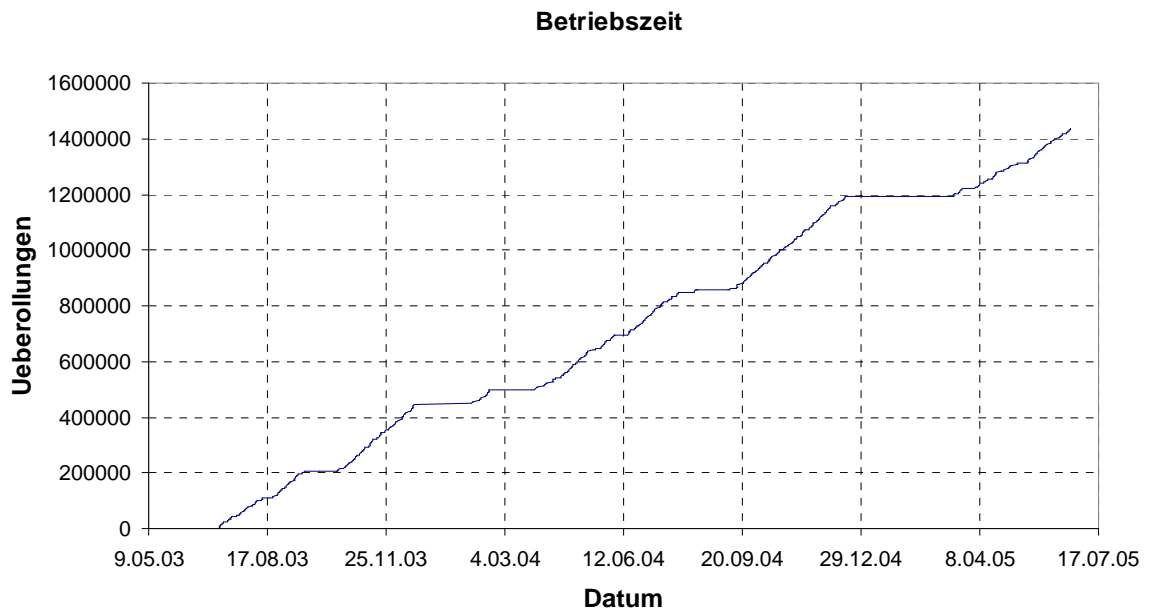


Bild 4 Betriebszeit

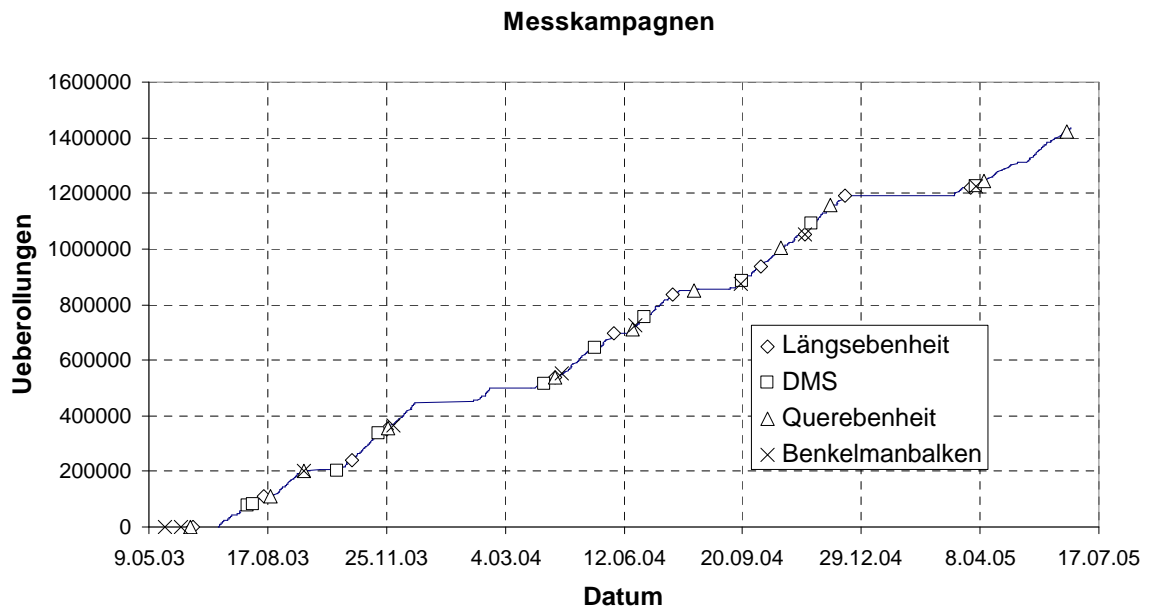


Bild 5 Durchgeführte Messkampagnen

## Einteilung der Felder

Die 5 verschiedenen Felder haben eine Länge von ungefähr 20 Meter, mit einer circa 2 Meter langen Übergangszone. Die Einteilung und die Bezeichnung der verschiedenen Felder wird im Bild 6 dargestellt:

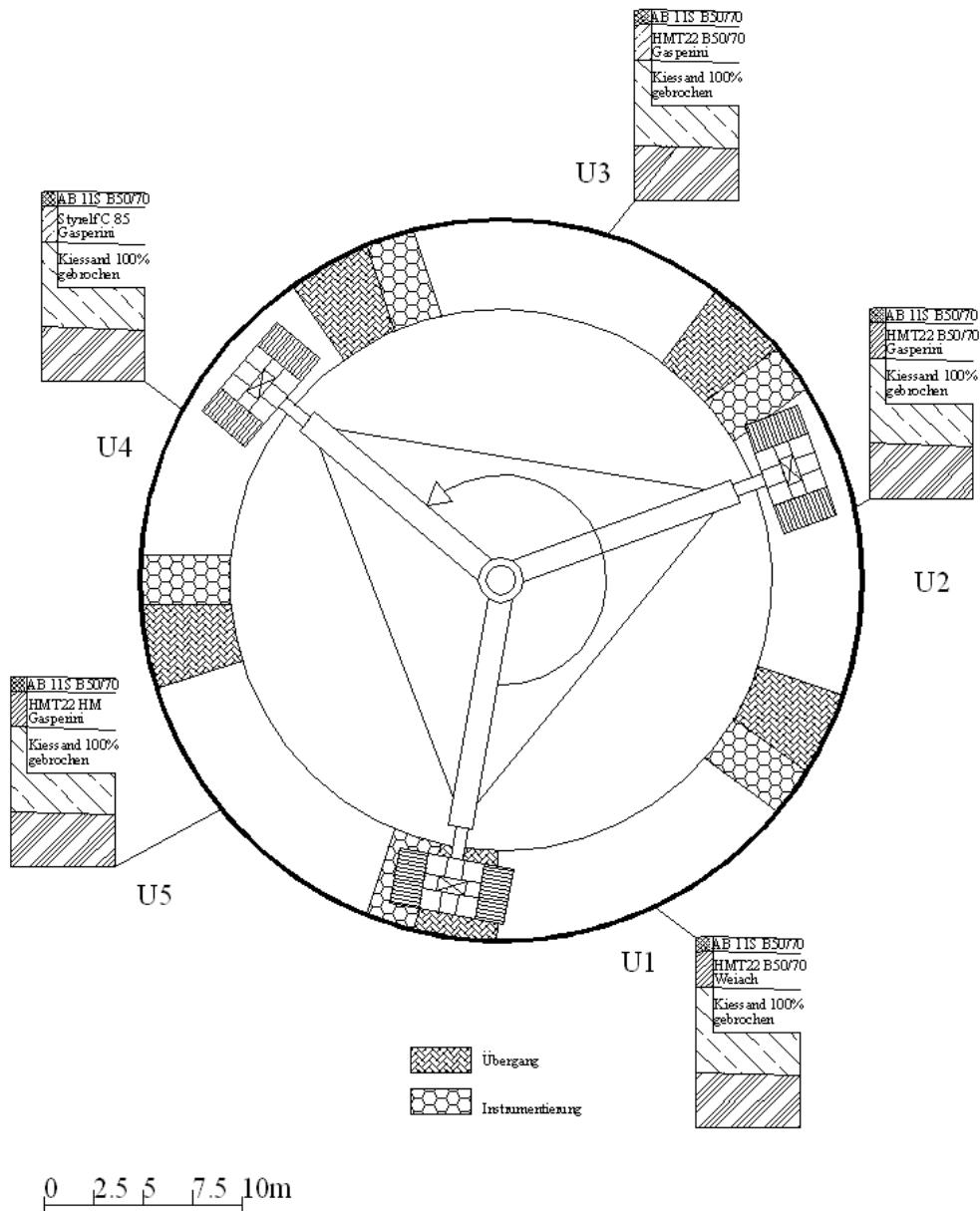
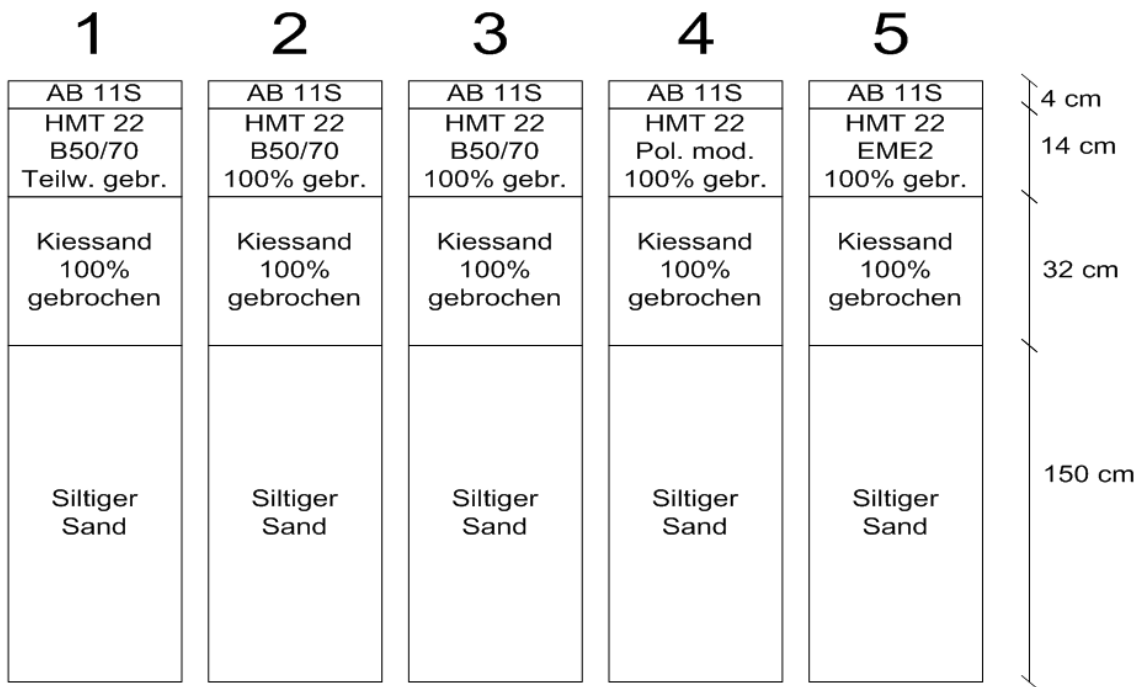


Bild 6 Feldereinteilung



*Bild 7 Aufbau der 5 Felder*

*Die Dicke der Schichten wurde für alle Felder gleich geplant:*

*Deckschicht: 40 mm*

*Tragschicht: 2 \* 70 mm*

*Fundationsschicht: 320 mm*

### **Wahl der Achslasten**

*Die selbstangetriebenen Achsen wurden mit 50 kN belastet, dies entsprechend einer gesamten Achslast von 100 kN.*

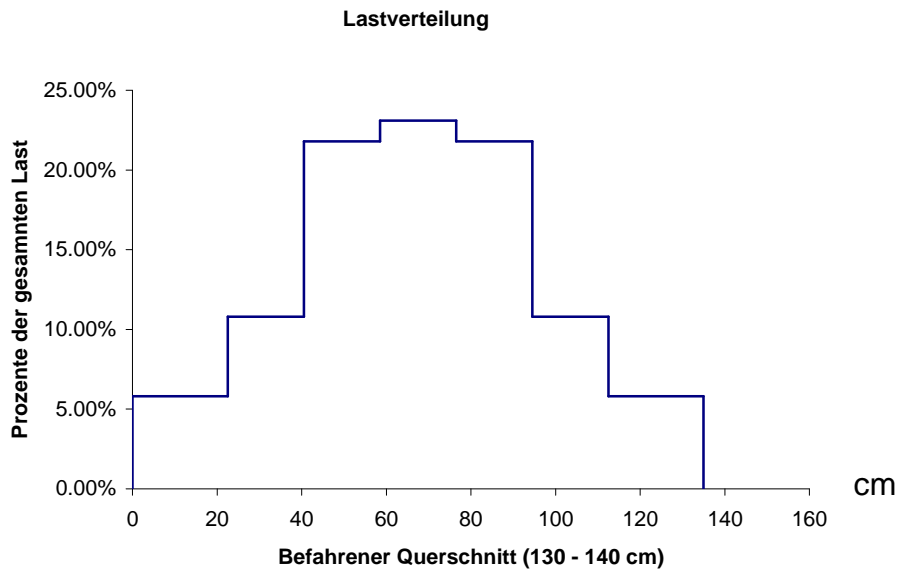
*Der Reifentyp war ein 11.00 R 20, mit einer Breite von 20 cm und einem Durchmesser von 110 cm. Der Luftdruck der Reifen beträgt 7.00 bar.*

*Der Abstand der beiden Räder (von Radmitte zu Radmitte) beträgt 35 cm.*

### **Verteilung der Lastübergänge mit der Zeit**

*Die Lastverteilung über dem Querschnitt ist durch die spezielle Konstruktion der Anlage frei wählbar. Es wurde die prozentuale Lastverteilung gewählt, die auch schon in den früheren Versuchen verwendet worden ist.*

Die Breite der Fahrbahn beträgt 1.35 m.



## Messergebnisse

### *Materialeigenschaften*

#### **Unterbau und Planum**

*Das Material des Unterbaus wurde von den vorhergehenden Rundlaufversuchen übernommen. Wo nötig, wurde das Unterbaumaterial mit gleichem Material ergänzt.*

*Beim Unterbaumaterial handelt es sich um ein feinkörniges, feinsandiges, frostempfindliches und wasserempfindliches Material, USCS Klasse SM. Der verdichtete Unterbau weist auf dem Planum eine Tragfähigkeit (gemessen mittels Plattendruckversuchen) von im Mittel  $E_v$  37 MPa auf.*

*Die Frostempfindlichkeit des Unterbaumaterials wurde mittels des CBR-Frostversuchs nach SN –CBRF- gemessen. Die Resultate sind im Anhang zu diesem Bericht enthalten.*

#### **Fundationsschicht**

*Als Fundationsschicht wurde für alle fünf Felder das gleiche Material mit den gleichen Schichtdicken vorgesehen. Kleine baubedingte Abweichungen in den Schichtdicken sind in den Resultatetabellen enthalten. Die Fundationsschicht besteht aus einem vollständig gebrochenen Kiessand (100% Brechkorn) mit einer Schichtdicke von 320 mm.*

#### **Tragschichten**

*Die verschiedenen Rezepturen der Mischgutsorten wurden vom LAVOC (EPFL) bestimmt und sind im Anhang enthalten. Die Mischgutuntersuchungen wurden an Proben vom angelieferten Material durchgeführt. Es wurden auch Bohrkern entnommen, mit denen die effektive Schichtdicke und weitere Eigenschaften an bestimmten Stellen untersucht werden.*

*Die Rohdichte, die Dichte, der Hohlraumgehalt HM, der Hohlraumgehalt des Mineralstoffgerüstes HMM und der Füllungsgrad HFB wurden gemäss SN 671 967a, SN 671 965a, SN 671 967a, SN 640 431b, SN 640 431b an Proben, welche während dem Einbau entnommen wurden, bestimmt. Es wurden jeweils 2 Proben jeder Schicht untersucht. Im nachfolgenden Marschall Prüfverfahren wurden auch die Stabilität und die Fließwerte ermittelt. Weitere Untersuchungen bestimmten den Erweichungspunkt Ring und Kugel, die Penetration und den Penetrationsindex bei 25°C. Für jede Probe wurde zusätzlich die Korngrößenverteilung bestimmt.*

*Die wichtigsten Ergebnisse der Mischgutuntersuchungen sind in den nächsten Tabellen zusammengefasst.*

*Die Materialeigenschaften wurden auch an Bohrkernen geprüft. Die aus den Bohrkernen erhaltenen Ergebnisse sind dem Anhang beigelegt.*

*Im Allgemeinen weisen die rückgewonnenen Bindemittel eine höhere Penetration bei 25°C auf als geplant.*

*Die Versuchsergebnisse der Penetration der Bindemittel der Tragschichten der Felder 2 und 3 ergaben ähnliche oder fast gleiche Messwerte. Das Bindemittel der Tragschicht im Feld 3 ist deswegen nicht als 70/100 zu klassieren, sondern es handelt sich um ein B50/70.*

### **Schichtdicken**

*Die Schichtdicken wurden durch Bohrkern und durch verschiedene Nivellements geprüft.*

### **Versuche an der Oberfläche**

*Während und nach dem Einbau wurden Versuche durchgeführt um die mechanische Antwort und den Zustand des Belages und der darunter liegenden Schichten zu prüfen. Die Ergebnisse zeigen in allgemeinen dass der Boden nicht so gut verdichtet wurde (die Setzungen nehmen in diesem Fall auch in der Erstbelastungskurve mit zunehmender Belastung ab,  $ME2/ME1 \gg 2.5$ ). Beim Feld 4 (neben der Zone wo die Verstopfung der Drainage stattgefunden hat), war der Boden schwächer als in den anderen Feldern. Die Gefälle des Querschnitts könnte auch eine Rolle gespielt haben, da auch Scherkräfte in diesem Fall vorhanden sind.*

*Um die Homogenität der Verdichtung zu überprüfen wurden auch einige Messungen mit Gerät ZFG 2000 der Firma Viagroup gemacht.*

*Die Messungen wurden alle 6 Meter in der Mitte der Fahrbahn durchgeführt. Die Resultate (Kalibrierung mit der Hilfe des Plattendruckversuches durch einen Korrekturfaktor der 1.8 beträgt) zeigen eine gute Homogenität der Verdichtung.*

## Benkelman-Versuche

Die Benkelman-Versuche wurden gerade nach dem Einbau durchgeführt und danach regelmässig während dem normalen Betrieb. Die Korrekturfaktoren wurden nicht angewendet, da die Temperaturen dies nicht immer erlaubten. Die Veränderung der mechanischen Eigenschaften des Belages ist aus diesem Grund nur im Zusammenhang mit der Temperatur des Belages zu bewerten.

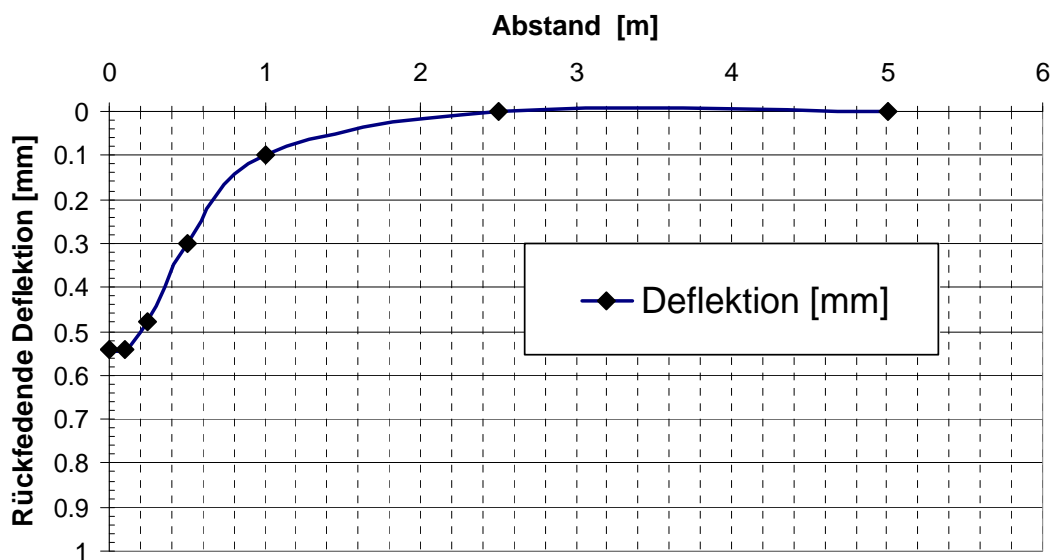


Bild 8 Typisches Ergebnis aus einem Benkelman-Versuch

Die Resultate zeigen, dass eine klare und definitive Aussage über die mechanische Antwort der Materialien, „a priori“ nicht möglich ist. Einerseits liegt der Balken in der Einflussmulde, andererseits erfährt der Belag zwischen den Zwillingsrädern durch die grosse Beanspruchung der Auflast zum Teil eine nicht vernachlässigbare Hebung. Insbesondere könnte dieses Phänomen dort stattfinden, wo die Tragschicht eine geringere Steifigkeit hat und deswegen zu einer falschen Darstellung der mechanischen Eigenschaften der Felder führen.

## **Messungen der Oberflächengeometrie**

*Vor dem Beginn der Belastungen der Felder und periodisch während dem Betrieb wurden die geometrischen Grössen Querebenheit und Längsebenheit der Oberflächen und deren Änderungen gemessen. Diese Messungen wurden mittels Präzisions-Nivellement durchgeführt.*

### **Querebenheitsmessungen**

*Querebenheitsmessungen wurden mit der Hilfe eines so genannten Planumgeräts durchgeführt. Die erste Messkampagne, nach 110000 Umdrehungen zeigte schon sehr tiefe Spurrinnen. Nach dieser ersten Materialeinsenkung fand während des Betriebs nur noch eine relative kleine Zunahme der Spurrinnen statt. Das ist durch den bedeutenden initialen Nachverdichtungsprozess und die sehr hohen Temperaturen des Sommers zu erklären. Einige Felder wurden aufgrund der Bäume am Rand der Strecke durch die Besonnung weniger aufgeheizt, dieser Umstand führte dann zu bedeutenden Verformungen im Feld 4 und 5 am folgenden Sommer, da alle Bäume am Rand der Teststrecke im Frühjahr gefällt wurden.*

*Für die Darstellung in diesem Bericht wurden die Bilder der Spurrinnen digitalisiert. Die Spurrinnenbildung wurde auch so ausgewertet, dass die Bilder immer eine Differenz zwischen der ersten Aufnahme des Querschnittes und den nachfolgenden Aufnahmewerten darstellen. Mit Hilfe dieser Darstellung ist es nun möglich eine Bilanz zwischen den Senkungen und den Hebungen aufgrund der Prozesse der Spurrinnenbildung nachzurechnen.*

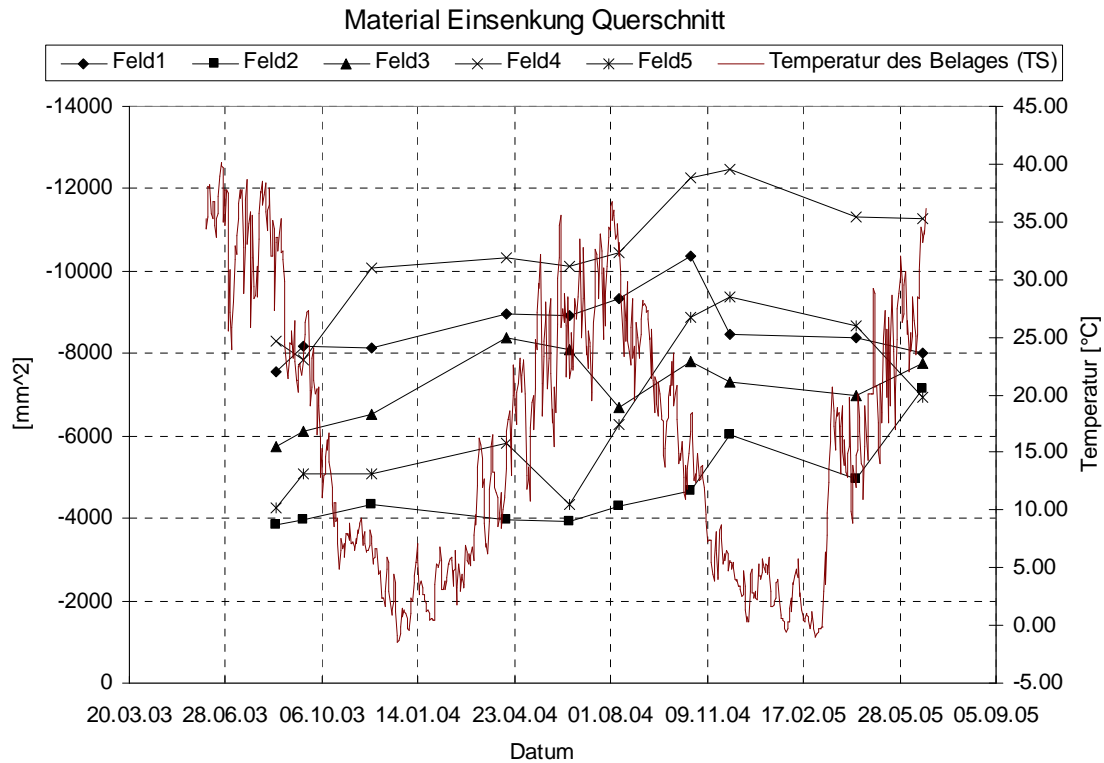
*Der Anteil der Spurrinnen welcher aus der Nachverdichtung stammt und derjenige welcher aus der seitlichen Materialverdrängung resultiert sind voneinander trennbar.*

*Man kann beobachten, dass die Spurrinntiefe nicht weiter zunimmt, während die gesamte eingedrückte Fläche im Laufe der Zeit kontinuierlich wächst.*

*Dies ist damit zu erklären, dass die Lastverteilung zuerst mehr die zentrale Spur beanspruchte, mit der Zeit jedoch wurden auch die Randspuren immer mehr befahren. Deswegen nehmen die Einsenkungen auch am Rand der Mittelspur zu.*

*Es ist zu beachten, dass die effektive Dicke der Schichten sowie die Bedingungen der Temperatur für jedes Feld auch eine entscheidende Rolle in der Spurrinnenbildung spielen können. Angenommen, dass kleine Unterschiede (Klima, Schichtdicke, Steifigkeit des Untergrundes und der Foundationsschicht) zwischen den einzelnen Feldern bestehen, was ausser den Bindemittelvariationen nicht erwünscht war, kann man trotzdem durch diese Auswertungen beweisen, dass die Aufbauten der Felder 2 und 5 sich besser verhalten haben und die entsprechenden Bindemittel in diesem Bereich zu besseren Ergebnissen führten.*

*Es ist weiter zu beachten, dass die Tragschicht im Feld 4 tatsächlich eine kleinere Dicke hat, trotzdem können die Unterschiede in einigen Fällen in den Schichtdicken die deutlichen Differenzen zwischen den spezifischen Verhalten der einzelnen Felder allein nicht begründen.*

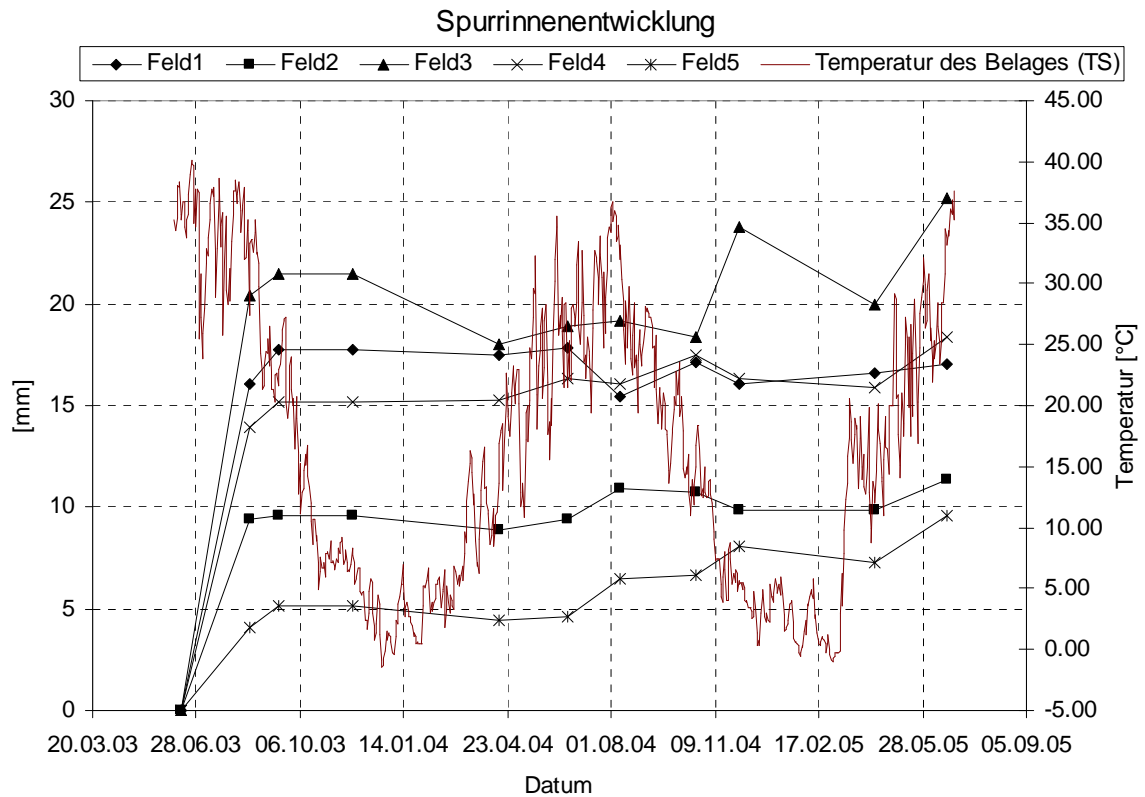


*Bild 9 Senkungen und Hebungen der Oberfläche im Vergleich zum Anfangszustand*

*Der wichtigste Parameter ist die Temperatur, von welchem alle diese Phänomene abhängig sind.*

*Die hohen Sommertemperaturen vom Jahr 2003 haben den Belag sehr stark beansprucht, so dass die Spurrinnenbildung stärker als erwartet war.*

*Im folgenden Jahr 2004 traten kleinere Zunahmen der Spurrinntiefen auf, insbesondere in denjenigen Feldern, die schon stark beansprucht worden waren und deren Oberfläche mehr Sonneneinstrahlung erfahren hatte.*



*Bild 10 Spurrinnen, Entwicklung in den Feldern 1-5*

**Längsprofilmessungen**

*Die Längsprofilmessungen wurden pro Feld aufgenommen und ausgewertet, mit der Ausnahme derjenigen, die in der Übergangszone lagen. Insgesamt wurden circa 500 Punkte auf der Oberfläche markiert, deren Höhe regelmässig kontrolliert wurde.*

*Der Referenzpunkt befand sich am Rand der Betonwanne, bei der Instrumentierungszone des Feldes Nr. 1.*



*Bild 11 : Messpunkte der Längsebenheit (weiss, in der Mitte der Fahrbahn)*

### **Profiländerungen**

*Das Profil wurde infolge der schwierigen Einbaubedingungen sehr unregelmässig.*

*Die verschiedene Feldeinsenkungen wurden über die ganze Länge eines Feldes gemittelt, dadurch entsteht der mittlere Wert.*

*Der Temperatureinfluss ist deutlich erkennbar, die mittlere Einsenkung nimmt mit zunehmenden Temperaturen zu, wobei in der Frostauftauperiode die Tragfähigkeitsverminderung auch einen wichtigen Einfluss gehabt haben kann.*

### **Längsebenheit**

*Die Längsebenheit wird durch den  $s_w$  Wert beschrieben. Die Variation wurde durch regelmässige Nivellements untersucht. Die Felder haben schon am Anfang einen sehr hohen  $s_w$  Wert gezeigt, da der Einbau aufgrund der besonderen Geometrie der Strecke kompliziert war. Im Allgemeinen nehmen die  $s_w$  Werte mit den hohen Temperaturen zu. Im Winter jedoch nehmen sie normalerweise ab oder bleiben stabil.*

## Beurteilung der Versuchsanlage und Messergebnisse

*Die erhaltenen Resultate aus dem Grossversuch sind bis auf wenige Schwierigkeiten zufriedenstellend bis aussagekräftig. Die einzelnen Probleme sind nachstehend genannt:*

*Ein optimaler Einbau der Felder war aufgrund der schwierigen Einbaubedingungen nur zum Teil zu erreichen: Es ist bekannt, dass zu den heiklen Punkten für die Einbauarbeiten die runde Geometrie (enger Radius) der Strecke und die relativ enge Fahrstreifenbreite gehören. Zusätzlich zeigte sich an einigen Stellen eine nicht optimal arbeitende Drainage. Die Wiederherstellung der vollen Funktionstüchtigkeit der Drainage ist leider nur teilweise gelungen.*

*Die Schichtstärke der Felder war nicht durchwegs gleich, wie dies geplant und gewünscht wurde. Durch den engen Zeitplan, konnten die gewünschten Genauigkeiten nicht überall eingehalten werden. Die Dicke der einzelnen Schichten und der Felder wurde anhand von Bohrkernen und mittels Nivellement genau gemessen und die effektiven Schichtstärken wurden in die Berechnungen eingeführt.*

*Mittels Laboranalysen des Tragschichtmaterials wurde festgestellt, dass das HMT-Material des Feldes 3 die gewünschten Anforderungen nicht vollständig erfüllt. Die am rückgewonnenen Bindemittel der Tragschichten 2 und 3 zeigen bei 25°C ähnliche Penetrationswerte. Dabei sollte der Unterschied in den Feldern 2 und 3 nur bei der Härte des Bindemittels bestehen.*

*In den Felder 3 und 4 wurden geringere Tragfähigkeitseigenschaften des Untergrundes gemessen und konnten auch so rückgerechnet werden. Die Plattendruckversuche und die dynamischen Fallgewichtsversuche auf der Foundationsschicht haben eine gute aber zum Teil leicht unterschiedliche Verdichtung gezeigt (wie im vorhergehenden Fall bei den Felder 3 und 4).*

*Die Besonnung der Felder war im ersten Sommer 2003 für die Felder 4 und 5 weniger gravierend. Die Bäume am Rand der Strecke wurden im Frühjahr 2004 entfernt. Die Temperaturen wurden für alle Felder bei unterschiedlichen Tiefen kontinuierlich gemessen. Alle Sensor- und Tragfähigkeitsversuche wurden zu den jeweiligen Temperaturen ausgewertet.*

## Auswertung nach AASHTO

### Befahrbarkeitsindex ( PSI )

Die Befahrbarkeit stellt eine empirische Beschreibung des Oberflächenzustands der Straßenoberfläche dar. Die Anzahl der Überrollungen sowie die Alterung der gebundenen Materialien führen zu einer progressiven Zerstörung des Oberbaus: Unebenheiten, Verdrückungen, Spurrinnen, Risse, Schlaglöcher verschlechtern im Laufe der Zeit die Befahrbarkeit der Straßenoberfläche.

Die Befahrbarkeit nach AASHTO wird durch den PSI (present serviceability index) bewertet. Der PSI Wert basiert auf objektiv gemessenen Größen sowie auch teilweise auf subjektiven Beobachtungen.

Der PSI-Wert wird mit der folgenden Formel berechnet:

$$PSI = 5.03 - 1.91 \cdot \log(1 + SV) - 0.01 \cdot \sqrt{CP} - 1.38 \cdot RD^2$$

Wobei: (Objektive Beobachtungen)

SV:  $0.67Sw^2$

Sw: Standardabweichung des Winkelwertes W,

C+P: Risse und Flickstellen

RD: Rinnentiefe (Rut Depth) in Zoll

Die PSI Werte liegen zwischen 0 (sehr schlecht) und 5 (sehr gut)

Bild 12 und Bild 13 zeigen die zeitliche Entwicklung des Befahrbarkeitsindex (PSI) während der gesamten Versuchsdauer. Die Anfangsbefahrbarkeit war für die Felder unterschiedlich: die PSI Werte variieren zwischen 3.5 (Feld 1-3-5), 4 (Feld 4) und 4.3 (Feld 2). Die Felder 1 und 3 werden relativ schnell an eine Grenze (Zumutbarkeit) der Befahrbarkeit geführt: (PSI = 1.5). Im Feld 3 spielen die Spurrinnen eine wichtigere Rolle, im Feld 1 die Längsunebenheiten. Es muss aber erwähnt werden, dass die Spurrinnentiefen im Feld 3 sehr stark von der Materialhebung am Rand der Fahrbahn verursacht wurden.

Das Feld 3 hat während des Versuches eine Verbesserung der Befahrbarkeit erfahren: im Jahr 2004 wurden die Spurrinnen weniger tief (die Materialhebungen kleiner) und die Längsunebenheit flacher. Am Ende des Versuches erreichten die Felder 1,3,4 das Ende der Gebrauchsdauer. Die Felder 2 und 5 waren am Ende des Versuches noch in einem relativen guten Zustand, insbesondere Feld 5 wo keine merkbaren Änderungen des PSI gemessen wurden.

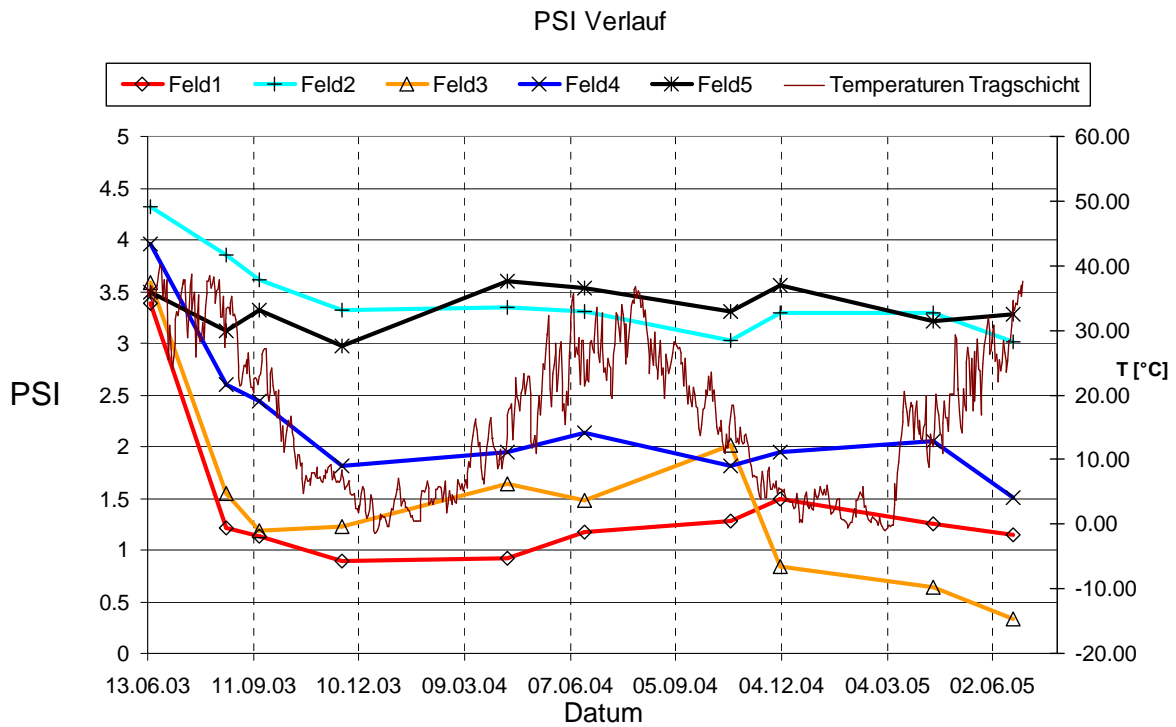


Bild 12 PSI Wert Entwicklung versus Temperatur

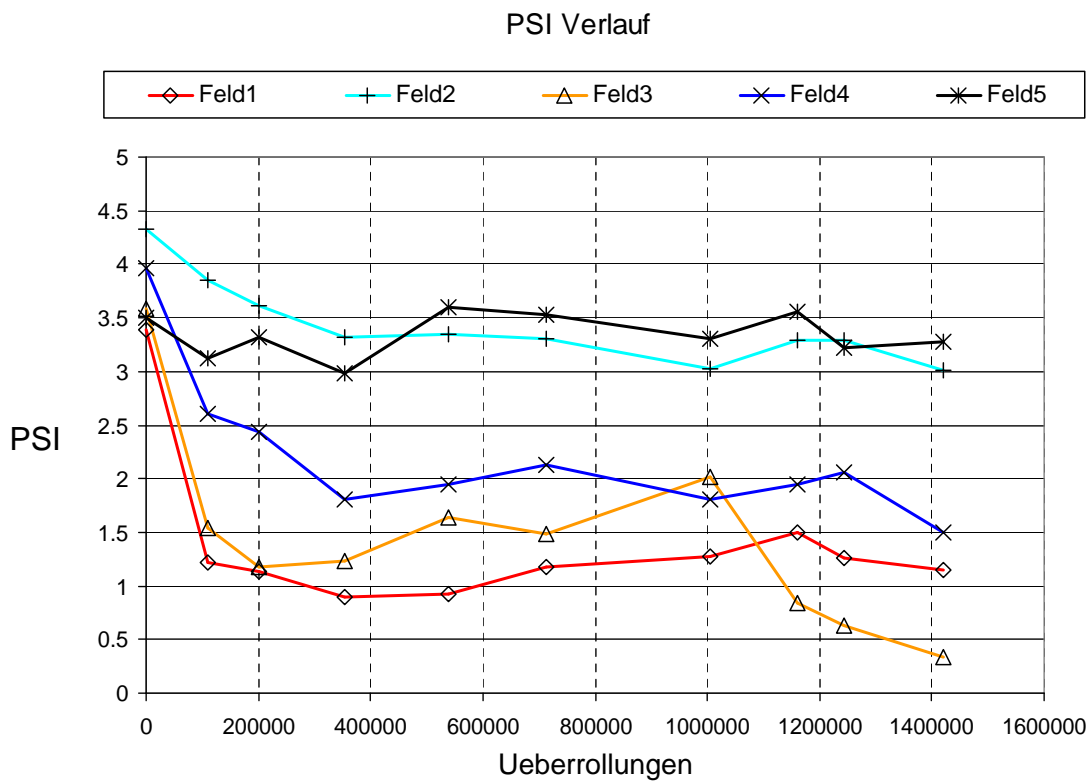


Bild 13 PSI Wert Entwicklung (Anzahl Überrollungen)

## Folgerungen

Der Grossversuch Rundlauf Nr. 7 hatte zum Ziel, fünf verschiedene, gebräuchliche, bituminös gebundene Tragschichten miteinander zu vergleichen und deren Eigenschaften zu ermitteln.

Es handelt sich um fünf Versuchsfelder mit denselben Unterbauten, denselben Foundationsschichten und denselben Deckschichten. Alle Schichtdicken in den fünf Feldern haben dieselbe Grösse. Der Unterschied zwischen den fünf Aufbauten besteht allein in der Art der bitumenhaltigen Tragschicht. Leider konnten nicht alle Elemente der Gleichheit im gewünschten Mass durchgezogen werden. Insbesondere die Tragfähigkeit auf Planum und Foundationsschicht des Feldes 4 entsprachen nicht den gewünschten Werten. Die Tragschichten unterschieden sich in der Gesteinskörnung und in der Härte und Art der Bindemittel.

*Feld 1: gebrochener Fluvialkies mit Bindemittel B50/70*

*Feld 2: Felsgebrochener Splitt mit Bindemittel B50/70*

*Feld 3: Felsgebrochener Splitt mit Bindemittel B50/70 (geplant B70/100)*

*Feld 4: Felsgebrochener Splitt mit polymermodifiziertem Bindemittel*

*Feld 5: Felsgebrochener Splitt, EME2*

*Durch den Start des Grossversuches in der heissesten Temperaturperiode des „heissen“ Sommers 2003, wurden zusätzlich verschärfende Verhältnisse simuliert.*

*Im folgenden sind die Resultate schlagwortartig wiedergegeben. Die Versuche und die Berechnungen lassen sich kurz wie folgend charakterisieren. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass wegen verschiedener Einflüsse und Bedingungen die Resultate teilweise interpretiert werden müssen:*

*Feld 5 mit dem Spezialbindemittel EME2 zeigt das beste Verhalten bezüglich Verformungen und Temperaturstabilität. Dies konnte sowohl mit den geometrischen und physikalischen Messungen im Feld als auch mit der numerischen Rückrechnung gezeigt werden. Die Resultate stimmen gut mit den Laborresultaten überein.*

*Feld 1 mit dem gebrochenen Fluvialkies und Bindemittel B50/70 zeigt ein schlechtes Verhalten. Schon bald nach dem Beginn des Versuches traten massive Spurrinnen auf.*

*Feld 3 mit felsgebrochener Gesteinskörnung und Bindemittel B50/70 (eigentlich war ein B70/100 vorgesehen) zeigt ein schlechtes Verhalten. Aufgrund der Penetration am rückgewonnenen Bindemittel wurde ein B50/70 geliefert.*

*Feld 2 mit felsgebrochener Gesteinskörnung und Bindemittel B50/70 zeigt ein gutes Verhalten. Die Tragschicht dieses Feldes wird bei tiefen Temperaturen relativ steif. Dies ist im Gegensatz zu Feld 5, wo die Steifigkeit weniger abhängig von der Temperatur ist.*

*Feld 4 mit felsgebrochener Gesteinskörnung und polymermodifizierten Bitumen verhält sich schlecht gegenüber Spurrinnenbildung.*

Kurzbewertung der Versuchsfelder nach 1.4 Mio Achslastübergängen

Feld	Aufbau	Spurrinntiefe	DMS (*)	LVDT (**)	PSI	Moduli (***)	Gesamt- bewertung	Bemerkungen
		[mm]	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]		[MPa]		
1	HMT 22 B50/70 teilw. gebr.	17	170	(-)	1.15	1547	mittel	Me-Wert auf Planum = 42 Me-Wert auf Planie = 105 Hohlraumgehalt obere Tragschicht ungenügend
2	HMT 22 B50/70 100% gebr.	11	40	2300	3.01	2839	gut	Me-Wert auf Planum = 53 Me-Wert auf Planie = 79
3	HMT 22 B50/70 100% gebr.	25	80	3250	0.33	2718	(-)	Me-Wert auf Planum = 38 Me-Wert auf Planie = 74 Weitere Untersuchungen am Mischgut wünschenswert
4	HMT 22 PmB 100% gebr.	18	100	2800	1.50	990	mittel	Me-Wert auf Planum = 36 Me-Wert auf Planie = 52
5	HMT 22 EME 2 100% gebr.	10	35	2200	3.28	4380	Sehr gut	Me-Wert auf Planum = 52 Me-Wert auf Planie = 99

\* Rückgerechnete Elastizitätsmoduli bei  $\approx 25^\circ$

\*\* DMS auf der Unterfläche der Tragschicht,  $T \approx 36^\circ$ , Geschw. = 25 km/h

\*\*\*  $\approx 160$  sec Wartezeit,  $T \approx 20^\circ$ , Sensor im Feld 1 nicht zuverlässig (ausser Messbereich)

*Der Grossversuch zeigt recht eindrücklich die unterschiedliche Aussagekraft von verschiedenen Standardversuchen und die Verbesserung der Interpretation der Resultate mittels Kombinieren von Feldversuchen und numerischer Modellierung.*

*Ziel des Forschungsprojektes 4 war es, den Einfluss von verschiedenen Tragschicht Materialien und den Einfluss verschiedener Bindemittel auf die gesamte Strassenstruktur zu quantifizieren. Dieses Ziel konnte mit geringen Abstrichen erreicht werden. Die Grundidee des Forschungsprojektes war, dass alle eingebauten Felder den gleichen Aufbau und bis auf die verschiedenen Tragschichten auch gleiche Materialeigenschaften hatten. Ferner sollten die fünf Versuchsfelder mit der gleichen Anzahl und Schwere von Achslasten befahren werden und die gleichen Temperaturzyklen durchmachen. Leider konnten nicht alle gewünschten Elemente durchgesetzt werden. So stellten wir zum Beispiel gewisse Ungleichheiten in den Tragfähigkeitseigenschaften des Unterbaus und der Foundationsschichten fest. Ein weiterer Abstrich an der Aussagekraft ist die Tatsache, dass das Tragschichtmischgut in Feld 3 nicht den gewünschten Anforderungen entsprach.*

*Der Verlauf der Spurrinntentiefe zeigt bei den Feldern 2 und 5 die niedrigste und bei Feld 3 die grössten Werte. Im Feld 5 wurde das Material fast nur eingesenkt oder zusammengedrückt und nicht seitlich aufgewölbt. Die Aufwölbung des Materials spielt eine sehr grosse Rolle im Feld 3.*

*Die Nivellments in Längsrichtung zeigen, dass in den Feldern 3 und 4 eine grössere Einsenkung entstanden ist. Dies ist vermutlich auf die geringere Verdichtung und Tragfähigkeit des Untergrundes zurückzuführen. Die Felder 3 und 4 hätten damit in der gesamten Struktur als ganzes eine geringe Setzung aufgewiesen.*

*Die Längsebenheit der Felder war schon am anfangs für alle Felder relativ schlecht ( $>3$ ). Die  $S_w$  Werte haben dann im Allgemeinen im Sommer etwas zugenommen und im Winter sind sie stabil geblieben.*

*Zu den Hauptversuchen für die Tragfähigkeit der Oberbauten zählen die regelmässig durchgeführten Deflektionsmessungen mittels Benkelman-Balken. Im Feld 5 wurde bei hohen Temperaturen die niedrigste Einsenkung unter der Last gemessen. Die Form der Einflussmulde wurde auch gemessen und gilt als Basis für die numerische Rückrechnung. Nachteile und Beschränkungen des Versuchs wurden auch erwähnt.*

*Die mechanischen Eigenschaften des Oberbaus wurden zusätzlich mit Dehnungsmessstreifen und vertikalen Verformungssensoren untersucht. Dehnungsmessstreifen die auf der Oberfläche positioniert wurden zeigten den Einfluss der steiferen Tragschicht auf die Verformungsausbreitung neben der Last.*

*Die speziell entwickelten Verformungssensoren für die Messung der vertikalen Verformung haben interessante Ergebnisse für die Beurteilung der Tragschicht und für die numerische Rückrechnung gebracht. Es wurden unterschiedliche plastische Komponenten der statischen und dynamischen Verformung der Felder 2 und 3 gemessen, obwohl diese aufgrund der Materialuntersuchungen ähnliche mechanische Eigenschaften haben sollten. Die elastische Komponente wurde für beide Felder gleich gemessen.*

*Durch Anwendung der traditionellen AASHTO Analyse der Befahrbarkeit (PSI Index) wurde folgendes festgestellt: Feld 2 und 5 waren am Ende des Versuches noch funktionstüchtig (PSI >3). Der PSI Wert hat im Feld 4 langsam abgenommen, am Ende des Versuches lag aber sein Wert nahe bei 1.5 (Endzustand). Feld 1 hat sehr bald nach Beginn des Befahrens am Anfang des Versuches seine Funktionstüchtigkeit verloren. Später ist der Verlauf dann einigermaßen stabil geblieben. Feld 3 hat auch am Anfang sehr grosse Verschlechterungen des Oberflächenzustandes gezeigt, anschliessend ist der PSI Wert wieder leicht gestiegen. Am Ende des Versuches war die Oberfläche von Feld 3 fast komplett zerstört (PSI <0.5).*

*Zusätzlich wurde eine numerische Analyse der Versuchsergebnisse durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen geben einen besseren Überblick über die effektiven mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Tragschichten. Damit konnten die festgestellten Eigenschaften und Verhalten der 5 Felder recht präzise erklärt werden. Die Deflektionsmulden wurden mit dem FE Programm ABAQUS unter Verwendung eines Optimierungsalgorithmus rückgerechnet. Zu den wichtigsten Ergebnissen dieser Analyse gehört die Feststellung, dass die Tragschichten in Feld 2 und 3 ähnliche Tragfähigkeitseigenschaften haben. Die unterschiedlichen Leistungen der Schichtenpakete im Feld 2 und 3 sind auf unterschiedlich tragfähigen Untergrund und auf die nicht linearelastischen Eigenschaften der gebundenen Materialien zurückzuführen. Aufgrund von Rückrechnungen wurde in der Sommerperiode in Feld 5 der grösste E Modul berechnet.*

### **Hinweis**

*Der Rundlaufsversuch Nr. 7 war der letzte Versuch mit dieser Anlage und wurde am 20. Juni 2005 mit nahezu 1,5 Millionen (1420548) Überrollungen abgeschlossen. Die Rundlaufanlage wurde im Juli 2005 abgebaut.*

## **6. FP 6, UMSETZUNG Projekt „Griffigkeitsmessungen“ VERGLEICH VON GRIFFIGKEITSMESSUNGEN SRM / SCRIM**

IVT der ETHZ, Zürich

### **I PROJEKTBESCHRIEB**

#### **1. Ausgangslage**

Im Rahmen der Zustandserfassung und –Bewertung der Fahrbahnen der Nationalstrassen (ZEB-NS) ist eine netzweite Erhebung der Griffigkeit auf allen Fahrstreifen vorgesehen.

Die Griffigkeit wurde bis anhin in der Schweiz mit den Messgeräten Skiddometer und SRM (Stuttgarter Reibungsmesser) erhoben. Es besteht ein grosser Erfahrungsschatz mit diesen Messsystemen. In Europa werden neben den SRM-Messgeräten aber auch SCRIM-Messsysteme (Schräglaufrad; Sidewayforce Coefficient Routine Investigation Machine) eingesetzt. In der Schweiz bestehen keine Erfahrungen mit diesen Messsystemen.

Im Zusammenhang mit der netzweiten Erhebung der Griffigkeit auf den Schweizerischen Nationalstrassen (ZEB-NS) stellte sich bei einem Messumfang von rund 6000 km Fahrstreifen grundsätzlich die Frage der Wahl des einzusetzenden Messsystems. Das vorliegende Forschungsprojekt sollte deshalb einerseits die Fragen der Zweckmässigkeit des Messeinsatzes von SCRIM-Messgeräten auf den Schweizerischen Nationalstrassen bei einer netzweiten Erhebung beantworten. Andererseits war es dabei gleichzeitig zwingend notwendig, den Zusammenhang zwischen bisheriger Erhebungs- und Beurteilungspraxis (Skiddometer bzw. SRM) und SCRIM-Erhebungsergebnissen festzustellen. Damit sollte die Grundlage geschaffen werden, einerseits die umfangreichen Messergebnisse im Schweizerischen Griffigkeitshintergrund zu verwenden, andererseits die Beurteilung der erhobenen Zustände anhand der gültigen Normen durchführen zu können.

#### **2. Zielsetzung**

- Prüfung der Zweckmässigkeit eines SCRIM-Einsatzes für die netzweite Erhebung der Griffigkeit auf den Nationalstrassen der Schweiz.
- Ableitung des Zusammenhangs zwischen den Griffigkeitsmesswerten der beiden Messsysteme SCRIM und SRM für Nationalstrassen.
- Beurteilung der Genauigkeit von SCRIM-Messungen für die Verwendung der Frage der Verkehrssicherheit sowohl auf Netz- als auch auf Projektebene.

Damit sollten Entscheidungsgrundlagen für die Durchführung der netzweiten Erhebung der Griffigkeit auf den Schweizerischen Nationalstrassen, insbesondere auch bezüglich Ausschreibung der Arbeiten (zugelassene Messgeräte) erarbeitet und bereitgestellt werden.

In Anbetracht der Ausschreibung der netzweiten Erhebung der Griffigkeit auf den Fahrbahnen der Nationalstrassen wurde vereinbart, die Erhebungen rasch im Verlaufe des Sommers 2000 durchzuführen, die Resultate bis Ende 2000 auszuwerten und die Entscheidungsgrundlagen für die Ausschreibung im Rahmen der gesamtschweizerischen Erhebungen ZEB-NS möglichst rasch und dabei auch zumindest im Grundsatz aufzuarbeiten und bereitzustellen.

## **3. Geplantes Vorgehen und Projektumfang**

### **3.1 Grundsätze**

Einerseits sollten vor allem die heute gebräuchlichsten Belagsarten in die Untersuchung einbezogen werden und dabei die Griffigkeit auf jeweils einem mindestens 2 km langen Abschnitt erfasst werden. Die Erhebungen mit beiden Messgeräten sollten zu den gleichen Zeitpunkten durchgeführt werden, um äussere Einflüsse möglichst weitgehend auszuschalten.

Andererseits war es nötig, Erhebungsergebnisse im ganzen Bereich der Werte der Griffigkeitsskala zu erfassen, um die angestrebten Zusammenhänge ableiten zu können. Wo sich die Abschnitte mit mittleren bis schlechten Griffigkeitswerten befinden ist indessen weitgehend unbekannt. Hinweise auf solche Stellen oder Abschnitte liessen sich allenfalls aus der netzweiten Unfalluntersuchung finden, die im Rahmen der ZEB-NS (Auftrag 8) vorgesehen war.

### **3.2 Messumfang**

Ausgehend von rund 10 verschiedenen Belagsarten sollten je Belag mindestens 1-2 Messungen (2 km) in zumindest vier Niveaustufen der Griffigkeit 0.35 bis 0.75 bei den Messgeschwindigkeiten 80 km/h und 60 km/h durchgeführt werden.

Dies führte zu einem Messumfang von ca. 320 Messkilometern, der mit beiden Fahrzeugen zu erfassen war.

Dies entspricht auch 40 Messabschnitten, wo je Messsystem je 1-2 Fahrten bei 80 km/h und bei 60 km/h über eine Strecke von 2 km durchzuführen waren.

Die Messungen sollten sich örtlich auf einem grossen Teil des Nationalstrassennetzes verteilen, sodass ein erheblicher Aufwand von Leerfahrten zu erwarten war.

Dieser Messumfang war erforderlich um eine fundierte Aussage über die Zusammenhänge von Messergebnissen mit den beiden Messgeräten SCRIM und SRM zu gewinnen.

### **3.3 Auswertung und Analysen**

Die Auswertung der Erhebungen sollten getrennt und nach Vorgaben der Projektleitung für beide Messsysteme durchgeführt werden.

Die Analysen sollten zentral am IVT aufgrund der Mess- und Auswertergebnisse vorgenommen werden. Als Hauptergebnis sollte der Zusammenhang zwischen den Mess- und Auswertergebnissen der Erhebungen mit dem SCRIM-Messsystem und denjenigen mit dem SRM dargestellt werden.

### 3.4 Ablauf der Messungen

Die Erhebungen sollten mit den beiden Messsystemen gleichzeitig (hintereinander gefahren) auf den ausgewählten Strecken durchgeführt werden, so dass äussere Einflüsse ausgeschaltet werden können. Die Auswertungen der Messergebnisse sollte laufend nach den Messungen erfolgen, damit Anpassungen am Messprogramm möglich blieben.

Die Messequipen für SCRIM und SRM konnten bei der Messung selbständig arbeiten. Die Messungen wurden aber zeitlich und örtlich koordiniert durch die Projektleitung angesetzt. Die Absprachen mit den zuständigen Behörden erfolgten durch die Projektleitung.

## 4. Zeitplan

Die Auswahl der für die Erhebungen nötigen Messstrecken sollte einerseits aufgrund von entsprechenden Abklärungen bezüglich Belagsart, vorhandenen Kenntnissen früherer Griffigkeitsmessungen und aufgrund der Ergebnisse der visuellen Zustandserfassung des Belages erfolgen.

Andererseits würde der Auftrag Nr. 8 der ZEB-NS Ergebnisse zum Unfallgeschehen liefern, speziell zu Häufungen von Unfällen bei nasser Fahrbahn die allenfalls im Zusammenhang mit kritischen Griffigkeitswerten stehen. Damit würden sich möglicherweise Stellen im Nationalstrassennetz lokalisieren lassen, die mangelnde Griffigkeitseigenschaften aufweisen.

Aufgrund dieser Grundlagen konnte ein erstes Messprogramm formuliert werden, das laufendanpassungsfähig bliebe.

Ausgehend vom erforderlichen Messumfang (vgl. 3.2) lassen sich ca. 4 Messstellen pro Tag durchführen. Aufgrund der weit verteilten Lage der Messstellen war jeweils mit ½ bis 1 Tag Vorbereitung / Auswertung zu rechnen, so dass 10 bis max. 15 Mess-/ Auswertetage resultierten.

Es war somit folgender Zeitplan vorgesehen:

- |  |         |
|--|---------|
| - Vorbereitung / Auswahl Messstrecken                            | 2 Mt.   |
| - Durchführung der Erhebungen (je nach Wetter) Verhältnisse max. | 1-2 Mt. |
| - Gesamtauswertungen und Analysen                                | 3 Mt.   |
| - Bericht  | 1 Mt.   |

**Die Durchführung des Forschungsauftrages sollte somit 7-8 Monate erfordern.**

## **II VORGEHEN**

### **5. Untersuchungsmethode, Auswertungen**

#### **5.1 Grundsatz**

Die Erhebungen wurden mit den beiden Messsystemen SRM des IVT der ETH Zürich und mit dem SCRIM der Firma Schniering, Essen, Deutschland gleichzeitig (hintereinander gefahren) auf ausgewählten Strecken durchgeführt. Damit lassen sich äussere Einflüsse wie unterschiedliche Witterungsbedingungen (Temperatur, Fahrbahnbeschaffenheit, etc.) weitgehend ausschalten.

Beide Messsysteme arbeiten aber selbständig, d.h. die Benetzung der Fahrbahn zur Erstellung der erforderlichen Wasserflusssdicke erfolgte getrennt und je Messung separat selbständig während der Messung. Die Messabschnitte sind identisch und die Auswertung erfolgte über die identische Messlänge.

Die Messungen sollten auf den heute gebräuchlichsten Belagsarten auf jeweils mindestens 2 km langen Abschnitten erfolgen, so dass einerseits genügend Messwerte insgesamt, aber andererseits auch bei einer Intervallbildung von 100 m eine genügende Anzahl Werte je Messabschnitt vorlagen. Andererseits war es nötig, Erhebungsergebnisse möglichst im ganzen Bereich der Werte der Griffigkeitsskala zu erfassen, um die angestrebten Zusammenhänge ableiten zu können. Diese Forderung war nur teilweise erfüllbar, weil ja Abschnitte mit mittleren bis schlechten Griffigkeitswerten grundsätzlich eher selten vorliegen und zudem deren Lagen unbekannt sind. Einige Hinweise dazu lieferte das Bundesamt für Strassen. Im Weiteren liessen sich aus der IVT -Griffigkeitsdatenbank weitere Hinweise finden. Die Auswahl der Messstellen erwies sich unter diesen Umständen als äusserst schwierig.

#### **5.2 Messsysteme**

Es wurden die beiden Messsysteme SRM (Stuttgarter Reibungsmesser) des IVT der ETH Zürich und der SCRIM der Firma Schniering, Essen, Deutschland, für die Erhebungen eingesetzt. Das SCRIM-Gerät der Firma Schniering wurde bereits mehrmals erfolgreich bei der netzweiten Erfassung der Griffigkeit auf deutschen Bundesautobahnen (BAB) eingesetzt, so dass damit ebenfalls wie beim SRM der ETH Zürich eine grosse Mess- und Auswertenerfahrung vorhanden ist. Zudem war bekannt, dass dieses Messgerät an einem SRM-Messsystem der BAST (Inzell) kalibriert wird, was im Hinblick auf den Vergleich der Messsysteme SRM und SCRIM im voraus interessant erschien. Dies sollte sich, wie hier später gezeigt wird (Ziffer Testvergleich), als sehr nützlich erweisen.

Die beiden Messsysteme weisen eine vollständig unterschiedliche Messmethode für die Bestimmung der Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche auf.

## Stuttgarter Reibungsmesser (SRM)

### Prinzip

Der SRM besteht aus zwei Schlepprädern (je eines für die linke und die rechte Radspur), an denen bei vorgegebener Wassertiefe die Reibungskraft gemessen wird, woraus unter vorgegebener Radlast der Reibungskoeffizient berechnet wird.

Das Schlepprad weist einen konstanten Bremsschlupf auf: Simulation der Kraftschlussgrenze zwischen den Reifen und der Fahrbahn bei vorgewählter Wassertiefe.

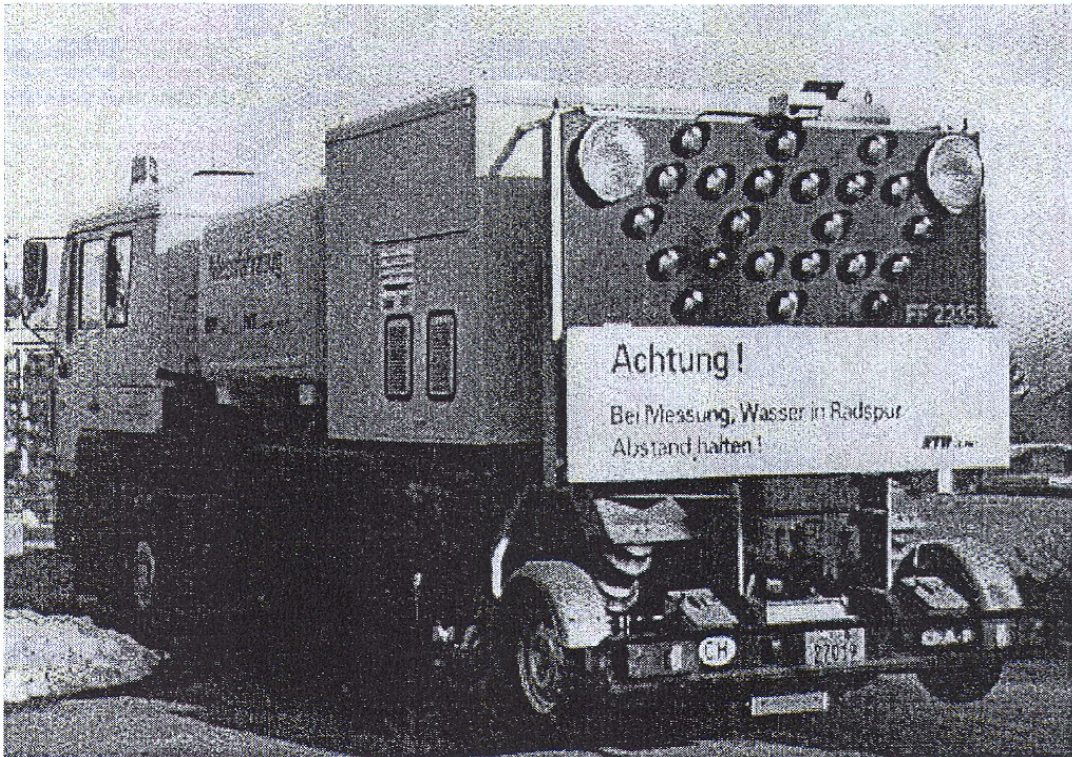


Abb.1 Griffigkeitsmesssystem SRM

## Griffigkeitsmessung mit der SCRIM

Messsystem, Messprinzip und Zustandsgrösse Griffigkeit

Das Messsystem SCRIM (Sidewayforce Coefficient Routine Investigation Machine) verwendet das Prinzip des zur Fahrtrichtung schräggestellten und unter Seitenschlupf abrollenden Messrades (Schräglaufwinkel  $20^\circ$ ).

Das Messrad ist ca. 1.5 m vor der Hinterachse des Träger - LKW montiert. Auf angrenzender Fahrbahnoberfläche wird mit dem profillosen, in der rechten LKW-Rollspur laufenden Messreifen (Reifeninnendruck 3.5 bar) der Seitenreibungsbeiwert bei definierter Sollgeschwindigkeit (BAB: 80 km/h; Bundesstrassen: 60km/h; Stadtstrassen, kommunale Strassen: 40 km/h) ermittelt.

Zur Charakterisierung der Fahrbahngriffigkeit wird der Seitenreibungsbeiwert  $\mu_{\text{SCRIM}}$  bzw. SFC (engl.: Sidewayforce Coefficient) gebildet. Dieser Wert beschreibt das Verhältnis der durch Reibung auf das Messrad einwirkenden Seitenkraft zur Normalkraft des Messrades bei einer Radlast von 200 kg.

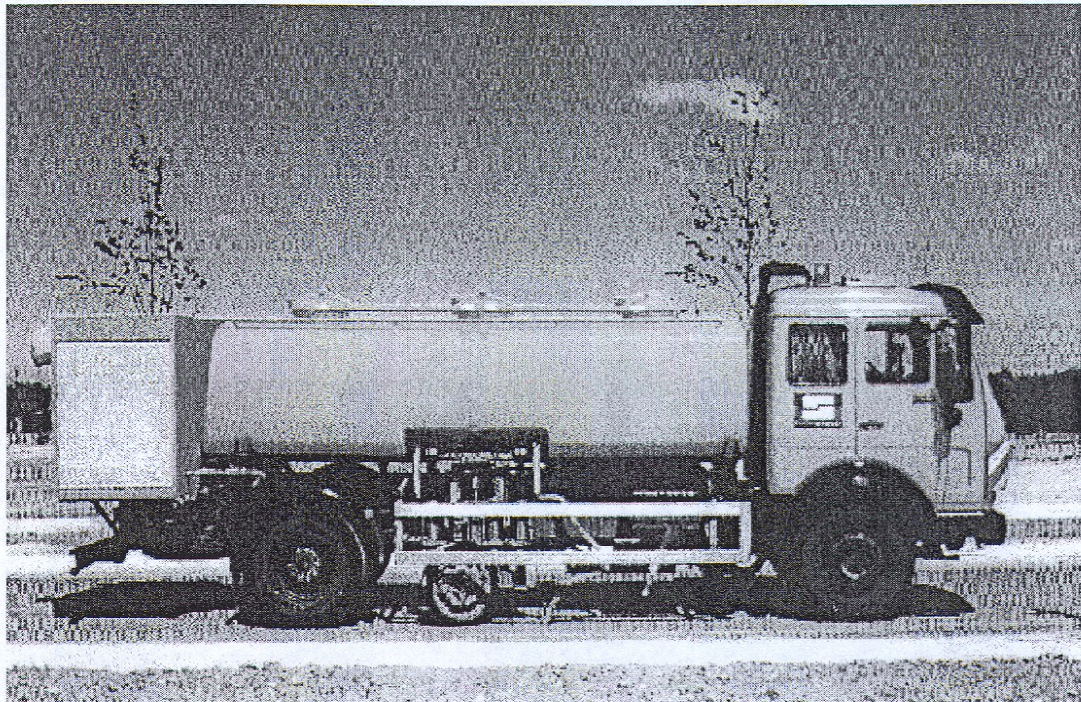


Abb.2: Griffigkeitsmesssystem SCRIM

Das Messsystem Stuttgarter Reibungsmesser bildet echte Bremsungen eines blockierten Rades nach (mit vorgegebenem Schlupf). Damit lässt sich der Griffigkeitswert (Reibungsbeiwert  $\mu$  - SRM) auf nasser Fahrbahn durch Messung der Reibungskraft (blockiertes Rad) bei vorgegebener Radlast direkt bestimmen. Da die Bestimmung manuell und nicht automatisch erfolgt, lassen sich für einen Messabschnitt von 2 km Länge genügend Einzelwerte bestimmen, diese liegen aber nicht in konstanten Abständen zueinander im Messabschnitt.

Beim Messverfahren SCRIM erfährt das Messrad durch Schrägstellung zur Fahrbahnachse einen Schlupf. Damit erfolgt eine Krafteintragung in Richtung Radachse. Diese Kraft wird gemessen und mit ihr der Quotient zur Radlast gebildet. Dieser Quotient wird als Seitenkraftbeiwert dem Griffigkeitswert  $\mu_{\text{SCRIM}}$  gleichgesetzt. Das Gerät ist in der Lage, alle 20 m einen bereits aus mehreren Impulsen gemittelten Einzelwert zu registrieren, womit sich daraus konstante Zwischenabstände auf die Distanz von 2 km sowie in 100 m-Intervallen ergeben.

## 5.3 Auswertungen und Analysen

Die Auswertung der Erhebungen wurde getrennt je Messsystem durchgeführt. Dabei waren grundsätzlich folgende Griffigkeitswerte zu bestimmen:

- Mittelwert über den 2 km-Messabschnitt als arithmetisches Mittel aller registrierten Einzelmesswerte
- 100 m-Intervall-Mittelwerte als arithmetisches Mittel aus den im vorgegebenem Streckenintervall registrierten Einzelmesswerten
- Verlaufskurven über die 2 km-Abschnitte, hergestellt aus den Einzelmesswerten und aus den 100 m-Intervall-Mittelwerten.

Die Analysen dieser Ergebnisse wurden zentral durch die Forschungsstelle vorgenommen. Dabei waren folgende Ergebnisse von vorrangigem Interesse:

- Mittelwertdifferenzen für die 100 m-Intervalle und die 2 km-Abschnitte der Messergebnisse der beiden Messsysteme
- Korrelation der 100 m-Mittelwerte der Messergebnisse der beiden Messsysteme SRM (IVT, ETH Zürich) und SCRIM (Schniering)
- Mittelwertdifferenzen für die 100 m-Mittelwerte, gegliedert nach Belagsart der Messergebnisse der beiden Messsysteme

Diese Hauptgruppen von Ergebnissen sind in Teil m, Ergebnisse, zusammengestellt.

## 6. Auswahl der Messstellen

### 6.1 Anforderungen

Aufgrund der rund 8 am häufigsten vorkommenden Belagsarten sind je Belagsart zur Gruppenbildung etwa 4 bis 5 Messstellen verschiedensten Alters der betreffenden Deckschichten auszuwählen. Dies führte zu rund 40 Messstellen.

In diesen Messstellen sollten mehrheitlich Abschnitte, wo die Höchstgeschwindigkeit bei 120 km/h liegt, vorhanden sein. Die Messgeschwindigkeit beträgt in diesen Abschnitten 80 km/h, welche für die Beurteilung der Griffigkeit auf diesen Nationalstrassenstrecken massgebend ist.

Im Rahmen von Verzweigungsbauwerken (z.B. das Weininger Kreuz, ZH) oder in Agglomerationsbereichen ist die Höchstgeschwindigkeit beschränkt (100 km/h oder 80 km/h). Hier beträgt die Messgeschwindigkeit 60 km/h.

Um Aussagen über das ganze Griffigkeitsspektrum von hoher, sehr guter bis ungenügender, schlechter Griffigkeit zu erhalten, waren die Messstellen sowohl auf alte, kurz vor der Erneuerung stehende als auch neuere Deckschichten (aber mindestens älter als 1 Jahr) zu verteilen.

Schliesslich sollten zur Erzielung repräsentativer Aussagen die Messstellen auch über das ganze Land verteilt sein, um die verschiedensten Witterungseinflüsse mitberücksichtigen zu können.

Mit Hilfe der Kenntnisse über die Belagseinbauten und Deckschichterneuerungen des ASTRA, verschiedener Nachfragen bei Kantonen und unter Verwendung der Griffigkeitsdatenbank der Forschungsstelle konnten die Messstellen (MS) festgelegt werden (Siehe Ziffer 6.2). Sie verteilen sich über die ganze Schweiz und sind wie folgt gruppiert:

### Belagsart, Deckschicht

7 MS Splittmastixasphalt  
6 MS Asphaltbeton  
3 MS Gussasphalt  
10 MS Drainasphalt  
5 MS Hot Rolled Asphalt  
7 MS Microrauhbelag  
1 MS Oberflächenbehandlung  
10 MS Beton

### Messgeschwindigkeit

31 MS Messgeschwindigkeit  
80 km/h  
  
16 MS Messgeschwindigkeit  
60 km/h  
(an 2 Messstellen konnten die  
Messergebnisse nicht ausgewertet  
werden)

## 6.2 Verzeichnis der Messstellen

Die folgende Abbildung zeigt die Lage und Verteilung der Messstellen. Die nachstehende Tabelle gibt Angaben zu den einzelnen Messstellen.

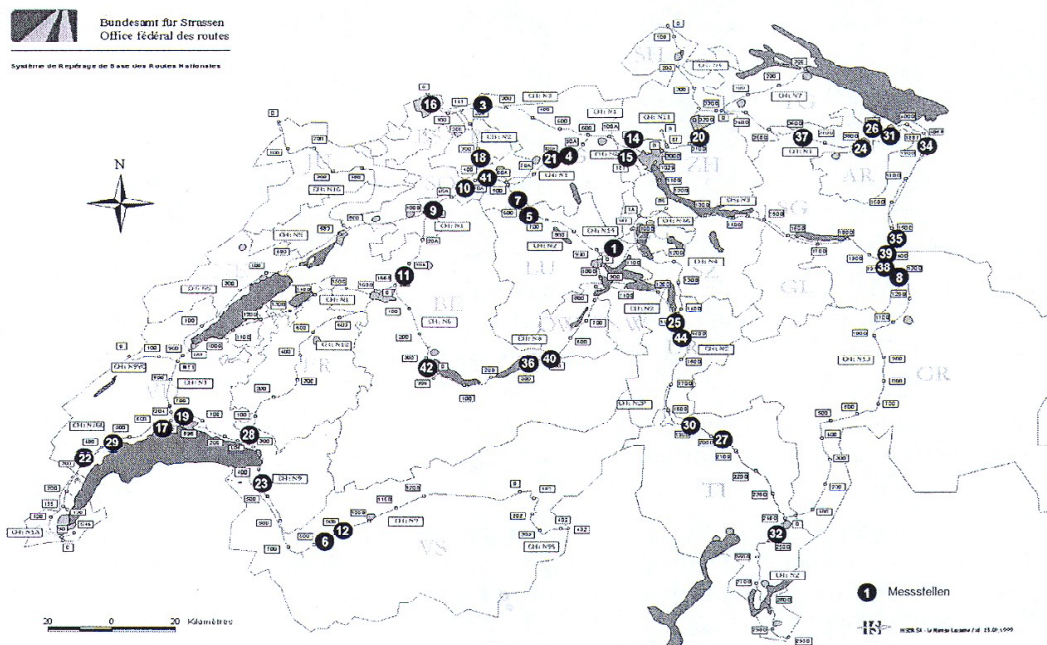


Abb.3: Ausgewählte Messstellen

### III ERGEBNISSE

#### 7. Einleitung

##### 7.1 Auswertungen der Einzelmessstellen und Knotrollen

Grundsätzlich wurden die Auswertungen für alle Messstellen gleich durchgeführt. Dabei wird für eine bestimmte Station (Kilometrierung) ein Griffigkeitswert angegeben, der durch das Messsystem ermittelt wurde. Beim Messsystem SRM folgen sich die Stationen aufgrund der Messmethoden in unregelmässigen Abständen, beim SCRIM-Messsystem wird kontinuierlich alle 20 m ein Messwert registriert. Die Dichte der Messwerte erlaubt Mittelwertbildungen für den ganzen Messabschnitt (2 km) sowie die Aggregation der Einzelmesswerte zu 100 m-Intervall-Mittelwerten. Die Mittelwerte entsprechen jeweils dem arithmetischen Mittel der registrierten Einzelmesswerte für den Abschnitt bzw. das 100 m-Intervall.

Zur Kontrolle der Messung und zur Entdeckung allfälliger Ausreisser von Einzelmesswerten wurden einerseits für sämtliche Messstellen die Verlaufskurven der registrierten Einzelmesswerte von SRM und SCRIM und andererseits der 100 m-Intervallwerte wiederum von SRM und SCRIM einander gegenübergestellt. Die folgende Abbildung zeigt ein Beispiel (Messstelle Nr. 1).

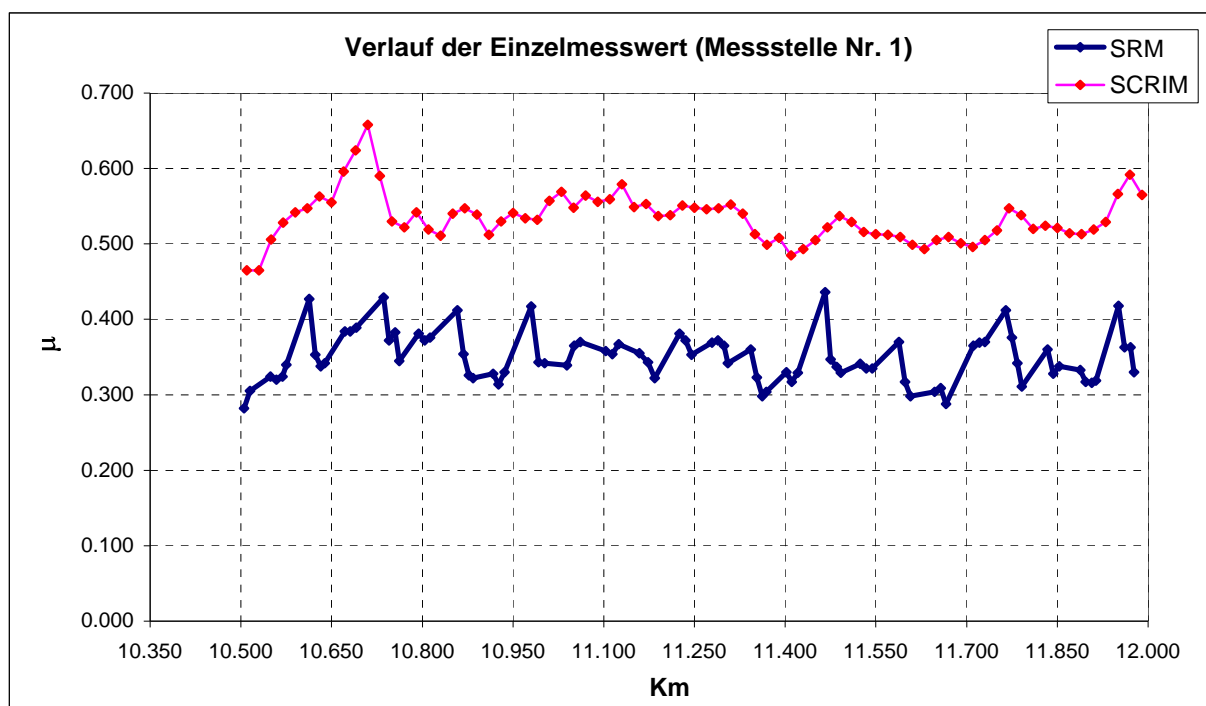


Abb. 4: Gegenüberstellung der Verläufe der Einzelmesswerte der beiden Messsysteme SRM und SCRIM (Beispiel Messstelle Nr. 1)

### 7.3 Mittelwerte und Streuungen der Griffigkeit aller Messstellen (2 km-Abschnitte)

In den folgenden Tabellen sind für die Gesamtheit der Messstellen die Griffigkeitsmittelwerte und deren Streuungen für die 2 km Messabschnitte zusammengestellt. Dabei werden die Messstellen nach den beiden Messgeschwindigkeiten 80 km/h und 60 km/h gruppiert, weil das Griffigkeitsniveau grundsätzlich geschwindigkeitsabhängig ist.

Es sind jeweils die Mittelwerte und Streuungen für beide Messsysteme direkt gegenübergestellt. Schliesslich wurde ein Durchschnittswert der Mittelwerte und der Streuungen für beide Messsysteme und beide Messgeschwindigkeiten bestimmt und auf der letzten Tabellenzeile angegeben (Tab. 1 und Tab. 2).

Messstelle	Mittelwert 80 km/h		Streuung 80 km/h	
Nr.	SRM	SCRIM	SRM	SCRIM
1	0.349	0.534	0.033	0.032
3	0.368	0.501	0.031	0.029
3a	0.380	0.542	0.025	0.018
4	0.400	0.579	0.043	0.023
5	0.351	0.577	0.041	0.039
6	0.225	0.468	0.038	0.050
7	0.415	0.592	0.037	0.021
8	0.419	0.703	0.035	0.067
9	0.378	0.561	0.023	0.031
10	0.388	0.547	0.044	0.040
12	0.397	0.633	0.038	0.050
17	0.378	0.566	0.023	0.034
20	0.394	0.541	0.033	0.030
21	0.384	0.582	0.017	0.015
22	0.399	0.623	0.024	0.031
23	0.345	0.511	0.014	0.018
24	0.388	0.634	0.026	0.035
27	0.347	0.572	0.066	0.068
29a	0.202	0.498	0.020	0.026

29b	0.203	0.447	0.040	0.047
30	0.293	0.516	0.055	0.079
31	0.421	0.642	0.026	0.016
32	0.399	0.664	0.033	0.058
34	0.399	0.580	0.032	0.035
35	0.357	0.488	0.040	0.030
37	0.339	0.526	0.039	0.039
38	0.418	0.679	0.050	0.129
39	0.467	0.730	0.032	0.032
41	0.356	0.486	0.045	0.044
42	0.420	0.562	0.099	0.157
44	0.228	0.381	0.057	0.072
<b>n=31</b>	<b>0.362</b>	<b>0.563</b>	<b>0.037</b>	<b>0.045</b>

*Tab. 1: Mittelwerte und Streuung der 2km-Abschnitte bei den Messsystemen SRM und SCRIM (V=80 km/h)*

Messstellen	Mittelwerte 60 km/h		Streuungen 60 km/h	
	SRM	SCRIM	SRM	SCRIM
Nr.				
2	0.441	0.595	0.040	0.030
11	0.421	0.627	0.029	0.027
14	0.372	0.654	0.078	0.115
15	0.486	0.666	0.034	0.024
16	0.371	0.525	0.031	0.036
18	0.445	0.564	0.025	0.028
18a	0.462	0.671	0.049	0.071
18b	0.436	0.671	0.043	0.071
19	0.381	0.497	0.043	0.077
19a	0.557	0.784	0.029	0.025
26	0.428	0.622	0.040	0.04
26a	0.371	0.550	0.042	0.040
28	0.402	0.550	0.042	0.050
36	0.578	0.687	0.111	0.088
40	0.517	0.696	0.082	0.094
40a	0.548	0.668	0.126	0.106
<b>n=16</b>	<b>0.451</b>	<b>0.627</b>	<b>0.053</b>	<b>0.058</b>

Tab. 2: Mittelwerte und Streuung der 2km-Abschnitte bei den Messsystemen SRM und SCRIM (V=60 km/h)

## **7.4 Erkenntnisse aus der Gegenüberstellung der Mittelwerte der Messungen mit SRM und SCRIM**

- Das Griffigkeitsniveau von SRM mit im Mittel 0.362 und SCRIM mit 0.563 unterscheidet sich stark (Messgeschwindigkeit 80 km/h). Dieser Unterschied von 0.2 ist bei einer Messbandbreite zwischen 0.2 und 0.7 sehr gross.
- Das Mittel der Streuungen der beiden Messsysteme ist ähnlich. Dies bedeutet, dass die beiden Messsysteme für sich einzeln je eine ähnliche Ansprechgenauigkeit beim Messen aufweisen.
- Bei den Ergebnissen der Gruppe der Messstellen mit Messgeschwindigkeit 60 km/h zeigen sich ähnliche Verhältnisse. Damit dürften für den Bereich der Autobahnen, wo Messgeschwindigkeiten von 80 km/h und 60 km/h verwendet werden, bzgl. Messgenauigkeit keine Unterschiede auftreten.
- Die Mittelwertdifferenzen SRM - SCRIM der 100m-Intervallwerte sind sehr homogen verteilt. Es häufen sich Differenzen im Bereich von 0.2 und es treten maximale Differenzen bis OA und minimale Differenzen von rund 0.0 auf. Es gibt keine Ausreisser. Dies gilt sowohl für die Gruppe der Messstellen mit Messgeschwindigkeit 80 km/h als auch für jene mit Messgeschwindigkeit 60 km/h.
- Praktisch gleiche Ergebnisse bzgl. Homogenität der Verteilung zeigen sich bei den Mittelwertdifferenzen der 2 km-Abschnitte, wobei die Schwankungen naturgemäss etwas kleiner sind (durch die zweimalige Mittelwertbildung).
- Aufgrund der Verteilungen der Mittelwerte und der Mittelwertdifferenzen erweisen sich die Stichproben (Messstellengruppen 80 km/h und 60 km/h) der beiden Messsysteme als unabhängig und stabil.
- Die Aufgliederung der Messergebnisse in Gruppen von Messstellen gleicher Belagsarten zeigt, dass die Differenzen im Griffigkeitsniveau zwischen SRM und SCRIM bei allen Belagsarten mit bituminösem Aufbau ähnlich sind. Der Unterschied im Griffigkeitsniveau ist also unabhängig vom Belag. Bei Betonbelägen zeigen sich die Differenzen in ähnlicher Art, wobei die Schwankungen der Griffigkeitswerte innerhalb einer Messstelle z.T. grösser sind.

## **7.5 Korrelation der 100 m-Intervallwerte SRM und SCRIM**

Zur Bestimmung der Korrelation zwischen den beiden Messsystemen SRM und SCRIM wurden je für die beiden Messstellengruppen mit Messgeschwindigkeit 80 km/h und 60 km/h die 100m-Intervallwert-Korrelationen untersucht. Daraus liessen sich die mathematischen Zusammenhänge zwischen den Messergebnissen der beiden Messsysteme bestimmen und die Qualität der Zusammenhänge ( $R^2$ ) beurteilen.

Die beiden Abbildungen 5 und 6 zeigen die Ergebnisse der Zusammenhänge.

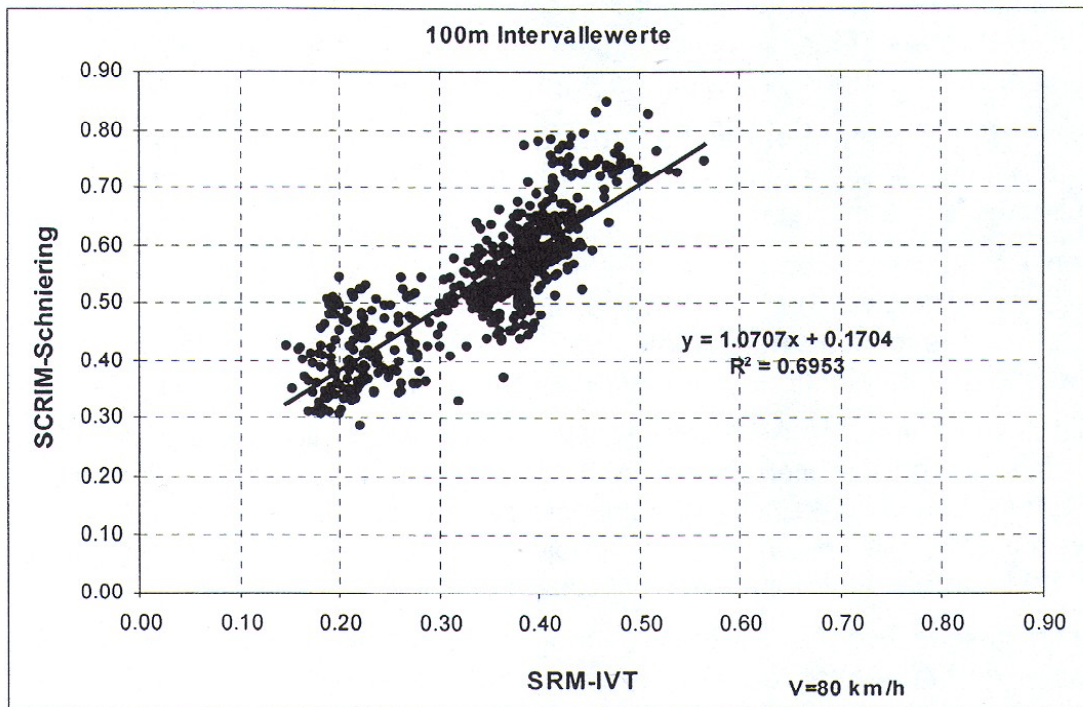


Abb. 5: Korrelation der 100 m-Intervallwerte zwischen SRM und SCRIM bei Messgeschwindigkeit 80 km/h

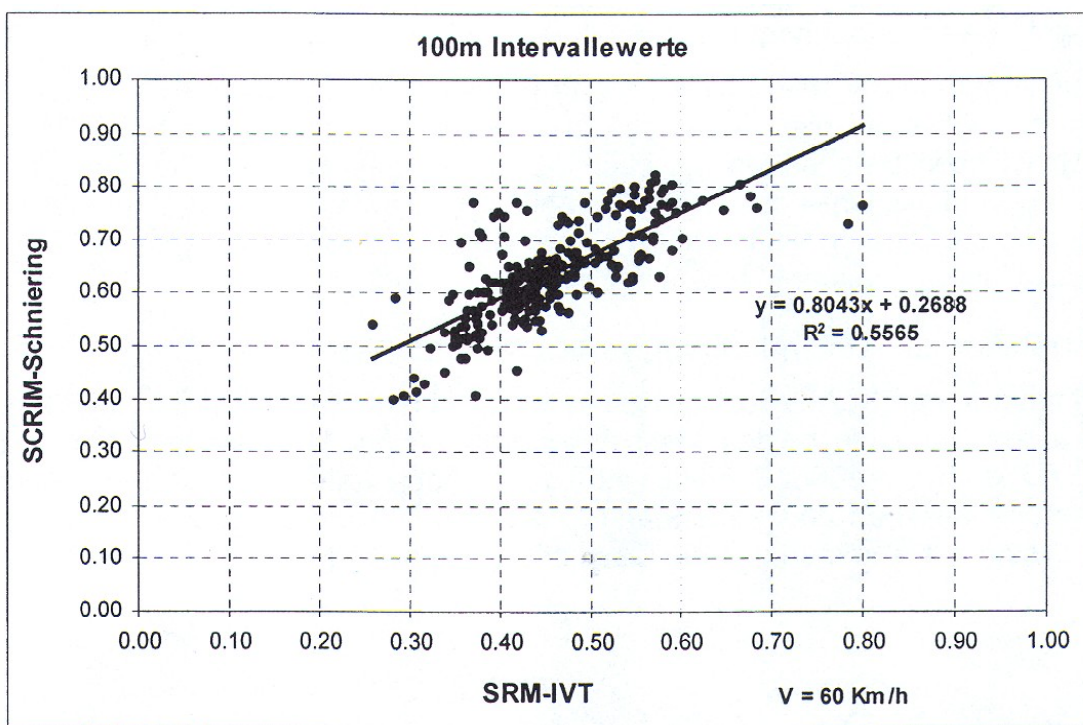


Abb. 6: Korrelation der 100 m-Intervallwerte zwischen SRM und SCRIM bei Messgeschwindigkeit 60 km/h

Die Ergebnisse der beiden Korrelationen (Abbildungen 5 und 6) zeigen:

Es besteht ein Zusammenhang zwischen den Messergebnissen des Messsystems SCRIM und denjenigen des Messsystems SRM bei der Messgeschwindigkeit 80 km/h:

$$y (\text{SCRIM}) = 1.0707 \times (\text{SRM}) + 0.1704$$

Die Korrelation ist mit einem Bestimmtheitsmass von  $R^2 = 0.6953$  genügend, so dass der Zusammenhang als gesichert angesehen werden kann.

Es besteht ebenfalls ein Zusammenhang zwischen den Messergebnissen des Messsystems SCRIM und denjenigen des Messsystems SRM bei der Messgeschwindigkeit 60 km/h:

$$y (\text{SCRIM}) = 0.8043 \times (\text{SRM}) + 0.2688$$

Die Korrelation ist mit einem Bestimmtheitsmass von  $R^2 = 0.5565$  weniger gut als bei 80 km/h, aber ausreichend, so dass der Zusammenhang ebenfalls gesichert ist.

Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse in Ziffer 7.3, d.h. insbesondere der grossen Differenzen der Griffigkeitsniveaus von rund 0.2, erscheint die Verwendung der Korrelation zur direkten Umrechnung von SCRIM-Messwerten in SRM-Griffigkeitswerte problematisch. Im Teil IV dieses Forschungsberichtes werden diese Problematik diskutiert und Folgerungen aus den Diskussionsergebnissen abgeleitet.

Die bis dahin durchgeführten Auswertungen und Analysen gestatteten die Beantwortung der im Forschungsziel formulierten Fragen nur teilweise. Deshalb sind im folgenden Abschnitt vorläufig die bisher schlüssigen Erkenntnisse zusammengestellt.

## 7.6 Zwischenerkenntnisse

Die Erhebungen, Auswertungen, Analysen und Beurteilungen lassen vorläufig folgende Folgerungen zu:

1. Das Messsystem SCRIM ist aufgrund der Erfahrungen bei den Stichprobenmessungen an über 40 Messstellen auf dem Schweiz. Nationalstrassennetz geeignet für einen netzweiten Einsatz (rund 6000 km Fahrstreifen) zur Erhebung der Griffigkeit.

Dies begründet sich wie folgt:

- Das Messsystem ist robust und erlaubt die Erhebung einer grossen täglichen km-Leistung
- Das Ansprechverhalten bzgl. Erfassung der Griffigkeit ist gut. Dies konnte durch Vergleich mit den SRM-Messungen (Verlaufskurven) nachgewiesen werden.
- Die Messgenauigkeit ist zufriedenstellend, was anhand der ähnlichen Streuungen der Messwerte der beiden Messsysteme SCRIM und SRM erkannt werden konnte.
- *Die beabsichtigten Auswertungen der Messungen und die damit verbundenen Mittelwertbildungen (100 m-Intervallwerte) sind möglich und lassen sich einfach durchführen.*

2. Das Griffigkeitsniveau, das mit den SCRIM-Messsystem erhoben wird, liegt höher als jenes des Messsystems SRM. Im Mittel ist eine Differenz von 0.2 ausgewertet worden. Die Einzelwerte der Messstellen weisen Differenzen zwischen 0.1 und 0.3 auf. Diese z.T. grossen Unterschiede im Griffigkeitsniveau sind vorerst nicht erklärbar, weil bisherige Erfahrungen Unterschiede von rund 0.05 ausweisen. Aus diesem Grunde ist die Anwendung des an sich eindeutigen und gesicherten Korrelationszusammenhangs vorerst fraglich. Dies um so mehr, weil die Anwendung der Umrechnung zu Fehlschlüssen bei der Beurteilung der Griffigkeit führen kann.
3. Es galt im Rahmen dieses Forschungsauftrages, soweit dies in finanzieller Hinsicht möglich war, der Problematik des grossen Unterschiedes im Griffigkeitsniveau der beiden Messsysteme nachzugehen.

Aus diesem Grunde wurden zwei weitere, im damaligen Untersuchungsprogramm nicht vorgesehene, Untersuchungen angesetzt. Es betraf dies vorerst eine Kontrollauswertung zur Analyse eines allfälligen Einflusses der Spurrinntiefe auf die Messwerte der Griffigkeit. Schliesslich wurde eine Pilotuntersuchung zum Vergleich von zwei SRM-Messsystemen mit dem SCRIM-Messsystemen (Schniering) mittels Messungen auf Teststrecken (in Zusammenarbeit mit der Aussenstelle Inzell der BAST), durchgeführt.

Im Folgenden soll hier aber vorerst auf die Problematik der Bewertung der Griffigkeit, hervorgerufen durch die grossen Unterschiede im Griffigkeitsniveau zwischen den beiden Messsystemen SRM und SCRIM, eingegangen werden, bevor die Ergebnisse der weiteren Abklärungen dargestellt werden (Ziffer 8).

## 7.7 Beurteilungsgrundlagen für die Griffigkeit

Der grosse Unterschied im Griffigkeitsniveau der beiden Messsysteme führt auch bei bekannter Korrelation, wie nachfolgend gezeigt wird, zu Problemen bei der Bewertung.

Die Schweizer Norm SN 640 510b, Griffigkeit, Messverfahren, legt das Messprinzip mit dem Schlepprad Skiddometer fest. In der Norm SN 640 511 b, Griffigkeit, Bewertung, werden Richtwerte für die noch annehmbaren Werte der Griffigkeit nach dem Skiddometermessverfahren wie folgt definiert:

Höchstgeschwindigkeit $V_z$ [km/h]	Messgeschwindigkeit [km/h]	$\mu$ -Wert (blockiertes Rad)
$V_z \leq 60$	40	0.48
$60 < V_z \leq 100$	60	0.39
$V_z > 100$	80	0.32

Tab. 3: Richtwerte für die Griffigkeit bei Anwendung des Skiddometers (SN 640 511b)

In der Zwischenzeit wurde in der Schweiz zur Erfassung der Griffigkeit häufig anstelle des Skiddometers das neuere Messsystem SRM verwendet. Gemäss Norm SN 640 510b, Ziffer 22, können für die Griffigkeitsmessung auch andere Schleppräder verwendet werden, sofern eine eindeutige Korrelation zum Skiddometer-Messgerät des IVT besteht.

Die Korrelation zwischen dem Skiddometer Messgerät der ETH Zürich und dem SRM des IVT wird zur Zeit laufend und anhand vieler weiterer Vergleichsmessungen überprüft.

Die folgende Tabelle zeigt die Zusammenhänge zwischen SRM und Skiddometer:

Messgeschwindigkeit [km/h]	Korrelationsgleichung
40	$\mu_{\text{Skidd}} = 1.54 \mu_{\text{SRM}} - 0.23$
60	$\mu_{\text{Skidd}} = 1.47 \mu_{\text{SRM}} - 0.19$
80	$\mu_{\text{Skidd}} = 1.43 \mu_{\text{SRM}} - 0.14$

Tab. 4: Korrelation Skiddometer ITV – SRM

Wird die Korrelationsgleichung für die Messgeschwindigkeiten 80 km/h angewendet, resultieren mit zunehmendem Griffigkeitsniveau überproportional zunehmende Skiddometerwerte gegenüber den SRM-Werten.

Die folgende Tabelle zeigt die verschiedenen Bewertungsmaßstäbe in ihrer gegenseitigen Abhängigkeit für die Messgeschwindigkeit 80 km/h.

$\mu$ -SRM ETH Messung	Beurteilung ETH	Note	$\mu$ -Skiddo Korrelation ETH	Beurteilung SN 640 925a	Note	$\mu$ -SCRIM Schniering Messung	Beurteilung FGSV 401	Note
0.307	s. schlecht	5	0.30	}	5	}	s. schlecht	5
0.315			0.31				schlecht	0.32
0.320	schlecht	4	0.32	(Mindestwert)	4	0.36	schlecht	4
0.335			0.34	}	3	}	(Warnwert)	3.5
0.350			0.36				kritisch	0.39
0.360	ausreichend	3	0.42	}	3	}	befriedigend	3
0.390			0.36					
0.420	befriedigend	2	0.46	}	1	}	gut	1.5
0.440			0.42					
0.500	gut	1	0.49	}	1	}	sehr gut	1
0.520			0.46					
0.570	sehr gut	(0)	0.60	(sehr gut)	(0)	↓		↓

Tab. 5: Gegenüberstellung Bewertung SRM und SCRIM

Für die Beurteilung wird einerseits die Norm Griffigkeit, Bewertung (SN 640 511b) und andererseits die Norm SN 640 925a für alle aus den SRM-Messungen in Skiddometerwerte umgerechneten Griffigkeitswerte angewendet.

Zur Beurteilung der SCRIM-Griffigkeitswerte liegt aus Deutschland die "Richtlinie zur Bewertung der Strassengriffigkeit bei Nässe" (Entwurf) vom November 1998 vor. Sie wird für alle in Deutschland eingesetzten SCRIM-Messsysteme, welche von der Bundesanstalt für Strassenwesen (BAST) jeweils in Inzell (BAST-Aussenstelle) jährlich vor Messbeginn kalibriert werden, für die Beurteilung der Messergebnisse angewendet.

Die Gegenüberstellung zeigt:

Bei gleichen Beurteilungsnoten bestehen Differenzen im Griffigkeitsniveau zwischen SRM-Werten (massgebend ist der aus der SRM-Messung umgerechnete Skiddometerwert) und den SCRIM-Werten.

Im Bereich ungenügender Griffigkeiten (z.B. Note 4) bestehen geringe Unterschiede von rund 0.04. Bei befriedigender Griffigkeit (z.B. Note 3) ist der Unterschied bei 0.07 und bei guter Griffigkeit (z.B. Note 1) rund 0.1.

Dies bedeutet, dass im Bereich schlechter Griffigkeitswerte (tiefes Griffigkeitsniveau) die Messwerte SRM und SCRIM fast gleich bewertet werden (gleiche Werte), im Niveau ausreichender bis guter Griffigkeit die Bewertung von SCRIM-Messresultaten strenger ist. D.h. gute Noten für SCRIM-Messwerte werden später erreicht als beim Skiddometer. Im Bereich mittlerer bis guter Griffigkeitswerte ist demzufolge der SCRIM-Bewertungsmassstab um rund eine Note strenger.

## **7.8 Bewertung der SCRIM-Messergebnisse**

Zur Bewertung der SCRIM-Messergebnisse war vorgesehen, die SCRIM-Griffigkeit 100 m-Intervallwerte einerseits anhand des Korrelationszusammenhangs zwischen SRM und SCRIM (gemäss Ziffer 8.5, Reduktion SCRIM-Wert um rund 0.2 ergibt SRM-Wert) auf einen theoretischen SRM-Wert umzurechnen. Da die Bewertung der Griffigkeit mit dem Massstab der Norm SN 640 511 b erfolgen sollte, müssten die theoretischen SRM-Werte ein zweites Mal via bestimmten Korrelationszusammenhang SRM (IVT-ETH) und Skiddometer (IVT-ETH) korrigiert werden.

Aufgrund der grossen Messwertunterschiede SCRIM / SRM und der in Ziffer 7.6 aufgezeigten Bewertungsmassstäbe SCRIM / SRM sowie deren Zusammenhänge ergäben sich im Falle der Umrechnung der SCRIM-Messergebnisse nach dem ursprünglich vorgesehenen Verfahren bei der anschliessenden Bewertung folgende Probleme:

Eine Umrechnung der tiefen SCRIM-Griffigkeitsmesswerte führte zu unrealistisch tiefen Skiddometerwerten. Eine Bewertung ist dabei nicht mehr möglich.

Die Umrechnung von mittleren bis hohen SCRIM-Griffigkeitswerten würde aufgrund des Korrelationszusammenhangs zu tiefen bis mittleren Skiddometerwerten führen.

Dies bedeutet, dass bei Anwendung des Korrelationszusammenhangs die im SCRIM-Massstab als befriedigend bis gut bewerteten Abschnitte im Skiddometermassstab mit schlecht bis sehr schlecht taxiert würden. Diese Bewertung dürfte eine deutliche Unterschätzung der tatsächlichen Verhältnisse darstellen. Aus den bisherigen Erkenntnissen und Feststellungen zeigt sich, dass von einer direkten Umrechnung der SCRIM-Messergebnisse via Korrelationszusammenhang SRM-SCRIM abzusehen ist.

Zusammengefasst ergibt sich, dass sowohl eine Umrechnung via Korrelationszusammenhang als auch eine Bewertung aufgrund des grossen Unterschiedes im Griffigkeitsniveau zwischen den Messergebnissen der beiden Messsystemen problematisch ist. Aus diesem Grunde wurden weitere Untersuchungen und Abklärungen, soweit dies im Rahmen dieser Untersuchung aus Aufwandgründen überhaupt möglich war, im Sinne von Pilotuntersuchungen durchgeführt.

Es sind dies:

- Die Klärung eines allfälligen Einflusses der Spurrinntiefe auf die Griffigkeitswerte der beiden Messsysteme, und
- die Vergleichsmessungen zwischen zwei SRM-Messsystemen und die Gegenüberstellung mit dem SCRIM-Messsystem.

## IV ZUSATZUNTERSUCHUNGEN

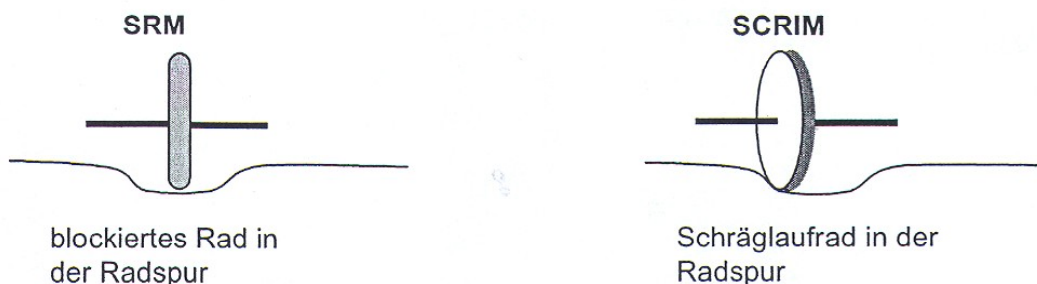
### 8. Einfluss der Spurrinntiefe auf die Erfassung der Griffigkeit bzw. die Griffigkeitsmesswerte

#### 8.1 Ausgangslage, Fragestellung

In Anbetracht der Ergebnisse der Griffigkeitsmessungen mit den beiden Messsystemen SRM und SCRIM und den dabei festgestellten grossen Unterschieden im Griffigkeitsniveau, galt es, zumindest ansatzweise, die Ursachen der grossen Unterschiede zu eruieren.

Vorerst wurde die Hypothese aufgestellt, dass die Spurrinntiefe einen Einfluss auf die erhobenen Griffigkeitswerte haben könnte.

Es konnte im Sinne der konkreten Hypothese angenommen werden, dass die Messung der Griffigkeit in der Radspur (blockiertes Rad SRM) einen wahren Wert der Griffigkeit erfasst als das schräglauflende Rad (SCRIM) am Rande der Radspur. Das schräglauflende Rad müsste demzufolge einen höheren Wert der Griffigkeit erfassen, weil im Zentrum und in der Tiefe der Radspur die Griffigkeit tiefer sein dürfte als im Randbereich der Radspur.



Als erster, selbstverständlich für die Beantwortung der Fragestellung nicht schlüssiger, Ansatz wurden die aus der Zustandserfassung der Fahrbahnen der Nationalstrassen (ZEB-NS) [9] im gleichen Jahre erhobenen Spurrinntiefen in den entsprechenden Messabschnitten der Griffigkeitsmessstellen der vorliegenden Untersuchung aussortiert und den dort erfassten Griffigkeitswerten gegenübergestellt.

Das Ziel der Gegenüberstellung war das Aufsuchen von Auffälligkeiten bzw. das Erkennen von Gesetzmässigkeiten.

## 8.2 Auswertungen

Zur Gegenüberstellung der Griffigkeitswerte 1.1 und der T-Werte der Spurrinntiefe wurden die 100 m-Intervallwerte aus der Erhebung ZEB-NS (Querebenheit) und die 100 m-Intervall-Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung verwendet.

Zur Verifizierung oder Falsifizierung der Hypothese, wonach bei grösseren Spurrinntiefen T grössere Differenzen der Griffigkeit zwischen dem Messsystem SCRIM und dem Messsystem SRM auftreten, wurden alle entsprechenden 100m-Intervallwerte T der Spurrinntiefe den 100 m-Intervallwertdifferenzen (SCRIMSRM) gegenübergestellt.

## 8.3 Analyseergebnisse

Die folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse der Analyse sämtlicher  $\mu$ -Wertdifferenzen in Abhängigkeit zur Spurrinntiefe.

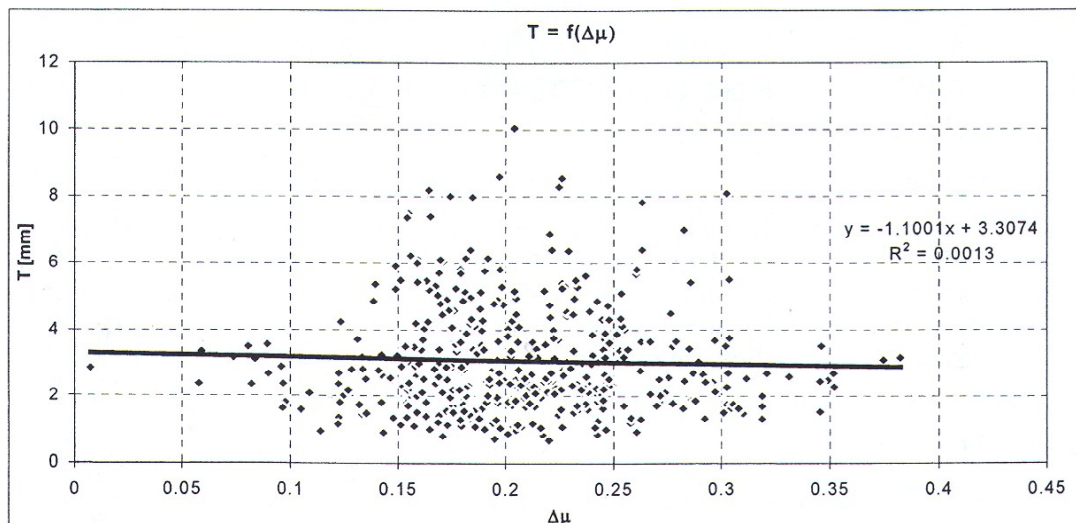


Abb. 7: Spurrinntiefe und  $\mu$ -Wert-Differenzen (SCRIM - SRM) sämtlicher 100m-Intervalle bei bituminösen Fahrbahnen

Die Abbildung zeigt, dass kein Zusammenhang zwischen der Grösse der Spurrinntiefe und den Griffigkeitswertdifferenzen (SCRIM-SRM) besteht.

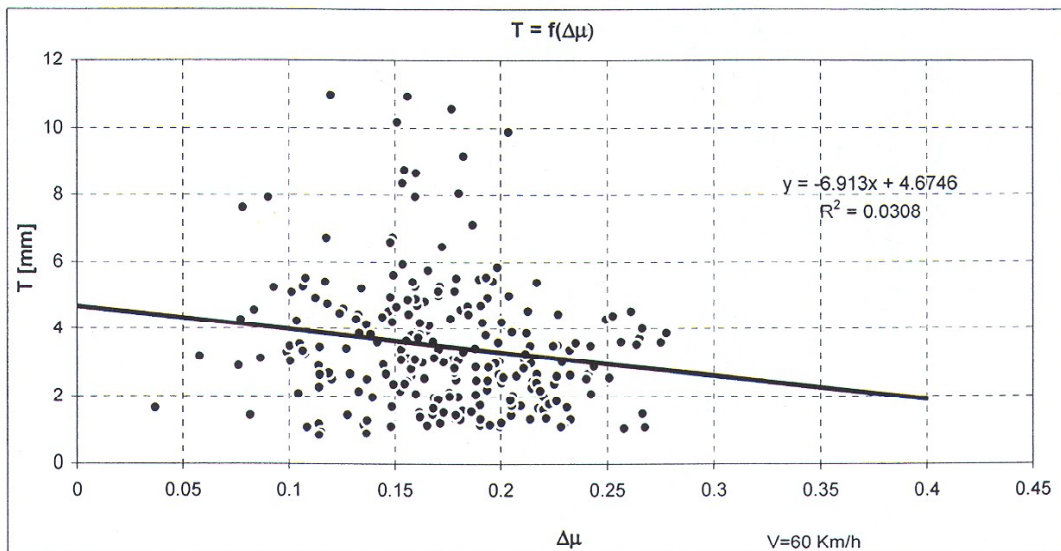


Abb. 8: Spurrinnentiefe und  $\mu$ -Wert-Differenzen (SCRIM - SRM) sämtlicher 100m-Intervalle bei Betonfahrbahnen

Auch bei den Betonfahrbahnen kann keine Abhängigkeit zwischen  $\mu$ -Wert-Differenzen und Spurrinnentiefe festgestellt werden. Deshalb muss die Hypothese verworfen werden, womit kein Einfluss der Spurrinnentiefe auf die grossen Unterschiede im Griffigkeitsniveau zwischen SCRIM und SRM-Messung vorhanden sein dürfte.

## 9. Vergleichsmessungen SRM - ETH und SRM - BAST mit SCRIM-Schniering

### 9.1 Anlass

Als weitere, zusätzliche Untersuchung zur Erklärung der grossen Griffigkeitsniveauunterschiede zwischen dem Messsystem SRM der ETH Zürich und dem SCRIM der Firma Schniering, Essen, wurde im Frühjahr 2001 (4. und 5. 2001) eine Testserie von Griffigkeitsmessungen auf einer Autobahnteilstrecke von 2km-Länge (BAB) im Raum Inzell (Deutschland) durchgeführt.

An den Testmessungen waren folgende drei Messsysteme beteiligt:

- SRM ETH Zürich
- SRM BAST des Strassenbauamtes Traunstein (SRM - SBA- TS)
- SCRIM Schniering

Das Messsystem SRM - SBA-TS ist das offizielle Kalibrierungsgerät für alle in Deutschland bei Griffigkeitserhebungen im Auftrag des Bundes eingesetzten, privaten SCRIM-Messgeräte. So wurde auch das SCRIM-Messsystem der Firma Schniering am Vortag der hier beschriebenen Testmessungen kalibriert.

Die beiden SRM sind im wesentlichen gleicher Bauart. Ihre Einstellungen im mechanischen Bereich sind nicht identisch und werden von den zuständigen Stellen jeweils selbständig für die Messungen vorbereitet. Ein ganz wesentlicher Unterschied, nebst dieser individuellen Art der Einstellung der Messsysteme, bildet indessen die Bereifung der beiden Systeme.

Wie aus verschiedenen früheren Untersuchungen [10] bekannt ist, hat bei Schleppradmessungen insbesondere die Reifenkonstruktion und das Reifenprofil (Gestaltung und Tiefe) einen Einfluss auf den Reibungskoeffizienten.

Die Messsysteme waren grundsätzlich wie folgt ausgerüstet:

- SRM-ETH mit Maloja (ETH Pneu 94)
- SRM-SBA-TS mit Vredestein 98

Zur Klärung eines allfälligen Einflusses der Bereifungen wurden bei den Testfahrten verschiedenen Bereifungen bei den beiden Messsystemen des Typs SRM eingesetzt.

## 9.2 Messfahrten (Testserie Inzell)

Die Testserie umfasste folgende Messungen, die für die Vergleiche der Messsysteme benutzt und über Strecken von jeweils 2 km ausgewertet wurden.

[Serie 1]

### SRM-ETH

4 Messungen 80 km/h  
Pneu: Maloja 94

### SRM-SBA-TS

4 Messungen 80 km/h  
Pneu: Vredestein 1

### SCRIM-Schniering

4 Messungen 80 km/h  
Pneu: SCRIM-BAST

[Serie 2]

### SRM-ETH

4 Messungen 60 km/h  
Pneu: Maloja 94

### SRM-SBA-TS

4 Messungen 60 km/h  
Pneu: Vredestein 1

### SCRIM-Schniering

4 Messungen 60 km/h  
Pneu: SCRIM-BAST

[Serie 3]

### SRM-ETH

4 Messungen 80 km/h  
Pneu: Vredestein 1

### SRM-SBA-TS

4 Messungen 80 km/h  
Pneu: Maloja 94

### SCRIM-Schniering

4 Messungen 80 km/h  
Pneu: SCRIM-BAST

[Serie 4]

### SRM-ETH

4 Messungen 80 km/h  
Pneu: Vredestein 1

### SRM-SBA-TS

4 Messungen 80 km/h  
Pneu: Vredestein 2

Anhand dieser Messserien liessen sich einerseits die Unterschiede der beiden Messsysteme SRM im Originalmesszustand und bei unterschiedlicher Bereifung festhalten. Andererseits liessen sich die Unterschiede der SRM-Messsysteme zum stets mit gleicher Ausrüstung eingesetzten SCRIM-Messsystem (Firma Schniering) feststellen.

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der Messungen der Testserien:

Fahrt Nr.	Mess-richtung	Mess-strecke	Mess km	Mess-Geschw. Km/h	Datum	SRM - ETH		SRM SBA-TS		SCRIM-Schniering	
						μ-Wert	Pneu	μ-Wert	Pneu	μ-Wert	Pneu
1	R-Salzburg	Mst4	103-104	80	04.04.01	0.408	Maloja	0.555	Vredestein 1	0.606	SCRIM
2	R-München	Mst4	104-103	80	04.04.01	0.384	Maloja	0.532	Vredestein 1	0.592	SCRIM
3	R-Salzburg	Mst4	103-104	80	04.04.01	0.428	Maloja	0.549	Vredestein 1	0.607	SCRIM
4	R-München	Mst4	104-103	80	04.04.01	0.388	Maloja	0.618	Vredestein 1	0.578	SCRIM
11	R-Traunstein	Mst2	4.0-3.0	60	04.04.01	0.402	Maloja	0.516	Vredestein 1	0.526	SCRIM
12	R-Siegsdorf	Mst2	3.0-4.0	60	04.04.01	0.454	Maloja	0.539	Vredestein 1	0.554	SCRIM
13	R-Traunstein	Mst2	4.0-3.0	60	04.04.01	0.440	Maloja	0.530	Vredestein 1	0.529	SCRIM
14	R-Siegsdorf	Mst2	3.0-4.0	60	04.04.01	0.426	Maloja	0.515	Vredestein 1	0.518	SCRIM
31	R-Salzburg	Mst4	103-104	80	04.04.01	0.439	Vredestein 1	0.451	Maloja	0.604	SCRIM
32	R-München	Mst4	104-103	80	04.04.01	0.437	Vredestein 1	0.432	Maloja	0.527	SCRIM
33	R-Salzburg	Mst4	103-104	80	04.04.01	0.452	Vredestein 1	0.460	Maloja	0.572	SCRIM
34	R-München	Mst4	104-103	80	04.04.01	0.443	Vredestein 1	0.444	Maloja	0.514	SCRIM
41	R-Salzburg	Mst4	103-104	80	04.04.01	0.443	Vredestein 1	0.581	Vredestein 2	-	nicht gem.
42	R-München	Mst4	104-103	80	04.04.01	0.446	Vredestein 1	0.576	Vredestein 2	-	nicht gem.
43	R-Salzburg	Mst4	103-104	80	04.04.01	0.445	Vredestein 1	0.596	Vredestein 2	-	nicht gem.
44	R-München	Mst4	104-103	80	04.04.01	0.435	Vredestein 1	0.576	Vredestein 2	-	nicht gem.

Vredestein 1 (Pneu 98, gebraucht)    Vredestein 2 (Pneu 98, neu)    Maloja (ETH Pneu 94)

Tab. 6: Vergleichsmessungen der Messsysteme SRM-ETH, SRM-SBA-TS und SCRIM Firma Schniering

### 9.3 Analyse der Messungen

Zur Analyse der Messergebnisse wurden jeweils die 4 koordiniert direkt hintereinander ausgeführten Messfahrten über die 2 km-Messabschnitte gemittelt und die entsprechenden Vergleiche mit diesen Mittelwerten durchgeführt. Die Analyse konzentrierte sich auf die Messergebnisse bei Messgeschwindigkeit 80 km/h.

Die folgende Tabelle zeigt die durchgeführten Gegenüberstellungen:

Messserie	SRM-ETH	SRM-SBA-TS	SCRIM-Schniering
1) $\mu$ -Niveau ( $\Phi$ ) Differenzen Originalbereifung	0.402	0.563	0.596
	0.161		0.033
	0.194		
	Maloja 4	Vredestein 1	
2) $\mu$ -Niveau ( $\Phi$ ) Differenzen SRM-Bereifungswechsel	0.443	0.447	0.554
	0.004		0.113
	0.111		
	Vredestein 1	Maloja 4	
3) $\mu$ -Niveau ( $\Phi$ ) Differenzen SRM beide Vredestein	0.442	0.582	
	0.140		
	Vredestein 1	Vredestein (neu)	

Tab. 7: Gegenüberstellungen Messergebnisse (Durchschnittswerte bei Messgeschwindigkeit 80 km/h)

Aus dieser Gegenüberstellung zeigt sich:

Die Griffigkeitsniveaudifferenz SRM-IVT und SCRIM-Schniering mit 0.194 fällt identisch aus wie bei den Untersuchungen an den über 40 Messstellen. Das SCRIM-Messsystem hat um rund 0.2 höhere Werte.

Im Vergleich SRM-ETH und SRM-SBA-TS resultiert eine ähnliche Differenz mit 0.161, währenddessen praktisch kein Unterschied SRM-SBA-TS zum SCRIM (0.033) besteht. Die beiden Messsysteme wurden, wie bereits erwähnt (am Vortag) aufeinander abgestimmt bzw. kalibriert.

Durch Vertauschen der Bereifung bei den beiden SRM-Messsystemen hebt sich der Unterschied im Griffigkeitsniveau auf (0.004). Während sich durch Vredestein beim SRM-ETH das Griffigkeitsniveau um 0.04 erhöht, fällt beim SRM-SBA-TS bei Verwendung des Malojareifens das Griffigkeitsniveau um 0.12. Die Summe der Differenzen entspricht ziemlich genau der in der ersten Testserie festgestellten Differenz SRM-ETH / SRM-SBA-TS von 0.16.

Die Serie 3 zeigt, dass bei Verwendung des Pneu Vredestein 1 beim SRM-ETH bei zwei Messserien (2 und 3) das gleiche Griffigkeitsniveau erfasst wurde. Die Verwendung eines völlig neuen Vredestein Pneu führte beim SRM-SBA-TS zu einem mit 0.02 nur sehr gering höheren Griffigkeitsniveau als bei Verwendung des bereits gebrauchten Pneu (Vredestein 1).

**FAZIT: Aus diesen Feststellungen ergibt sich der klare Hinweis, dass der Messpneu einen wesentlichen Einfluss auf das Griffigkeitsniveau hat. Aus den Testmessungen ist deutlich ersichtlich, dass beim SRM-ETH der Pneuwechsel zur Erhöhung des Griffigkeitsniveaus um 0.12 führt. D.h. die beiden Messsysteme reagieren nicht ganz gleich auf Pneuwechsel, der grundsätzliche Einfluss dürfte irgendwo zwischen diesen Werten liegen, z.B. bei ca. 0.08 bis 0.1. Zur genaueren Lokalisierung bedürfte es eingehenderer Untersuchungen. Dieser Wert kann letztlich aber zumindest als Hinweis und als Größenordnung gelten.**

## V ERKENNTNISSE UND FOLGERUNGEN

### 10. Grundsätzliche Erkenntnisse

Die grundsätzlichen Erkenntnisse geben Antworten auf die Zielsetzungen der Untersuchung und lassen sich wie folgt zusammenfassen.

1. Das Messsystem SCRIM ist aufgrund der durchgeführten Untersuchungen geeignet und zweckmässig für einen netzweiten Einsatz zur Erhebung der Griffigkeit auf den Fahrbahnen ( ) in Asphaltbauweise oder Betonbeläge Schweizerischer Nationalstrassen.

Die Zweckmässigkeit zeigte sich einerseits durch die hohe, ohne Störung des Verkehrs erbrachte tägliche km-Leistung und die dabei ausgewiesene Robustheit des Messsystems. Andererseits standen die Messresultate durch eine umgehend mögliche Auswertung *rasch zur Verfügung, so dass nur wenig Zeit für die Auswertung benötigt wird.*

2. Anhand der Untersuchungen an über 40 Messstellen auf dem Nationalstrassennetz konnten, nach der Überprüfung (Gegenüberstellung) der ausgewerteten Verlaufskurven auf Plausibilität, die 100 m-Intervallwerte für die entsprechenden Messintervalle aus den ermittelten SRM- resp. SCRIM - Messdaten gewonnen und korreliert werden.

Die gefundenen Korrelationen für die Gruppe der Messstellen mit Messgeschwindigkeit 80 km/h und die Gruppe der Messstellen mit Messgeschwindigkeit 60 km/h weisen diese Zusammenhänge nach. Die Güte des Zusammenhangs (Bestimmtheitsmass) zeigt sich nicht sehr eng, kann aber als genügend angesehen werden.

Als unerwartet gross ergaben sich die Differenzen im Griffigkeitsniveau zwischen den beiden Messsystemen SRM und SCRIM. Sie betragen im Mittel rund 0.2. Diese Differenz bedeutet ein ungewöhnliches, unerklärbares Resultat, führt es doch zu grossen Problemen bei der vorgesehenen Verwendung des Beurteilungsmassstabes der Schweizerischen Griffigkeitsnormen, die auf dem Griffigkeits hintergrund des IVT beruhen. Eine schlüssige Klärung der damit aufgeworfenen Fragen konnte im Rahmen des vorliegenden Forschungsauftrages aus Zeit- und Aufwandgründen nicht vorgenommen werden. Es wurde indessen anhand einer weiteren Auswertung betreffend allfälliger Einflüsse der Spurrinntentiefe auf die Höhe der Griffigkeitsmesswerte versucht, oder Klärung zu finden. Zusätzlich ging man der Frage zum Einfluss der Bereifung des Messsystems SRM durch eine weitere Untersuchung, allerdings mit einer kleinen Stichprobe an Messungen, nach.

Diese Untersuchungen geben einen ersten vorläufigen Hinweis, dass insbesondere die Bereifung des Messsystems einen grossen Einfluss auf das gemessene Griffigkeitsniveau hat. Es muss vermutet werden, dass zwischen dem SRM der ETH (Bereifung Maloja 94) und dem für die Kalibrierung aller SCRIM - Messsysteme in Deutschland verwendeten SRM-SBA-TS (Messreifen Vredestein 98) Griffigkeitsmessunterschiede von etwa 0.1 entstehen. Die Beantwortung der Frage des Einflusses vorhandener Spurrinnen auf die Griffigkeitsniveaus bei SCRIM und SRM ist schwierig. Im Sinne eines ersten, nicht schlüssigen Hinweises zeigte die entsprechende Zusatzauswertung keinen Zusammenhang zwischen den Griffigkeitsdifferenzen zwischen SRM und SCRIM bei zunehmender Spurrinntentiefe.

3. Die Untersuchungen zeigten an hand des Messverfahrens, dass eine genügende Dichte von Einzelwerten bei der dynamischen Erhebung unter Verkehr mit dem SCRIM-Messsystem erhoben und ausgewertet werden kann, und dass es sowohl für netzweite Erhebungen und Beurteilungen dienen kann als auch für abschnittsweise Beurteilungen auf der eigentlichen Projektebene ( Mit Ableitung von entsprechenden Massnahmen).

Die geforderte Messgenauigkeit mit  $\Delta\mu = \pm 0.05$  wird pro Messabschnitt erreicht, wie einerseits aus den Streuungen der Kontrollmessungen und andererseits aufgrund der Zusatzuntersuchungen (Inzell) nachgewiesen werden konnte. Auch hier muss die Frage der Verwendung des Beurteilungsmassstabes noch offen bleiben. Die Mittelwertbildung für die 100 m-Intervalle ist bei Streuungen unter 0.05 als gut und für die netzweite Erhebung als zweckmässig anzusehen.

## 11. Folgerungen

Die Untersuchung hat gezeigt, dass das SCRIM-Messsystem für die netzweite Erhebung der Griffigkeit geeignet und zweckmässig ist. Wie bereits aus anderweitig durchgeführten Untersuchungen bekannt ist, führt das SCRIM-Messsystem zu etwas höheren Griffigkeitswerten als das Messsystem SRM (und Skiddometer).

Aufgrund der im Rahmen dieser Untersuchung nicht abschliessend erklärbaren Differenz von 0.2 im Griffigkeitsniveau zwischen den Messergebnissen der beiden Messsysteme SCRIM und SRM wurde klar, dass eine Umrechnung von SCRIM-Werten via Korrelationszusammenhang SCRIM/SRM nicht zulässig ist.

Es wird deshalb empfohlen, Messergebnisse, welche mit SCRIM-Messsystemen aus Deutschland erhoben wurden, mit dem in Deutschland verwendeten Beurteilungsmassstab gemäss "Merkblatt zur Bewertung der Strassengriffigkeit bei Nässe" zu bewerten.

Da in der Schweiz zurzeit für die Erhebung der Griffigkeit keine SCRIM-Messsysteme vorhanden sind resp. eingesetzt werden und die geltende SN-Norm der VSS zur Bewertung der Griffigkeit auf dem Griffigkeitshintergrund IVT (Messprinzip blockiertes Rad/Schlupf der Messsysteme Skiddometer und SRM) basiert, drängt sich eine Festlegung oder Kalibrierung zwischen SCRIM und SRM im Moment nicht auf. Zudem fehlt für die Beurteilung von SCRIM-Messergebnissen die Erfahrung im Bereich SCRIM-Messgeschwindigkeiten 60 km/h und 40 km/h und somit für alle Strassen mit Ausnahme der Nationalstrassen. Ob, und wenn ja, wie weit sich der SCRIM-Beurteilungsmassstab aus Deutschland allgemein verwenden lässt, ist zurzeit unklar und wird im Zusammenhang mit der zurzeit laufenden Überarbeitung der schweizerischen Griffigkeitsnormen über die Messsysteme und die Anforderungen an die Griffigkeit (Bewertung der Griffigkeit) in der Fachkommission 7 der VSS geprüft. Dabei gilt es auch, die europäische Normungstätigkeit in der CEN auf diesem Gebiet, die zurzeit ebenfalls im Gange ist, zu berücksichtigen bzw. einzubeziehen.

## 12. Zusammenfassung

Ziel der Forschungsarbeit war es, einerseits die Zweckmässigkeit des SCRIM-Messsystems für eine netzweite Erhebung der Griffigkeit auf den schweizerischen Nationalstrassen zu prüfen. Andererseits war aufgrund des bekannten Griffigkeitshintergrundes von Skiddometer- und SRM-Messungen der Zusammenhang zwischen Messwerten der SCRIM-Messungen und SRM-Messungen gesucht.

Zur Klärung dieser Fragen wurden über 40 Messstellen auf den schweizerischen Nationalstrassen ausgewählt. Dabei wurden alle bekannten und üblicherweise angewendeten Belagsarten mit unterschiedlichem Alter einbezogen, so dass eine für die schweizerischen Nationalstrassen repräsentative Auswahl von Messstellen vorlag.

Die Messungen erfolgten mit beiden Messsystemen SCRIM (Sideway Coefficient Routine Investigation Machine) und SRM (Stuttgarter Reibungs-Messer) zur gleichen Zeit am gleichen Ort direkt über Abschnitte von 2 km Länge hintereinander gefahren. Damit können die Messbedingungen als identisch betrachtet werden.

Die Auswertungen erfolgten für beide Messsysteme getrennt, ausgerichtet auf deren Erfassungsart. Die Einzelmesswerte - beim SCRIM in konstanten Intervallabständen entstanden, beim SRM in unregelmässigen Abständen erhoben - wurden schliesslich zu Mittelwerten für 100m-Intervalle aggregiert und aus diesen zu Durchschnittswerten für die 2 km-Messabschnitte (Messstellen) zusammengesetzt. Diese beiden Grundlagen wurden dann für die Gegenüberstellungen, Vergleiche und Analysen verwendet.

Die Untersuchung bestätigte grundsätzlich die Zweckmässigkeit des SCRIM-Messsystems für netzweite Erhebungen, indem einerseits grosse, tägliche Messleistungen erbracht werden können. Andererseits konnten die angesetzten Genauigkeitsanforderungen (insbesondere bei Wiederholungsmessungen) erfüllt werden.

Anhand von Korrelationsrechnungen konnte ein Zusammenhang zwischen den Messwerten der beiden Messsysteme mit genügendem Bestimmtheitsmass gefunden werden. Dabei ergab sich eine mittlere Differenz von rund 0.2 zwischen den Messwerten SCRIM und denjenigen von SRM.

Da bei den Erhebungen auch tiefe SCRIM-Messwerte erhoben (Bereich  $0.2 < \sim < 0.3$ ) wurden, muss es als grundsätzlich unzulässig angesehen werden, den gefundenen Korrelationszusammenhang zwischen SCRIM und SRM für die Umrechnung von SCRIM-Messwerten zu verwenden, weil diese bei derart tiefen Werten zu unrealistischen Resultaten führen würden.

Aufgrund dieser Sachlage wird empfohlen, Messergebnisse, welche mit dem Messsystem SCRIM erhoben wurden, mit dem in Deutschland für die Bewertung verwendeten Bewertungsmassstab der Forschungsgesellschaft für den Strassen- und Verkehrswesen (Entwurf Nov. 1998) zu beurteilen.



## **7. FP 7, UMSETZUNG Projekt „Vergleichsstrecken“ Vergleichsstrecken mit unterschiedlichen oberen Tragschichten auf einer Nationalstrasse**

IMP Bautest AG, Oberbuchsiten

### **Ausgangslage**

#### **Kurzfassung der Zielsetzung:**

*Das Ziel dieser verschiedenen Versuchsstrecke besteht darin, die in den übrigen Forschungsprojekten optimierten Beläge sowie weitere Belagsvarianten im Massstab 1:1 einzubauen, deren Eigenschaften zu überprüfen sowie das Langzeitverhalten unter schwerer Belastung zu überwachen.*

#### **Arbeitsprogramm**

*Zur Realisierung des Forschungsprojektes FP 7 wurden folgende einzelne Arbeitsschritte realisiert:*

- *Vorbereitungsarbeiten*

*Erweiterte Eignungsprüfungen*

*Probeaufbereitungen*

*Probereinbau*

*Tragfähigkeitsmessung auf dem Objekt*

- *Instrumentierung der Probefelder mit Temperatur-, Deformation- sowie Spannungsmessungen.*

- *Einbau Kontrolle:*

*Vollständige Kontrolle sowie Einbaubegleitung inkl. Probenahme gemäss festgelegtem Qualitätskontrollplan*

- *Materialprüfungen:*

*Über die eigentliche Einbaukontrolle hinaus wurden Materialprüfungen am eingebauten Mischgut vorgesehen.*

- *Langzeitbeobachtung*

*Messkampagnen der Instrumentierung*

*Periodische Ebenheitsmessungen*

*Die Verknüpfungen des FP 7 mit den übrigen Forschungsprojekten sind in der Tabelle 4 grafisch dargestellt.*

	Versuche / Eigenschaften	FP 2, 3, 4	FP 7
<b>Vorbereitungsarbeiten</b>	Erweiterte Eignungsprüfung	LAVOC	IMP
	Probeaufbereitungen		IMP
	Probereinbau		IMP
	Tragfähigkeitsmessungen (FWD)	Infralab	Infralab
<b>Instrumentierung</b>	Déformation - Jauges KYOWA	IGT	LAVOC
	Température - Jauges PT100		
	Deformation vertikal		EMPA
<b>Einbaukontrolle</b>	Einbaubegleitung / Probenahme	IGT	IMP
	Baustoffe, Mischgut		
	Bohrkerne		
	DOR (Verdichtungskontrolle)		
	Tragfähigkeitsmessungen (FWD)	Infralab	Infralab
<b>Materialprüfungen</b>	Verkehrsimulator MMLS	EMPA	EMPA
	Druckschwell-Versuch, Gyrator		IMP
	Spaltzugversuch (Wasserempf.)		IMP
	Spurrinntest	EMPA	EMPA
	2-Pkt - Biegung; Modul, Ermüdung		LAVOC
	Kast; Modul, Ermüdung		EMPA
	Kälteviskosität und Kälteflexibilität		IfM
	Messkampagne (Instrumentierung)	IGT	EMPA-LAVOC
	Ebenheit längs und quer		IMP
	Projektleitung, Bericht	IGT, EMPA. LAVOC	IMP

**Tabelle 4**

Verknüpfung des Forschungsprojektes mit FP7 mit den weiteren Forschungsprojekten [2, 3, 5]

## **Festlegung der Versuchsfelder**

*Die Arbeitsgruppe FP7 unter der Leitung von Dr. J. Junker hat die Versuchsfelder festgelegt. Das Objekt auf der Nationalstrasse A2 ermöglichte den Einbau einer oberen Tragschicht und einer Deckschicht in einer Gesamtschichtdicke von 110 mm. Um einen repräsentativen Einbau zu ermöglichen wurde die Länge der einzelnen Versuchsfelder zu 220 m festgelegt; die Gesamtlänge der Probestrecke beträgt 2200 m. Auf diese Weise konnte pro Feld ca. 170 t HMT eingebaut werden. Im Zusammenhang mit den per 01.01.2005 in Kraft tretenden CEN Normen wurden neue Beläge mit einem Grösstkorn von 8 mm normiert. Die Deckschicht sollte zur Erprobung dieser für die Schweiz neuen Belagssorten dienen.*

*5 Felder sollten identisch sein mit den im Rundlauf vorgesehenen Feldern. Auf 5 weiteren Feldern wurden neuartige, zukunftsorientierte Belagsvarianten eingebaut.*

*Die Tabelle 5 gibt einen Überblick über den Aufbau und die gewählten Belagssorten der insgesamt 10 Versuchsfeldern.*

*Wie unter 1.4 erwähnt, standen insgesamt 10 Versuchsfelder zur Verfügung. Die Wahl der Mischgutsorten für die Trag- und Deckschicht basiert auf den nachstehend folgenden Ausführungen:*

**Felder im Rundlauf**

Feld Nr		1	2	3	4	5
DS	Mischgut	AB 11S				
	Schichtdicke	40 mm				
	Bindemittel	PmB E 50/70-65				
	Mineralstoffe	KW				
	Bemerkungen					
TS	Mischgut	HMT 22			EME 2	
	Schichtdicke	2x 70 mm				
	Bindemittel	B 50/70 1)	B 70/100 1)	PmB C 70/10-65	B 10/20	
	Mineralstoffe	KW	G			
	Bemerkungen					

**Felder auf der A2, analog Rundlauf**

**Felder auf der A2, zusätzliche Varianten**

Feld Nr		11	12	13	14	15	21	22	23	24	25	
DS	Mischgut	MR 8					SMA 8					
	Schichtdicke	30 mm					30 mm					
	Bindemittel	PmB E 50/70-65					PmB 50/70-65					
	Mineralstoffe	KW					KW					
	Bemerkungen											
TS	Mischgut	HMT 22			EME 2		EME 1	HMT 22				
	Schichtdicke	80 mm					80 mm					
	Bindemittel	B 50/70 1)	B 50/70 1)	PmB C 70/10-65	B 10/20		PmB E 10/30-70	B 50/70 2)	PmB NV I	PmB NV II		
	Mineralstoffe	KW	G			KW						
	Bemerkungen											

**Legende:**

- DS                    Deckschicht
- TS                    Tragschicht
- MR 8:                Raubelag (Macrorugueux analog SN 640 435a, jedoch mit einem 8-er Grösstkorn)
- SMA 8:               Splittmastix analog SN 640 432a, jedoch mit einem 8-er Grösstkorn
- EME 1                Enrobé à module élevé; gegen Spurrinnenbildung optimiert
- EME 2                Enrobé à module élevé; gegen Ermüdung optimiert
- G:                    felsgebrochener Splitt (alpiner Kalksandstein)
- KW:                  Kieswerk aus der Region der Baustelle (BL/AG) (Rheinkies; RK)

- 1)                    direkt destilliertes Bitumen
- 2)                    andere Raffinerie 1)

**Tabelle 5**

Übersicht der Versuchsfelder

## Auswahl der Mischgutsorten

### **Tragschichten:**

Bei den Feldern 11-15 wurde das gleiche Mischgut, eingebaut wie auf dem Rundlauf vorgesehen war. Die Wahl der entsprechenden Mischgutsorten wurde in den anderen Forschungsprojekten getroffen. In Ergänzung dazu wurden 5 Mischgutsorten für die Tragschichten der Felder 21 bis 25 ausgewählt. In allen diesen 10 Feldern wurde eine Tragschicht mit einem 22 – er Grösstkorn in einer Schichtdicke von 80mm eingebaut.

- **Feld 11**

In diesem Feld wurde eine konventionelle HMT 22 mit einem B 50/70 und den üblicherweise in der Aufbereitungsanlage verwendeten Gesteinskörnungen eingebaut. Das Bitumen B 50/70 stammte allerdings aus einer Raffinerie, in welcher die Bitumensorten direkt destilliert werden. In den Langzeitbeobachtungen der Vergleichsfelder die auf der A9 im Kanton Wallis eingebaut wurden konnten Vorteile dieser Bitumen-Provenienzen beobachtet werden.

- **Feld 12**

Bei dieser HMT wurde gegenüber dem Feld 11 nur die Provenienz der Gesteinskörnungen geändert (alpiner Kalksandstein anstelle des gebrochenen Rheinkies).

- **Feld 13**

Gegenüber dem Feld 12 wurde die Bindemittelsorte und der Füller geändert. Mit einem relativ weichen B 70/100 und einem Spezialfüller wurden ähnliche Mörtel Eigenschaften angestrebt. Leider wurde irrtümlich anstelle des B 70/100 ein B 50/70 eingebaut. Aus diesem Grund wird im Bericht beim Feld 13 als Bindemittel B 50/70 aufgeführt. Der verwendete Spezialfüller hatte zwar hochversteifende Eigenschaften, unterschied sich jedoch kaum vom in den anderen Feldern verwendeten Eigenfüller, der ebenfalls hochversteifende Eigenschaften aufwies.

- **Feld 14**

In diesem Feld wurde die Tragschicht mit einem bewährten PmB und den gleichen Gesteinskörnungen wie bei den Feldern 12 und 13 eingebaut.

- **Feld 15 EME2 und Feld 21 EME1**

Beim EME (Enrobé à module élevé) handelt es sich um eine französische Bauweise die ausführlich beschrieben wurde. Bei den EME gibt es zwei Mischguttypen nämlich EME 1 und EME 2. Das EME 1 ist ein Mischgut das speziell gegen die Spurbildung optimiert wurde, beim EME 2 handelt es sich um ein Mischgut, dass vor allem in Bezug auf die Ermüdungseigenschaften optimiert wurde. Grundsätzlich handelt es sich um eine HMT 22 mit einer sehr ähnlichen Korngrößenverteilung, wie dies in der Schweizernorm festgelegt ist, jedoch mit einem deutlich höheren Bindemittelgehalt, sowie der Verwendung eines Spezialhartbitumen.

- *Feld Nr. 22:  
HMT 22 mit PmB 10/30-70*

*Die Erfahrungen mit Spezialhartbitumen bei HMT 22 sind (in der üblichen Bindemitteldosierung) insbesondere beim Winterverhalten als schlecht zu beurteilen. Die neueren Entwicklungen bei der Formulierung von sehr standfesten Tragschichten liegen in der Verwendung eines harten polymermodifizierten Bindemittels des Typs PmB E 10/30-70.*

- *Feld 23:  
Beim Feld 23 handelt es sich um eine Wiederholung des Feldes Nr. 11 jedoch mit einer anderen Bindemittelprovenienz. Beim Feld Nr. 11 wurde das Bitumen B 50/70 der Raffinerie Feysin (ein sogenannter direkt destilliertes Bindemittel) gewählt. Beim Feld 23 wurde die gleiche Bitumensorte verwendet, die jedoch in einer konventionellen Raffinerie destilliert wurde.*
- *Felder 24 und 25:  
In diesen beiden Feldern wurden 2 Produkte eines niedermolekular-modifizierten Bindemittel verwendet. Dabei handelt es sich um Spezial-Bindemittel mit welchen Beläge bei tieferen Temperaturen eingebaut werden können. Bisher fehlen in der Schweiz entsprechende Erfahrungen.*

### **Deckschichten**

*Der Einbau dünner Deckschichten mit einem 8-er Grösstkorn war zum Zeitpunkt der Ausführung der Versuchsfelder neu. Die ein Jahr später eingeführte neue Belagsnorm sah diese neue Mischgutsorte vor. Es wurde daher die Gelegenheit wahrgenommen zwei verschiedene Mischguttypen einzubauen, ein MR8 (30mm) auf den Feldern 11 bis 15 und ein SMA8 (30mm) auf den Feldern 21 bis 25. Die Baustoffe blieben für beide Deckschichten unverändert.*

## Bestimmung der Sollwerte

### Vorgehen

Im Vorfeld des Einbaus der Vergleichsstrecken wurden die zu erreichenden Sollwerte festgelegt. Zu diesem Zweck wurde das in der Abbildung 2 dargestellte Vorgehen gewählt:

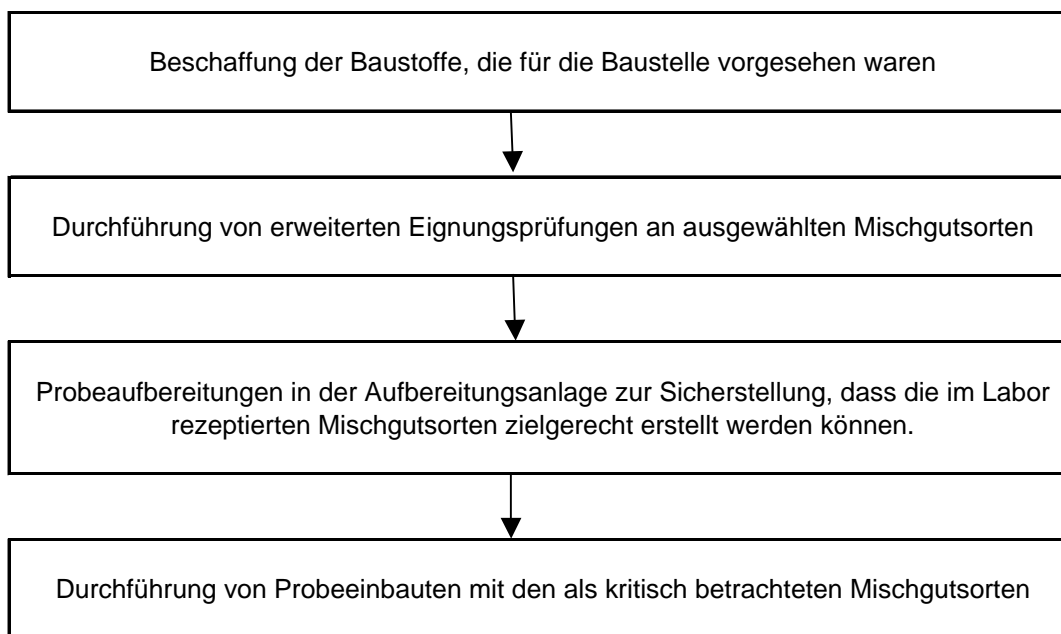


Abbildung 2

### Vorgehen zur Festlegung der Sollwerte

Wie bereits in der Tabelle 1 dargestellt, wurden die Eignungsprüfungen teilweise im Rahmen des Forschungsprojektes FP3 an der ETH Lausanne (LAVOC) durchgeführt. Es handelt sich dabei um die 5 Mischgutsorten, die für den Einbau auf dem Rundlauf der ETH Zürich vorgesehen waren. Tabelle 6 gibt eine Übersicht der durchgeführten erweiterten Eignungsprüfungen.

Zur Realisierung der Vergleichsstrecken hat das Tiefbauamt des Kantons Basellandschaft auf der Nationalstrasse A2 einen Abschnitt zur Verfügung gestellt. Da auch neuartige Mischgutsorten eingebaut werden sollten, mussten alle erdenklichen Massnahmen getroffen werden, um das Schadensrisiko auf der Nationalstrasse möglichst klein zu halten.

Aus diesem Grund wurden in der Aufbereitungsanlage für die meisten Mischgutsorten Probeaufbereitungen durchgeführt. Auf einem Objekt des Kantonsstrassennetzes wurde auch ein Probeeinbau mit den in Tabelle 7 erwähnten Mischgutsorten durchgeführt.:

Mischgutsorte	Feld Nr	Eignungsprüfung durchgeführt	Bemerkungen
<b>Bezeichnung</b>			
<b>Projekt</b>			
HMT 22 S	11	keine	2)
HMT 22 S	12	LAVOC	1)
HMT 22	13	keine	2)
HMT 22	14	keine	2)
EME 2	15	LAVOC	
EME 1	21	IMP	
HMT 22 S	22	IMP	
HMT 22 S	23	IMP	
HMT 22 S	24	keine	3)
HMT 22 S	25	IMP	
MR 8	11 ... 15	IMP	
SMA 8	21 ... 25	IMP	

- 1) Aus dem Forschungsprojekt 2 (EMPA) folgten Vorgaben für die Wahl der Siebsummenkurve und der Baustoffe. Im Forschungsprojekt 3 (LAVOC) wurde die Rezeptur optimiert
- 2) Die Rezepturen wurden von IMP derart berechnet, dass die Zusammensetzung des Mischgutes derjenigen des Feldes 12 entsprach
- 3) Gleiches Mischgut mit gleichen Gesteinskörnungen wie Feld 25. Die Felder 24 und 25 werden mit zwei ähnlichen Bindemittel ausgeführt

**Tabelle 6**  
Durchgeführte Eignungsprüfungen

Feld	Mischgut	Probeaufbereitung	Probearbeitung
11	HMT 22 RK B50/70d		
12	HMT 22 KST B50/70d	X	
13	HMT 22 KST Fü B50/70d	X	
14	HMT 22 KST PmB C		
15	EME 2	X	X
21	EME 1	X	X
22	HMT 22 RK PmB E	X	
23	HMT 22 RK B50/70	X	X
24	HMT 22 RK PmB NV I	X	X
25	HMT 22 RK PmB NV II		
	Deckschicht MR 8	X	X
	Deckschicht SMA 8		

### **Tabelle 7**

Durchgeführte Probeaufbereitungen und Probearbeiten

Die definitiven Sollwerte wurden aufgrund der Ergebnisse der Probeaufbereitungen bzw. der Probearbeiten festgelegt.

# Kommentare und Folgerungen

## **Messungen auf dem ursprünglichen Oberbau (11.05.2003)**

Der Modul des Belages liegt für alle 10 Versuchsfelder innerhalb einer relativ engen Spannbreite von 6287 ... 7416 Mpa. Dies überrascht nicht, da im ursprünglichen Zustand des Objektes ein einheitlicher Aufbau vorlag. Die geschätzten Rest-Gebrauchsdauer sind unrealistisch gross, aus diesen Zahlen ist zu entnehmen, dass aus Gründen der Dimensionierung kein Handlungsbedarf bestand. Folgerichtig ist keine Verstärkung erforderlich ( $DS_{\text{erf.}} = 0$ ).

Die Werte für  $E_2$  (Kies-Sand-Foundation) und  $E_3$  (Unterbau) liegen innerhalb der zu erwartenden Streuung mehrerer Messungen des gleichen Aufbaus.

## **Messungen nach dem Abtrag von 11 cm Belag (16.05.2003)**

Der E-Modul des Belages ist grösser als bei der Messung auf dem Gesamt-Aufbau. Dies ist damit zu erklären, dass die 2. Messung direkt auf der Tragschicht (HMT 40s) erfolgte, während die 1. Messung auf der Deckschicht (AB 11s) durchgeführt wurde.

Dass in einzelnen Feldern eine Verstärkung ( $SD_{\text{erf}} > 0$ ) nötig ist war zu erwarten.

Die Werte für  $E_2$  (Kies-Sand-Foundation) und  $E_3$  (Unterbau) liegen (wie zu erwarten war) in einer ähnlichen Grössenordnung wie bei der ersten Messung.

## **Messungen nach dem Einbau der neuen Beläge (05.06.2003)**

Aus den Ergebnissen der FWD-Messungen nach dem Einbau der neuen Beläge lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Die  $E_1$ -Werte (Belag) der Felder 11 bis 15 mit der Deckschicht MR8 sind tiefer als diejenigen der Felder 21 bis 25 mit der Deckschicht SMA 8. Da die Schichtdicke in beiden Fällen gleich war, lässt sich folgen, dass das Mischgut SMA 8 einen höheren  $E_1$ -Wert als das Mischgut MR8 aufweist. Diese Feststellung ist im Einklang mit den Ergebnissen des Druckschwellversuches der Eignungsprüfungen. Bei MR wurde eine Steigung im Wendepunkt von  $17 \cdot 10^{-4}$  [%/n], beim SMA von  $2 \cdot 10^{-4}$  [%/n] gemessen.
- Die beiden EME (Felder 15 und 21) zeigen die höchsten Werte. Dies stimmt sehr gut mit den bisherigen Erfahrungen überein

## **Einbau - Kontrolle**

### ***Organisation***

*Der kontinuierliche Einbau von 10 Versuchsfeldern à je 220 m mit unterschiedlichen Mineralstoffen und unterschiedlichen Bindemitteln ist sehr heikel und stellt sehr hohe Anforderungen an die Aufbereitungsanlagen. Aus diesem Grunde wurde im Rahmen einer Präqualifikation die in Frage kommenden Aufbereitungsanlagen beurteilt. Die Kriterien sowie die Anforderungen sind in der Tabelle 8 zusammengefasst.*

*Zudem wurde die Erreichbarkeit der Anlage unter Berücksichtigung anderer Grossbaustellen in die Präqualifikation mit einbezogen.*

*Die Präqualifikation erfolgte durch den Besuch jeder in Frage kommenden Anlage durch einen Vertreter der Forschungsstelle und eines Mitgliedes der Begleitkommission. Anlässlich dieses Besuches wurde ein Interview mit dem Verantwortlichen geführt, das protokolliert wurde.*

*Im Rahmen einer Vorsubmission auf Einladung wurde die Aufbereitungsanlage festgelegt.*

*Die Submission der Einbauarbeiten (ohne Belagslieferung für den Teil der Versuchsfelder) ermöglichte die Festlegung der einbauenden Unternehmung.*

	Kriterien	Optimale Anforderung
<b>Mineralstoffe alpiner Kalksandstein</b>	Lagerart und -kapazität	Kapazität für gesamte benötigte Menge
	Vordoseure	genügende Anzahl Vordoseure um zusätzliche Mineralstoffprovenienz zu bewältigen
<b>Leistung</b>	Aussiebung	5-fache für alle Körnungen der HMT 22
	Mischerkapazität	≥ 2 To (Chargenzeit ca. 60')
	Stundenleistung	120 Tonnen
	Kapazität Mischgutsilo	--
<b>Bindemittel</b>	Anzahl Bindemitteltanks	≥ 5
	Externer Anschluss an Bindemittelringleitung	vorhanden
<b>Füller</b>	Fremdfüller-Silos	2 Silos
<b>Transport</b>	Distanz zur Baustelle A2 Arisdorf	kurz
	Distanz zum Rundlauf EMPA	kurz

## **Tabelle 8**

*Kriterien für die Präqualifikation der Aufbereitungsanlage*

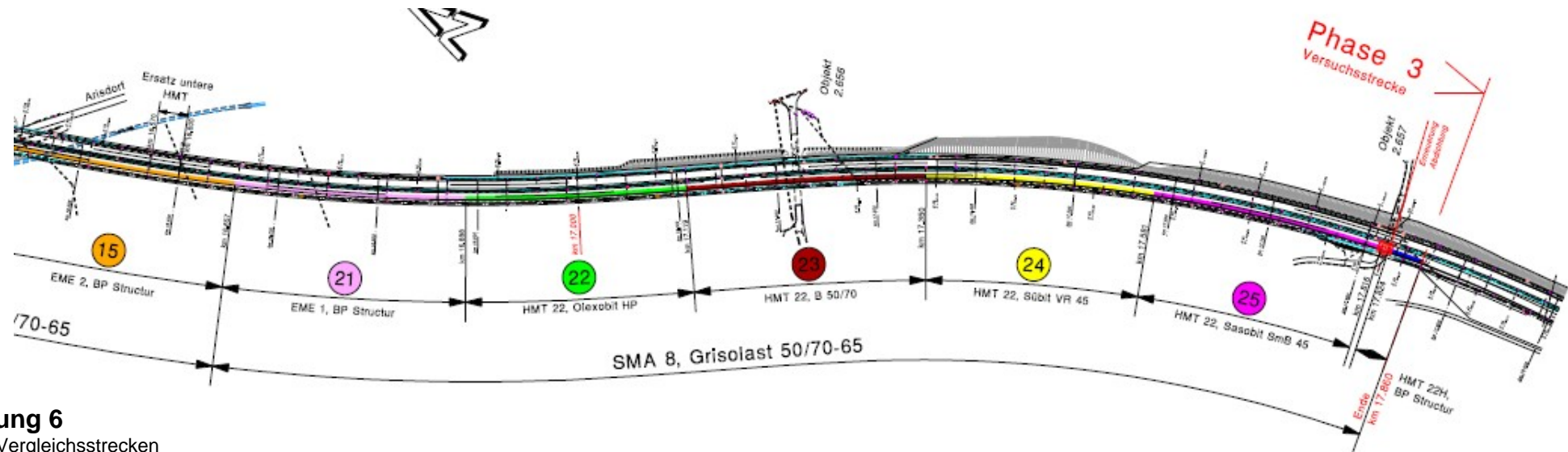
### **Objekt**

*Die Vergleichstrecken liegen auf der Nationalstrasse A2 im Kanton Basellandschaft. Die Massnahme „Belagssanierung 2003“ umfasste die Instandstellung des Belages im Abschnitt Augst-Sissach zwischen km 14'200 und 17'860 in Richtung Luzern. In drei Bauphasen wurde der Belag auf allen 3 Spuren (Standstreifen, Normal- und Überhohlspur) mit einem Teilersatz instandgestellt.*

*In der Bauphase 3 (km 15'460 bis 17'860) konnten die 10 Vergleichsstrecken auf einer Gesamtlänge von 2'400 m in der Normalspur erstellt werden.*

*Mit einer täglichen Verkehrsbelastung von 26'969 Fahrzeugen pro Tag in Fahrrichtung BE/LU und einem Lastwagenanteil von 14% ergibt sich eine tägliche äquivalente Verkehrslast TF von 5777 auf der Normalspur. Die Strecke ist somit der Verkehrslastklasse T6 zuzuordnen.*





**Abbildung 6**  
Lage der Vergleichsstrecken

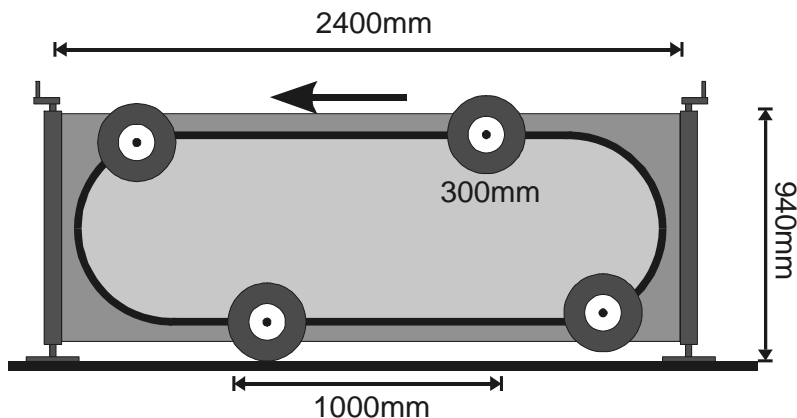
## In-Situ Messungen

### Standfestigkeit mit dem Verkehrslastsimulator MMLS

#### Messprinzip

Mit dem Verkehrslastsimulator MMLS3 (Model Mobile Load Simulator) wurde eine beschleunigte Prüfung von Strassenbelägen in Situ zwecks Untersuchung der mechanischen Eigenschaften unter Radlast auf den Felder 12 und 13 durchgeführt. Die gleiche Prüfung wurde auf den Felder 2 und 3 des Rundlaufs in Dübendorf durchgeführt. Auf dem Rundlauf wurden in den Felder 2 und 3 das gleiche Mischgut für die Tragschicht eingebaut wie in den Felder 12 und 13 der Vergleichsstrecken.

Beim MMLS3 handelt es sich um eine neuartige Prüfmethode. Auf einem Gestell sind Gummiräder mit einem Durchmesser von 300 mm befestigt, die sich in eine Richtung auf einem elliptischen Umlaufriemen mit einer Geschwindigkeit von bis zu 9 km/h bewegen. Der Luftdruck im Pneu beträgt 600 kPa. Es können sowohl konzentrierte als auch seitlich verschobene Radlasten aufgebracht werden. Die Spurrinnentiefe wird nach 72'000 Überrollungen bestimmt.

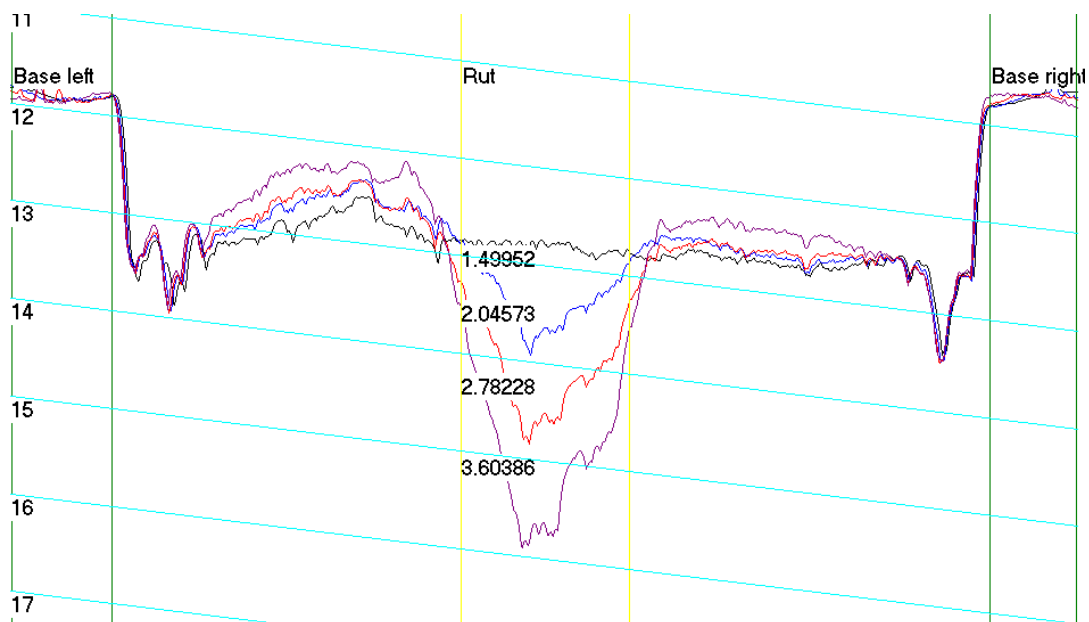


#### Abbildung 4

Schematische Darstellung des Prüfgerätes MMLS mit welchem die Spurrinnenbildung auf dem Objekt untersucht werden kann; die Breite des Prüfgerätes beträgt 600 mm.

#### Ergebnisse

Die Spurrinnentiefe wird kontinuierlich aufgezeichnet. Die Abbildung 5 zeigt die Entwicklung auf dem Feld 12, wobei die Spurrinnentiefe nach 2 und nach 4 Stunden sowie am Ende des Versuches eingetragen sind.



**Abbildung 5**

Spurrinnenbildung im MMLS-Versuch auf dem Feld 12; Messungen vor Versuchsbeginn, nach 2 und 4 Stunden sowie am Ende des Versuches.

Die Ergebnisse der auf dem Objekt durchgeführten Verkehrslastsimulation sind in der Tabelle 9 aufgeführt.

Sowohl bei den Vergleichsstrecken als auch beim Rundlauf ist die gleiche Rangierung feststellbar. Dass die Unterschiede beim Rundlauf wesentlich grösser sind, ist auf die wesentlich höhere Anzahl Überrollungen zurückzuführen. Auf dem Rundlauf erfolgten 1.4 Mio. Achsübergänge, während beim MMLS die Prüfung mit 72 000 Überrollungen durchgeführt wurde.

MMLS	Vergleichsstrecken		Rundlauf	
	Feld 12	Feld 13	Feld 2	Feld 3
Spurrinnenbildung [mm]	3.35	3.68	11.4	25.2

**Tabelle 9**

Messergebnisse der Spurrinnenprüfung mittels MMLS auf den Felder 12 und 13 der Vergleichsstrecken auf der Nationalstrasse A2 im Vergleich zu den gemessenen Spurrinnentiefen auf den Feldern 2 und 3 des Rundlaufs.

## Deformations- und Temperaturmessungen

Die Messfühler wurden durch das LAVOC der ETH Lausanne eingebaut. Das LAVOC führte auch die Messungen sowie deren Auswertungen durch. Der vollständige Bericht des LAVOC ist in französischer Sprache im Anhang L aufgeführt.

Im Bereich der Messfühler wurde – im Unterschied zu den Versuchsfeldern, bei denen nur die obere Tragschicht ersetzt wurde - der gesamte Asphalt-Aufbau neu erstellt.

## **Messprinzip**

*Einbau der Messfühler für Deformations- und Temperaturmessungen*

*Die Messfühler für die Deformationen (KYOWA KM-120-H2-11W1M3) und für die Temperaturmessungen (PT100) sind im Belag auf zwei verschiedene Niveaus eingebaut worden:*

- *Zwischen der unteren und der mittleren Tragschicht; d.h. in einer Tiefe von -22 cm.*
- *Zwischen der Deck- und der Tragschicht; d.h. in einer Tiefe von 4 cm.*

*Die Sonden wurden in den Feldern 12 und 15 eingebaut. In jedem Feld und auf jedem Niveau wurden 6 Deformationsgeber und zwei Temperaturregeber eingebaut. Die Sonden wurde seitlich und in Längsrichtung versetzt angeordnet, wie dies in den dargestellt ist.*

## **Langzeitbeobachtung**

### **Ebenheitsmessungen**

#### **Längsebenheitsmessungen**

*Die Messung der Längsebenheit wurde gemäss geltender Schweizer Norm **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** mit einem Goniograph durchgeführt. Dabei wird der Winkel zweier 1-Meter langer Sehnen gemessen, die am wahren Profil angelegt werden. Als massgebendes Kriterium gelten folgende 2 Parameter:*

- W     Der W-Wert stellt eine Neigungsänderung dar. Er wird als Winkel zweier benachbarter, an das Profil gelegter, 1-m langer Sehnen definiert. Er dient zur Beurteilung lokaler Unebenheiten und zur Berechnung des sW – Wertes*
- sW    Der sW-Wert ist die Standardabweichung der W-Werte über eine Messlänge von 250 m. Er dient im Gegensatz zum W-Wert zur Gesamtbeurteilung grösserer Abschnitte. Die Standardabweichung der W-Werte dient zur Gesamtbeurteilung eines Messabschnittes.*

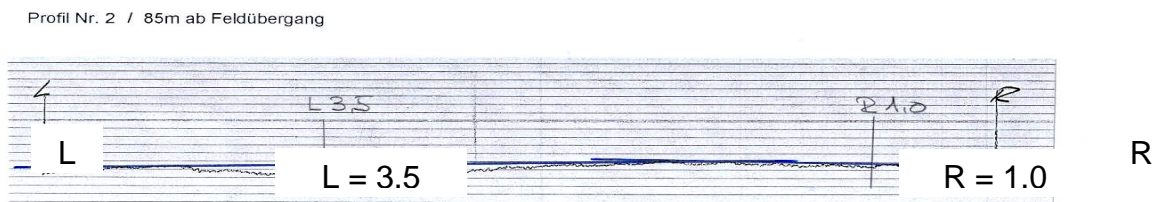
*Da die Länge der Versuchsfelder (200 m) etwa der in der Norm festgelegten Länge eines Messabschnittes entspricht, wurde pro Versuchfeld ein Wert pro Radspur bestimmt. Die erste Messung erfolgte kurze Zeit nach dem Einbau der Beläge im Juni 2003; anschliessend wurden während 3 Jahren jeweils im Juni weitere Messungen durchgeführt. In den Jahren 2003, 2004 und 2005 wurden die Messungen mit einem Goniographen durchgeführt. Da die Nationalstrasse A2 im Jahre 2006 aufgrund anderer Baustellen im vorgesehenen Zeitfenster nicht gesperrt werden konnte, wurden die Messungen mit einem Messfahrzeug (ARAN; Infralab SA) durchgeführt. Die Auswertung erfolgte in allen Messreihen gemäss der geltenden Schweizer Norm.*

#### **Querebenheitsmessungen**

*Die Messung der Querebenheit wurde gemäss geltender Schweizer Norm mit einem Oberflächenprofilschreiber („Planum-Gerät“) durchgeführt. Dabei wird der T-Wert als grösste Muldentiefe gegenüber der Verbindungslinie der höchsten Punkte innerhalb einer Messlänge von 4 m gemessen.*

Pro Messfeld wurden bei den Messungen 2003, 2004 und 2005 4 Profile aufgenommen, die Messpunkte wurden auf den Feldern gesichert. Aus den 4 Messergebnissen wurde der Mittelwert der linken und der rechten Radspur ermittelt. Beim vorgesehenen Messtermin 2006 konnte die Nationalstrasse aufgrund anderer Baustellen nicht gesperrt werden. Die Ebenheitsmessungen erfolgten mit einem Messfahrzeug (ARAN; Infralab SA) mit welchem ohne Verkehrsbehinderung alle 10 m ein Querprofil ausgewertet wurde.

Die Bestimmung des T- Wertes wird an einem Beispiel aufgezeigt. Selbstverständlich gibt es heute modernere Methoden (z.Beisp. ARAN-Messfahrzeug) um die Querebenheit zu messen. Da jedoch im vorliegenden Fall periodisch an den gleichen, auf dem Objekt gesicherten Profilen zu messen war, haben wir uns für die einfache, manuelle Methode entschieden.



## Materialprüfungen

### Übersicht

Zur Erfassung der mechanischen Eigenschaften der verschiedenen eingebauten Mischgutsorten, wurden verschiedene Prüfungen durchgeführt. Dabei wurde das Ziel verfolgt, vergleichende Betrachtungen der verschiedenen Untersuchungsmethoden durchzuführen. Im Focus stand auch ein Vergleich des Verhaltens der Probestrecken mit den Laborprüfverfahren und mit dem Verhalten der auf dem Rundlauf eingebauten Beläge.

In diesem Abschnitt werden nur noch Ergebnisse verhaltensbezogener Materialprüfungen aufgeführt; die Untersuchungen zur Kontrolle des aufbereiteten Mischgutes und der eingebauten Beläge wurden im Abschnitt 4 besprochen.

Die Versuche zielen dahin, 4 wesentliche Eigenschaften anzusprechen:

Den Verformungswiderstand bei sommerlichen Temperaturen

Das Ermüdungsverhalten

Das Kälteverhalten

Die Wasserempfindlichkeit des Mischgutes

Verformungswiderstand, Wasserempfindlichkeit und Ermüdungsverhalten wurden am Mischgut untersucht. Beim Kälteverhalten wurden auch Bindemitteluntersuchungen miteinbezogen, da das Bindemittel im Wesentlichen die Eigenschaften des Mischgutes bei tiefen Temperaturen prägt. Aus finanziellen Gründen wurden nicht sämtliche Versuche an allen Mischgutsorten durchgeführt.

Eigenschaft	Prüfung	Felder									
		11	12	13	14	15	21	22	23	24	25
Verformungs- widerstand	Versuchsfelder; Langzeitbeobachtung	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
	Rundlauf	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow					
	Verkehrslastsimulator MMLS auf A2		Red	Red							
	Verkehrslastsimulator MMLS Rundlauf		Red	Red							
	Spurrinnenprüfung LCPC	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
	Druckschwellversuch DSV	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
	Gyrator SHRP	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
	2-Pk-Biegung; Bestimmung des Modul						Green	Green			
Ermüdung	Versuchsfelder; Langzeitbeobachtung	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
	2-Pkt- Biegung, Ermüdungsversuch						Green	Green			
	Biegeschub-Axial, KAST	Red	Red	Red	Red	Red					
Kälte - verhalten	Versuchsfelder; Langzeitbeobachtung	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
	Abkühlversuch FGSV	Grey	Grey		Grey	Grey	Grey	Grey		Grey	Grey
	Retardationsversuch; BM <sup>1)</sup>	Grey	Grey		Grey	Grey	Grey	Grey		Grey	Grey
	Bending Beam Rheometer; BM <sup>1)</sup>	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
Wasserempfi ndlichkeit	Spaltzugversuch vor/nach Wasserlagerung gemäss <b>Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.</b>	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue

BM <sup>1)</sup> Versuch am Bindemittel

Blue	IMP Bauteil; Institut für Materialprüfungen; Oberbuchsitzen
Yellow	IGT; Institut für Geotechnik, ETH; Zürich
Red	EMPA; Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt; Abt. 113 Strassenbau; Dübendorf
Green	LAVOC, ETHL, Laboratoire des Voies de Circulation; Lausanne
Grey	IfM ; Institut für Materialprüfungen ; Rottweil De

**Tabelle 10**

Übersicht über die durchgeführten Prüfungen

## Folgerungen

*Da die Versuchsfelder auf einer stark belasteten Autobahn realisiert wurden, standen vor allem verformungsfeste Tragschichten im Vordergrund. Dies bedeutet, dass die heute festgestellten Unterschiede im Verhalten der einzelnen Versuchsstrecken relativ klein sind.*

### Prüfmethoden:

*In diesem Abschnitt soll die Aussagekraft der einzelnen Prüfmethoden miteinander verglichen werden.*

### Wärmeverhalten

*Leider können auf den Versuchsstrecken der A2 nach 3 Jahren noch keine deutlichen Unterschiede im Verformungsverhalten bemerkt werden. Obwohl sich der Bauherr bestimmt darüber freut, ist dies aus akademischer Sicht bedauerlich (☹). Die Bewertung der Prüfverfahren erfolgt somit sowohl auf der Basis des praxisnahen Rundlaufversuches, sowie auf der Basis von Plausibilitätsüberlegungen.*

### Rundlauf

*Bereits nach 111 000 Überrollungen konnte die gleiche Rangfolge der Versuchsfelder wie nach 1.4 Millionen Überrollungen festgestellt werden.*

*Der Rundlauf zeigt ganz klar die Vorteile der EME-Tragschicht (Feld 5) auf. Bei diesem Feld wurden die kleinsten Verformungen festgestellt.*

*Die Felder 1 und 4 liegen in einer ähnlichen Grössenordnung der Verformungen, was nicht plausibel ist. Bei gleicher Zusammensetzung enthält das Feld 4 ein PmB und felsgebrochene Gesteinskörnungen; das Feld 1 ein Bitumen B 50/70 und gebrochenes Rheinkies. Aufgrund der Erfahrungen der Praxis wären beim Feld 4 kleinere Verformungen zu erwarten gewesen.*

*Bei näherer Betrachtung der Umstände stellt man fest, dass sowohl die Hohlraum- und Verdichtungsgrade der oberen Tragschicht, als auch die Verformbarkeit der Foundationsschicht zwischen den einzelnen Feldern stark variieren:*

*Der Verformungswiderstand wird beim Feld 1 durch einen hohen Verdichtungsgrad (102.7 %) positiv beeinflusst, während die Verformbarkeit beim Feld 4 durch eine schlechte Verdichtung der Foundationsschicht ( $ME_1 = 52.5 \text{ MN/m}^2$ ) und eine mässige Verdichtung der oberen Tragschicht (Verdichtungsgrad 100.7%) begünstigt wird.*

*Die auf dem Rundlauf gemessenen Spurrinnen lassen sich nicht den verschiedenen Mischgutsorten der oberen Tragschichten alleine zuordnen.*

### Druckschwellversuch

*In Übereinstimmung mit dem Rundlauf zeigt der Druckschwellversuch beim Feld 5 die kleinste Dehnungsrate. Die Tragschicht EME wird als diejenige mit dem grössten Verformungswiderstand beurteilt. Bei den übrigen 4, Mischgutsorten die auf dem Rundlauf eingebauten wurden, ist keine deutliche Unterscheidung feststellbar.*

*Bei den Druckschwellversuchen an den Laborprüfkörper und Bohrkern der Felder 21 bis 25 können, mit Ausnahme des Feldes 22, keine relevante Unterschiede festgestellt werden. Bei diesem Feld 22 wurde eine Tragschicht mit einem harten PmB E 30/50-65 verwendet. Dieses Mischgut verhält sich im Druckschwellversuch sowohl bei den Laborprüfkörpern, wie auch bei den üblicherweise etwas weicheren Bohrkernen extrem verformungsfest.*

*Es wäre falsch, beim Druckschwellversuch einen Zusammenhang zwischen Laborprüfkörper und Bohrkern zu suchen. Sämtliche Werte sind als „gut“ zu beurteilen und liegen zu nahe beieinander. Korrelationen müssten über einen wesentlich grösseren Bereich der Ergebnisse gesucht werden.*

*Der Druckschwellversuch wird gesamtheitlich als taugliche Prüfung zur Beurteilung des Verformungsverhaltens betrachtet.*

### **Koaxialer Schub KAST**

*In Übereinstimmung mit dem Rundlauf zeigt der KAST-Versuch beim Feld 5 den grössten Modul. Die Tragschicht EME wird als diejenige mit dem grössten Verformungswiderstand beurteilt. Bei den übrigen 4 auf dem Rundlauf eingebauten Tragschichten ist keine Unterscheidung feststellbar.*

*An den Tragschichten der Felder 21 bis 25 wurde der KAST-Versuch nicht durchgeführt.*

*Der Koaxiale Schubtest wird als taugliche Prüfung zur Beurteilung des Verformungsverhaltens betrachtet.*

### **Spurrinntest**

*Beim Feld mit der kleinsten Spurrinntiefe im Rundlauf (Nr 5) wurde mit dem Spurrinntest die grösste Deformation gemessen. Die Beurteilung des Verformungswiderstandes im Spurrinntest stimmt mit der Beobachtung im praxisnahen Rundlauf nicht überein. Erfahrungen aus der Praxis zeigen ebenfalls, dass die Ergebnisse des Spurrinntests zu wenig differenzieren.*

*Der Spurrinntest kann als grobe Orientierungshilfe zur Beurteilung des Verformungsverhalten dienen, er ermöglicht jedoch bei hochstandfesten Mischgutsorten keine differenzierte Beurteilung.*

### **Gyrator**

*Die Ergebnisse des Gyrator-Versuches liegen alle sehr nahe beieinander; offenbar eignet sich dieser Versuch für eine differenzierte Betrachtung des Verformungswiderstandes kaum. Es ist allerdings zu präzisieren, dass die Prüfung gemäss den US-amerikanischen Vorschriften SHRP durchgeführt wurden. Inwieweit die EN-Prüfmethode eine Beurteilung des Verformungsverhalten ermöglicht hätte, wurde nicht untersucht.*

### **MMS**

*Bei der Spurrinnenbildung mittels MMLS konnte sowohl auf dem Rundlauf wie auch auf der A2 die gleiche Rangfolge beobachtet werden. Beim Feld 13 wurden etwas höhere Spurrinnen gemessen als beim Feld 12; diese Beobachtung stimmt auch mit den Messungen auf dem Rundlauf überein. Leider wurden nur zwei Felder gemessen, sodass keine breit abgestützte Aussage möglich ist.*

## **Falling Weight Deflectometer FWD**

*Es ist interessant festzustellen, dass die mit dem FWD auf dem Objekt gemessenen E-Moduli eine ähnliche Beurteilung wie die am Mischgut bestimmten E-Moduli (KAST) erlauben. Bei den Feldern 11 bis 14 liegen die Werte nahe beieinander, während das Feld 15 (EME-Mischgut) deutlich höhere Werte zeigt.*

## **Empfehlung zur Wahl einer Prüfmethode**

*Offenbar eignen sich dynamische Versuche wie der Druckschwellversuch oder der KAST-Versuch, um das Verformungsverhalten bituminöser Schichten zu beurteilen. Diese Feststellung wurde bereits beim FP2 gemacht. Für die Beurteilung des Verformungswiderstandes empfehlen wir diese beiden Versuche.*

*Die weiteren Betrachtungen erfolgen mit den Ergebnissen des Druckschwellversuches, da diese Prüfung an allen Mischgutsorten durchgeführt wurde.*

## **Kälteverhalten**

*Die Ergebnisse der Prüfungen zur Beurteilung des Kälteverhaltens können nicht mit Beobachtungen im Feld verglichen werden, da in den ersten 3 Jahren auf der Nationalstrasse noch keine Kälteschäden aufgetreten sind.*

*Sämtliche durchgeführte Prüfungen zeigen auf, dass die Felder 15 und 21 in Bezug auf das Kälteverhalten ungünstig sind. In beiden Feldern wurde das Spezialhartbindemittel B 10/20 verwendet. Interessant ist, dass sogar der altgediente und oft kritisierte Brechpunkt nach Fraass bei diesem Bindemittel auf die Kälteproblematik hinweist.*

## **Abkühlversuch FGSV**

*Der Abkühlversuch zeigt das ungünstige Kälteverhalten der Felder 15 und 21 auf. Auch bei den niedermolekular-modifizierten Bitumen der Felder 24 und 25 kann ein Unterschied aufgezeigt werden: das Feld 25 hat eine tiefere Bruchtemperatur. Die Unterschiede zwischen den übrigen Felder sind sehr klein.*

*Das Prüfverfahren zeigt keine Unterschiede zwischen den B 50/70 (Felder 11, 12) und den PmB (Felder 14, 22), was doch erstaunlich ist.*

## **Retardationsversuch (Kälteviskosität)**

*Die Prüfung der Kälteviskosität zeigt eine deutliche Gruppierung der Bindemittel wie folgt:*

*B 50/70 und PmB 70/100-48*

*PmB NV I und PmB E 10/30-70*

*PmB NV II*

*B 10/20*

*Bei den anderen Prüfungen ist eine derartige Klassierung nicht möglich.*

### **Bending-Beam-Rheometer BBR**

*Diese Prüfung wurde bei nur 4 Bindemittel der Tragschichten, sowie dem PmB der Deckschicht durchgeführt.*

*Die differenzierte Betrachtung zwischen der beiden PmB NV, die mit den Prüfungen Abkühlversuch und Retardationsversuch möglich sind, können mit dem BBR nicht nachvollzogen werden.*

*Diese Prüfung wurde zur Beurteilung nicht-modifizierter Bindemittel entwickelt. Deren Anwendung auf polymer-modifizierte Bindemittel ist in der Literatur umstritten.*

### **Koaxialer Schubversuch KAST**

*Der Koaxiale Schubversuch KAST wurde bei +5°C durchgeführt; mit dieser Prüftemperatur kann das Kälteverhalten nur bedingt beurteilt werden. Da Versuche bei tieferen Temperaturen im KAST nicht möglich sind, kann das Kälteverhalten versuchstechnisch nicht angesprochen werden.*

*Allerdings besteht jedoch die Möglichkeit, mit einer Masterkurve und dem Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzip E - Moduli bei tieferen Temperaturen zu berechnen.*

### **Empfehlung für die Wahl einer Prüfmethode**

*Aufgrund der durchgeführten Versuche empfehlen wir das Bestimmen der Kälteviskosität für die Beurteilung des Kälteverhaltens eines Mischgutes. Ein wesentlicher Vorteil dieser Prüfung besteht darin, dass das Mischgut einem Kälteversuch unterzogen wird und nicht nur das reine Bindemittel wie dies beim Brechpunkt nach Fraass beziehungsweise beim Bending-Beam-Rheometer der Fall ist.*

*Im Vergleich zum Abkühlversuch führt die Kälteviskosität zu einer deutlicheren Aussage.*

*Die weiteren Betrachtungen erfolgen mit den Ergebnissen der Kälteviskosität.*

## **Bewertung der verschiedenen Tragschichten**

*Die 10 verschiedenen Tragschichten und die zwei Deckschichten wurden in einer guten Qualität eingebaut. Die Anforderungen an die eingebauten Schicht ( Verdichtungsgrad, Hohlraumgehalt und Schichtdicke ) wurden erfüllt. Das Mischgut wurde ( mit Ausnahme des Feldes 13 ) in der gewünschten Zusammensetzung angeliefert.*

### **Tragschichten ACT**

#### **Provenienz der Gesteinskörnungen**

*Im Projekt FP2 wurden Objekte des Nationalstrassen-Netzes, die sich jahrelang positiv verhalten haben, ausgewählt und untersucht. Eine der Folgerungen aus diesen Untersuchungen war, dass sich Beläge mit felsgebrochenem Splitt besonders gut verhalten haben. Aus diesem Grunde wurden 4 Felder auf dem Rundlauf und auf der Versuchsstrecke mit diesen Gesteinskörnungen aufbereitet.*

*Aus den Ergebnissen der Untersuchungen auf dem Rundlauf sowie aus den Laborergebnissen lassen sich jedoch keine Vorteile der Verwendung des felsgebrochenen Splittes gegenüber dem gebrochenen Kies feststellen. Die Beobachtungen auf den Versuchsfeldern der A2 sind diesbezüglich nach 3 Jahren noch zu wenig aussagefähig,*

#### **Direkt destilliertes Bitumen**

*Im Gegensatz zu den langjährigen Beobachtungen auf den Vergleichstrecken auf der A 9 konnten weder in den durchgeführten Laborprüfungen, im Rundlauf noch aus den bisherigen Beobachtungen (4 Jahre) auf den Versuchstrecken markante Unterschiede festgestellt werden.*

#### **Polymer-modifiziertes Bitumen**

*Beim Mischgut im Felde 14 (PmB 70/100-48) konnte – bei gleichem Wärmeverhalten - ein deutlich günstigeres Kälteverhalten als im Feld 11 (B 50/70) nachgewiesen werden.*

*Im Feld 22, mit einem deutlich härteren PmB als im Feld 14, konnte wohl ein etwas ungünstigeres Verhalten bei –15°C beobachtet werden, ohne dass allerdings in der Wärme Vorteile zu erkennen waren. Vermutlich liegen die mechanischen Eigenschaften in einem Bereich, indem die angewendeten Prüfverfahren nicht mehr differenzieren. Die Felder 14 und 22 weisen hervorragende Verformungseigenschaften bei erhöhten Temperaturen auf.*

## **EME**

*Die Erfahrungen mit den beiden EME-Tragschichten EME-1 und EME-2 sind als positiv zu beurteilen.*

*Bei Aufbereitung und Einbau dieser Beläge traten keine Probleme auf. Der Einbau des EME-2 ist allerdings etwas gewöhnungsbedürftig, denn das heisse Mischgut ist sehr fett und „speckig“.*

*Die guten Eigenschaften bei hohen Temperaturen konnten sowohl auf dem Rundlauf (EME-2; Feld 5) wie auch bei den Laborprüfungen bestätigt werden. Die mit dem FWD bestimmten E-Moduli zeigen die höchsten Werte bei den zwei EME-Tragschichten.*

*Die Prüfungen im Bereich tiefer Temperaturen decken allerdings auf, dass das Kälteverhalten dieser Beläge ungünstig ist. Wie die ersten Erfahrungen aus der Praxis bereits zeigen, dürfen auch die EME - Tragschichten in bestimmten Höhenlagen nicht ohne eine darüber eingebaute Deckschicht „überwintert“ werden.*

*Die Wasserempfindlichkeit des EME-1 wurde als knapp genügend beurteilt. Ob es sich dabei um einen Einzelfall handelt oder ob die mit einem Spezial-Hart-Bitumen aufbereiteten Mischgute diesbezüglich generelle Schwächen haben, kann noch nicht beurteilt werden.*

### **Niedertemperatur Asphalt**

*Bei der Aufbereitung und dem Einbau dieser Beläge traten keine Probleme auf.*

*Beide Tragschichten verfügen über jeweils gute mechanische Eigenschaften auch bei hohen Temperaturen. Bei tiefen Temperaturen konnten deutliche Unterschiede zwischen den beiden verwendeten Produkten beobachtet werden.*

*Die Wasserempfindlichkeit liegt im Rahmen der übrigen untersuchten Mischgutsorten.*

*Offenbar können die Vorteile dieser Bindemittel-Modifikation genutzt werden ( tiefere Einbautemperatur ), ohne dass im Gebrauchsverhalten Nachteile zu erwarten sind.*

### **Vergleich der beiden Deckschichten MR / SMA**

*Die beiden Deckschichten MR8 und SMA8 haben sich bisher sehr gut verhalten; auf dem Objekt sind keine Unterschiede feststellbar.*

*Die mechanischen Eigenschaften der beiden Mischgutsorten sind sehr ähnlich. Es wurde allerdings mit dem FWD, bei welchem die Moduli der einzelnen Schichten des Oberbaus bestimmt wurden, Unterschiede festgestellt. Die E-Moduli der Beläge mit SMA sind dabei systematisch grösser als diejenigen mit MR. Dies ist umso erstaunlicher, als der E-Modul des gesamten Belages mit einer Schichtdicke von 280 mm bestimmt wurde.*

### **Weiteres Vorgehen**

*Der bisherige Beobachtungszeitraum von 3 Jahren ist aber zu kurz, um unterschiedliche Entwicklungen der verschiedenen Versuchsfelder auf der Nationalstrasse zu beobachten. Die Beobachtungen der Versuchsfelder über einen längeren Zeitraum von gesamthaft etwa 10 Jahren sind daher unbedingt erforderlich.*



# E WERTUNG DER FORSCHUNGSPROJEKTE (FS)

( Wertung durch die Forschungsstellen FS )

## 1. FP 1: Verhaltensbilanz der Beläge auf Nationalstrassen

Viagroup SA, Lausanne und Winterthur

### FP 1 - ZUSAMMENFASSUNG AUS DEM BERICHT

*Der vorliegende Bericht stellt das Ergebnis einer Forschungsprojektes dar, das sich um die Dauerhaftigkeit der Beläge auf den Nationalstrassen im Zeitraum zwischen der Verkehrseröffnung der einzelnen Strecken bis zum Ende des Jahres 2000 befasst. Das Projekt mit dem Titel "Verhaltensbilanz der Beläge auf den Nationalstrassen" ist Bestandteil des Forschungspaktes "Unterhalt 2000", welches mittels mehreren Einzelaufträgen einen Beitrag zur Erforschung dauerhafterer Beläge liefert.*

*Will man das Verhalten der Beläge im betrachteten Zeitraum analysieren, so muss auch den Veränderungen bezüglich verschiedener Randbedingungen eine gebührende Aufmerksamkeit gewidmet werden. Im Rahmen der hier vorgestellten Studie wurden insbesondere die folgenden Einflussparameter untersucht:*

- Veränderungen im Bereich der gültigen Normen,
- Verkehrsentwicklung.

*Die Veränderungen im Normenumfeld betreffend nicht nur die Auswahl der Materialien und deren Anforderungen sondern darüber hinaus auch die Dimensionierung des Oberbaus und selbst gewisse geometrische Kenngrössen (Quergefälle), die ebenfalls Auslöser von Instandsetzungsmassnahmen sein können.*

*Bei den Untersuchungen zur erfolgten Verkehrsentwicklung seit Beginn des Nationalstrassenbaus bis Ende 2000 wird sowohl der Zuwachs der Gesamtfrequenzen betrachtet als auch die Zunahme der äquivalenten Verkehrsbelastung. Für die Evaluation der letztgenannten Grössen wurden einerseits die Ergebnisse der im 5-jährigen Rhythmus stattfindenden Kategorienzählungen berücksichtigt, ebenso auch Forschungsergebnisse zur Achslastentwicklung.*

*Stellvertretend für das ganze Nationalstrassennetz, dessen zeitliche Entwicklung ebenfalls dargestellt wird, wird die Erhaltungsgeschichte am Beispiel der Nationalstrassen in den Kantonen GR, TI und VD analysiert und ausgewertet. Die Aufmerksamkeit richtet sich dabei auf den Zeitpunkt der ersten, bzw. der zweiten Instandsetzungsmassnahme sowie auf die kantonal unterschiedliche Materialwahl der Beläge bei den verschiedenen Erhaltungsmassnahmen. Dieser Unterschied in der Materialwahl beeinflusst die Dauerhaftigkeit der Beläge aus der ersten oder der zweiten Erhaltungsmassnahme.*

*Die teilweise fehlenden Informationen über den Zustand der Beläge im Zeitpunkt einer Erhaltungsmassnahme wurden mittels Auswertung der Zustandsdaten des Nationalstrassennetzes aus den Jahren 2000 und 2001 kompensiert. Wie die Ergebnisse zeigen, wurde der Zeitpunkt der Durchführung von Erhaltungsmassnahmen im Allgemeinen so gewählt, dass kritische Zustände und schwere Schäden auf dem Nationalstrassennetz vermieden werden konnten, respektive wurden.*

## **FP 1 - PROJEKTABSCHLUSS ( ARAMIS – Protokoll )**

### *FP 1 - ZUSAMMENFASSUNG DER RESULTATE (Wertung der FS )*

Die **Auswertung der Verkehrsdaten** hat gezeigt, dass die Verkehrsbelastung seit Beginn des Nationalstrassenbaus um den Faktor 4 zugenommen hat, mit entsprechenden Auswirkungen auf den Zustand bzw. Folgen für die Anforderungen an die Belagsschichten. Aus der Sicht der Beanspruchung müssen Beläge mit der gleichen Gebrauchsdauer wie in den vergangenen 15 bis 20 Jahren unter der Vorgabe von mindestens der doppelten Anzahl Belastungswiederholungen gegenüber den bisherigen Belagschichten angewendet werden.

Die **ersten Deckschichten** der Nationalstrassen wurden nach einer durchschnittlichen Gebrauchsdauer von 15 bis 16 Jahren ersetzt oder erneuert. Bei separat durchgeführten Erhaltungsmassnahmen für den linken Fahrstreifen wird eine ca. 50% höhere Gebrauchsdauer erreicht. Die Materialwahl hat einen grossen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit der ersten Erhaltungsmassnahmen. Beläge und Deckschichten moderner Konzeption mit modifizierten Bindemitteln lassen unter den gesteigerten Beanspruchungen ähnliche Gebrauchsdauern erwarten. Der wiederholte Einbau der ursprünglichen Materialien führt zu einer Reduktion der Gebrauchsdauer bis zu 25%.

**Das Nationalstrassennetz** befindet sich gemäss den Ergebnissen der netzweiten Zustandserfassung / Längsebenheit, Querebenheit und Griffigkeit ) und der nur teilweise untersuchten Belagschäden in einem insgesamt guten Zustand. Daraus lässt sich schliessen, dass die Durchführung von Massnahmen jeweils so angesetzt wird, dass kritische Zustände und schwere Schäden vermieden werden können.

### *FP 1 - ZIELERREICHUNG ( Wertung der FS )*

Im Rahmen dieser Untersuchungen konnten die bisherigen Gebrauchsdauern von 15-16 Jahren auch als Zielgrösse für neue Beläge, die auch den gesteigerten Anforderungen zu genügen vermögen mit einer Zeitperiode von 15 bis 16 Jahren für die Beläge auf dem rechten Fahrstreifen definiert werden. Auf den durch den Schwerverkehr weniger belasteten Überholspuren sollte eine um 50% längere Nutzungsdauer erreicht werden können. Damit konnten die in der Zielsetzung dieser Arbeit gestellten Fragen grundsätzlich beantwortet werden.

Die ursprüngliche Fragestellung "wie lange hat eigentlich Bauweise/Belag xy gehalten?" hat sich insofern als hinfällig erwiesen, als dass infolge zunehmender Beanspruchung der Beläge die früher als genügend bis gut betrachtete Lösungen den heutigen Anforderungen nicht mehr genügen.

### *FP 1 - FOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN ( Wertung der FS )*

Bei den Erhaltungsmassnahmen ist zu beachten, dass die Verkehrsbeanspruchung auf neu eingebauten Flächen wesentlich früher einsetzt als beim Neubau und deshalb besondere Vorsichtsmassnahmen und entsprechende Regelungen erforderlich sind.

Die Entwicklung der Normen hat im Allgemeinen mit den gesteigerten Anforderungen und Beanspruchungen Schritt gehalten. Wichtig ist dabei, dass neue Lösungen auch rechtzeitig eingeführt respektive umgesetzt werden.

## 2. FP 2: Dauerhafte Komponenten, evaluiert auf der Basis bewährter Strecken.

Abt. Strassenbau / Abdichtungen der EMPA

### FP 2 - ZUSAMMENFASSUNG AUS DEM BERICHT

#### Zielsetzung

Ziel der Arbeit bestand im Erarbeiten von massgebenden, performance-orientierten, und international ausgerichteten Dauerhaftigkeits - Kriterien für die hochwertigen Mischgutkomponenten; einzeln und im Verbund betrachtet. Dabei sollten konkrete Antworten auf folgende Fragen gefunden werden:

- Sind im Anlieferungszustand hochwertige Komponenten auch dauerhaft?
- Ist das Zusammenwirken dieser Komponenten dauerhaft?
- Wie kann die Dauerhaftigkeit evaluiert und bewertet werden?
- Welche Prüfverfahren und Kriterien sind besonders aussagekräftig und notwendig?
- Gibt es Ansätze, die Dauerhaftigkeit zu verbessern?

#### Zentrale Elemente

Die zentralen Elemente des FP2 "Dauerhafte Komponenten" bilden somit:

- Ermitteln der Eigenschaften von Belagsschichten erfolgreicher Beläge und ihres Praxisverhaltens
- Rekonstruktion von Belagsschichten mit neuwertigen Komponenten und systematische Untersuchung mit modernen Methoden
- Gezielte Variationen von Komponenten und Mischgutzusammensetzungen der rekonstruierten Schichten, um das Verhalten zu optimieren (3)
- Laboruntersuchungen der gegenüber 3 geänderten Belagsschichten zum Vergleich mit den rekonstruierten
- Untersuchung des Einflusses der Alterung der Komponenten auf das Verhalten der rekonstruierten Belagsschichten zwecks Ermittlung der Dauerhaftigkeit

## Ergebnisse

*Die Charakterisierung der evaluierten Beläge befindet sich im Kapitel 5.1. Die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften der Belagsschichten und des aufgearbeiteten Bindemittels zeigen deutliche Unterschiede, die in Zusammenhang mit dem Verhalten der Strassenabschnitte stehen.*

*Die Untersuchung der Mineralstoffe sind im Kapitel 5.2 und die des aufgearbeiteten Bindemittels im Kapitel 5.4 zusammengefasst. Zwischen den Bindemittelseigenschaften und den mechanischen Eigenschaften der Strassenabschnitte bestehen Relationen.*

*Die Ergebnisse der Rekonstruktion ausgewählter Schichten sind in den Kapiteln 5.5 und 5.6 zusammengestellt. Im Kapitel 5.7 sind sie mit den originalen Schichten verglichen.*

*Im Kapitel 5.8 wird anhand Untersuchung von rekonstruierten Schichten gezeigt, dass sich ein Polymerbitumen einem Strassenbaubitumen als überlegen erweist.*

*Kapitel 5.9 stellt die Ergebnisse der Untersuchungen von Vergleichsstrecke und Rundlauf zusammen.*

## Folgerungen

*Im Evaluationsprozess zeigte sich, dass der Informationsstand über das schweizerische Strassennetz und dessen Performance für Forschungszwecke in Hinblick auf die verwendeten Baustoffe teilweise unzureichend ist. Damit ergibt sich, dass aufgrund der vorhandenen Informationen nur bedingt verlässlichen Folgerungen über Vor- und Nachteile verschiedener Konzepte gemacht werden können. Angesichts des hohen Wertes des schweizerischen Strassennetzes und der hohen Kosten, die seine Instandhaltung beansprucht, muss dieser Punkt verbessert werden.*

*Im Evaluationsprozess wurde eine erhebliche Anzahl sich sehr gut bewährender Strassenabschnitte mit Teerbitumen als Bindemittel gefunden. Offensichtlich bringen Teerbitumen wesentlich Vorteile mit sich. Aufgrund in Absprache mit der Begleitkommission wurde dann diese Fragestellung nicht weiter verfolgt; dies wegen der bekannten, unakzeptablen gesundheitlichen Nachteile. Es müsste dennoch in naher Zukunft abgeklärt werden, ob sich nicht die selben Vorteile auch mit einem Strassenbaubitumen oder Polymerbitumen (PmB) und Zusätzen erreichen liessen.*

*Die klassischen Untersuchungen zeigen, dass die ausgewählten Beläge, obwohl nach früherer Norm gebaut, in den meisten Punkten die später in Kraft gesetzten Normen erfüllen. Da allerdings nur sich gut bewährende Strassenabschnitte in die Forschung mit einbezogen worden waren, belegt das nur die Möglichkeit hochbelastete Strassen langer Gebrauchsdauer nach diesen Normen zu bauen. Normen sollten aber mehr bieten, nämlich eine hohe Wahrscheinlichkeit dieses Ziel zu erreichen.*

*Die gebrauchtorientierte Alterung von Mischgut für die Herstellung von Prüfkörpern und eine darauf basierende Langzeitbeurteilung kann als ein zukunftsweisender Ansatz für die Untersuchung von Mischgut betrachtet werden, vorausgesetzt, die Eignungsprüfung und der Einbau erfolgt mit dem gleichen Bindemittel. Die Forschungsarbeit umreist das Verfahren aufgrund der Ergebnisse der Rekonstruktion.*

*Die Variation der Komponenten bei der gebrauchtorientierten Alterung scheint ein doch vielversprechender Ansatz zu sein. Dabei kann es nicht um ein Screening gehen, dazu ist die Methode zu aufwendig. Sie kann aber dazu dienen, mit einfacheren Verfahren ermittelte neuere Rezepturen im Laborverfahren vertieft zu validieren.*

Die Untersuchungen der Vergleichsstrecken und des Rundlaufs zeigen bezüglich der Felder 2/3 und 12/13:

- keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Bindemitteln im Anlieferungszustand bei den klassischen Prüfungen Penetration und Erweichungspunkt,
- einen deutlichen Unterschied im Dynamischen Schub Rheometer (DSR) an den gleichen Bindemitteln,
- Unterschiede im Spurbildungsverhalten sowohl mit dem LCPC-Test und mit dem Model Mobile Load Simulator MMLS,
- Unterschiede in den mechanisch-physikalischen Eigenschaften der Asphaltprobekörper.

Soweit aufgrund einer vollständigen Untersuchung an nur insgesamt 4 Feldern (2, 3, 12 und 13) Aussagen gemacht werden können, weisen die Ergebnisse darauf hin, dass

- selbst kleine Unterschiede im Bindemittel die mechanischen Eigenschaften des verdichteten Mischguts merklich beeinflussen und
- dass DSR bezüglich des Verformungsverhaltens zu relevanteren Aussagen führt als die klassischen Untersuchungen Penetration und Erweichungspunkt.

## **FP 2 - PROJEKTABSCHLUSS (ARAMIS - Protokoll)**

### *FP 2 - ZUSAMMENFASSUNG RESULTATE ( Wertung der FS )*

Das Projekt zeigte, dass die untersuchten erfolgreichen ( langlebigen ) Beläge auch den heutigen Normanforderungen für Asphaltbeton genügen. Somit ist es möglich, Beläge für hochbelastete Strassen nach dieser Norm zu bauen. Da aber nur erfolgreiche Beläge untersucht worden waren, kann aus dieser Forschung nicht geschlossen werden, dass die Beachtung der Normen zwingend zu Belägen langer Gebrauchsdauer führen.

Bei den im Projekt gefundenen dauerhaften Nationalstrassenabschnitten mit Teerbitumen zeigten sich technisch positive Eigenschaften. Es wäre daher anzustreben, nach Konzepten zu suchen, die zu Belägen führen, die sich in ähnlicher Weise wie diese Nationalstrassenabschnitte verhalten, jedoch nicht den Nachteil der Gesundheitsgefährdung aufweisen. Ein viel versprechender Ansatz zur Erreichen ähnlich dauerhafter Beläge ohne teerhaltige Bindemittel sind Zusätze, die auch im Bereich höherer Temperaturen den Asphalt dünnflüssiger machen. Zudem zeigen die Ergebnisse des Forschungsauftrages positive Aspekte für die Verwendung von mit SB - Blockpolymeren modifizierten Bindemitteln.

Physikalisch orientierte Prüfverfahren, wie das Bestimmen der Steifigkeit und des Widerstandes gegenüber Ermüdung, erwiesen sich im Projekt als erfolgreich. Sie lieferten aussagekräftige und detaillierte Informationen über das Material und über den Zustand der Strassen.

Die im Zusammenhang mit den Vergleichsstrecken BL und dem Rundlauf gemachten weiteren Untersuchungen zeigen dass auch beim Bindemittel die mechanische Prüfung mit dem DSR die aussagekräftigeren Ergebnisse lieferten als die klassischen ( empirischen ) Prüfungen Penetration und Erweichungspunkt.

Das Projekt konnte durch Variation der Komponenten Mischgutzusetzungen mit neuen Komponenten ermitteln, welche im Vergleich zu den erfolgreichen Belägen ebenfalls gute Chancen für eine hohe Dauerhaftigkeit haben. Beispielsweise konnte aus einem erfolgreichen AB 11 rechnerisch ein AB 8 formuliert werden, der gute mechanische Kennwerte aufwies.

## FP 2 - ZIELERREICHUNG ( Wertung der FS )

Die Ziele der Forschung wurden erreicht, indem die aufgrund des Forschungsprojektes gestellten Fragen beantwortet werden konnten. Im Besonderen sind das:

- Sind im Anlieferungszustand hochwertige Komponenten auch dauerhaft?

Gemäss den Untersuchungen der Strassenabschnitte sind hochwertige Zuschlag - stoffe dauerhaft. Bei Deckschichten muss auch ein ausreichender Widerstand gegen das Polieren gefordert werden. Gemäss den Ergebnissen des Forschungsauftrages erwies sich das SBS-Blockpolymer modifizierte Bindemittel auch bei den im Rahmen der Rekonstruktion angewendeten Bedingungen als dauerhaft.

- Welche Prüfverfahren u. Kriterien sind besonders aussagekräftig und notwendig?

Nach den Erkenntnissen der Forschungsarbeiten sollten in Zukunft für hochbelastete Strassen fundamentale und nicht empirische Anforderungen gestellt werden. Das sind insbesondere die Steifigkeit, der Widerstand gegen Ermüdung und die Verformungsbeständigkeit. Es wurden Vorschläge zuhanden der europäische Normung formuliert, damit auch in der Schweiz die entsprechenden Prüfungen in einer machbaren Form implementiert werden können.

- Gibt es Ansätze, die Dauerhaftigkeit zu verbessern?

Ein viel versprechender Ansatz besteht in Zusätzen, die den Asphalt bei höheren Temperaturen dünnflüssiger machen. Daneben sollte auch dem Oxidationsschutz Beachtung geschenkt werden

- Wie kann die Dauerhaftigkeit evaluiert und bewertet werden?

Fazit: Die angestrebte Methode der gebrauchsorientierten Alterung kann speziell (eher nur...) bei Grossprojekten eingesetzt werden, um einen Vorschlag für eine verbesserte Mischgutformulierung vertieft zu prüfen. Voraussetzung ist allerdings, dass bei einer solchermassen erweiterten Eignungsprüfung und beim Einbau das gleiche Bindemittel gebraucht werden. Dies würde die Abschätzung des tatsächlichen Gebrauchsverhaltes über einen grösseren Zeitraum erlauben.

## FP 2 - FOLGERUNGEN / EMPFEHLUNGEN (Wertung der FS )

Für hochbelastete Strassen sollten in Zukunft physikalische (fundamentale) und nicht mehr empirische Anforderungen gestellt werden.

Bindemittel sollten so verbessert werden, dass sie ähnlich positive Eigenschaften wie die arbeitshygienisch unzumutbaren Teerbitumen haben.

Die im Projekt aufgezeigte Methode, ein Mischgut auf Basis einer bewährten Rezeptur zu skalieren, kann in der Praxis erhebliche Kosteneinsparungen mit sich bringen.

Die Methode der gebrauchsorientierten Alterung kann bei Grossprojekten eingesetzt werden, um einen Vorschlag für eine Mischgutformulierung vertieft zu prüfen. Das erlaubt eine Abschätzung des Gebrauchsverhaltes über einen grösseren Zeitraum.

Die Datenbasis über die in die Untersuchung einbezogenen Strassenabschnitte war in Hinblick auf die verwendeten Baustoffe teilweise mangelhaft. Eine zentrale Stelle, welche nachhaltig Performancedaten erhebt und diesen ausserordentlich wertvollen Erfahrungsschatz pflegt, würde wertvolle Erkenntnisse zum Thema dauerhafte Belagsaufbauten liefern.

### 3. FP 3: Durabilité des enrobés

***Partie 1 : Modélisation des Charges d'essieu,***

***Partie 2 : Formulation et optimisation des formules***

*LAVOC, Laboratoire des voies de circulation, EPFL*

*Le projet fait l'objet de deux rapports relatifs à l'amélioration de la durabilité des enrobés.*

***La partie 1 du projet - est relatif à la modélisation des charges d'essieu.***

*Il a été constaté que la modélisation de l'état de déformation au sein d'une superstructure routière peut être menée avec une bonne approximation en considérant le comportement élastique des matériaux bitumineux. Les résultats expérimentaux de structures reconstituées et testées à la halle-fosse concordent bien avec le modèle analytique. La charge et la pression du pneu n'ont en fait que peu d'influence sur la sollicitation à la base d'une couche bitumineuse épaisse. Par contre, il a été montré qu'à faible profondeur, soit entre 3 et 7 cm, les signaux de déformation présentent des irrégularités que la modélisation explique. L'état de contrainte est à cet endroit déterminant pour le comportement à long terme des revêtements.*

***La partie 2 du projet - propose une méthodologie de formulation et optimisation des formules d'enrobés.***

*La méthode combine une approche volumétrique avec une sélection d'essais présentant un caractère prévisionnel et diffusés dans les laboratoires suisses. Cette nouvelle approche comporte une étape de prévision analytique des performances qui permet de réduire le nombre d'essais en laboratoire en fonction du niveau de formulation (de base, intermédiaire ou avancée). La prévision analytique des performances a été validée par une étude en laboratoire sur les enrobés classiques avec des résultats encourageants. Les formules ainsi obtenues ont été mises en place sur l'installation d'essais en vraie grandeur de l'ETHZ et sur plusieurs planches expérimentales sur l'autoroute A2.*

### 3.1 FP 3-1 Partie 1: Modélisation des Charges d'essieu

#### FP 3-1 PROJEKTABSCHLUSS ( ARAMIS – Protokoll )

##### FP 3-1 - RESUMÉ

La configuration d'un essieu d'un poids lourd influence de façon directe le transfert de charge pneu/chaussée. L'objectif de cette étude est de quantifier et qualifier l'influence respective des trois principaux paramètres d'un essieu: intensité de charge, pression de gonflage et type de roue.

L'étude se base sur une approche empirique, par des essais en vraie grandeur, et une approche analytique, par la modélisation du comportement mécanique de la structure. La comparaison de ces différentes mesures permettra d'une part d'évaluer la modélisation vis-à-vis de la réalité et d'autre part de déterminer l'influence de chaque paramètre sur la répartition et l'intensité des déformations dans les couches bitumineuses et ceci aussi à faible profondeur.

Par ailleurs une analyse de l'évolution des contraintes principales en fonction de la profondeur servira à mieux expliquer le développement des ornières dans les matériaux bitumineux. Cette étude permettra également de souligner l'importance de l'utilisation de méthodes analytiques pouvant intégrer les caractéristiques détaillées des charges pour en déduire l'état de sollicitation à faible profondeur et sous le bord du pneu.

##### *Übersetzung:*

*Die Ausgestaltung der Achse eines Schwerverkehrfahrzeugs hat einen direkten Einfluss auf die Lastverteilung zwischen Reifen und Strasse. Ziel der vorliegenden Studie ist die Beurteilung der drei wichtigsten Einflussparameter : Gesamtlast, Reifendruck und auch Reifentyp.*

*Die Studie basiert einerseits auf einem empirischen Ansatz, mittels Grossversuchen, und andererseits einem analytischen Ansatz, mittels eines mechanischen Verhaltensmodells des Schichtaufbaus. Analyse und Vergleich der Messungen erlaubt einerseits die Beurteilung des Modells anhand des Grossversuches, sowie andererseits die Bewertung des Einflusses der verschiedenen Parameter auf Verteilung und Stärke der Verformungen in bituminösen Schichten, dies auch in geringer Tiefe.*

*Zusätzlich kann die Analyse der Spannungsentwicklung in Abhängigkeit der Tiefe mit-helfen, die Entstehung von Spurrinnen in bituminösen Schichten besser zu erklären.*

*Letztlich soll diese Studie auch die Wichtigkeit der Benutzung analytischer Methoden unterstreichen, welche aus detaillierten Lastmerkmalen den Spannungszustand in geringer Tiefe und unter dem Reifenrand herleiten.*

### *FP 3-1 - ATTEINTE DES OBJECTIFS ( Wertung der FS )*

*Les objectifs ont été atteints par le développement d'une méthode de formulation orientée vers les essais de performances pour les enrobés bitumineux. Il a également été montré que l'état de sollicitation au sein des couches bitumineuses, à faible profondeur, est aussi déterminant pour le comportement à long terme des revêtements ( couches supérieures). Les résultats s'intègrent à l'ensemble de la recherche Unterhalt 2000.*

### *FP 3-1 - DÉDUCTIONS ET RECOMMANDATIONS ( Wertung der FS )*

*Il est possible de réaliser une étude de formulation, de procéder à son optimisation et à l'évaluation des performances à long terme en combinant un calcul de prévision et des essais de laboratoire. Au vu de cette étude, il est indispensable de recommander l'utilisation des essais de performances pour caractériser au mieux les enrobés et de recourir à l'approche prévisionnelle pour optimiser les mélanges.*

*D'autre part, la méthode de dimensionnement traditionnelle des chaussées doit être adaptée pour tenir compte de l'état de sollicitation à faible profondeur qui provoque de la fissuration et des ornières. Le critère de la déformation au bas des couches épaisses doit être complété par la prise en compte de ces sollicitations. Une refonte de la méthode de dimensionnement suisse est souhaitable, mais plus encore, une méthode de renforcement des chaussées actuelles doit être élaborée.*

## 3.2 FP 3-2 Partie 2: - Formulation et optimisation des formules

### FP 3-2 - ZUSAMMENFASSUNG AUS DEM BERICHT

#### RESUME

*La composition des enrobés influence de façon déterminante la durabilité et les performances des revêtements. A ce jour l'optimisation des formules pour mélanges bitumineux se fait encore par une approche trop empirique sur la base d'essais traditionnels qui souvent n'offrent qu'une faible corrélation avec les performances réelles des matériaux.*

*L'élaboration d'une méthodologie de formulation couplée avec des essais de performance permettant d'obtenir des enrobés performants et durables constitue le but essentiel de ce projet de recherche.*

*Cette méthode de formulation se base sur une approche volumique et sur des modèles analytiques capables de prévoir les performances des enrobés dans certains cas. En effet, il est possible de réaliser une étude de formulation, son optimisation et l'évaluation de ses performances à long terme en combinant un calcul de prévision et quelques essais complémentaires.*

*D'autre part le choix judicieux d'essais de performances dont l'utilisation est diffusée en Suisse permet d'obtenir des informations importantes sur la performance et la durabilité des enrobés formulés. Le choix de ces essais doit encore être validé par une étude sur des planches en vraie grandeur qui est actuellement en cours.*

*Übersetzung:*

*Die Mischgutzusammensetzung wirkt sich in starkem Mass auf die Beständigkeit und die Eigenschaften der Beläge aus. Noch immer wird die Zusammensetzung bituminöser Mischgute mit Hilfe eines empirischen Ansatzes optimiert, welcher auf herkömmlichen Laborversuchen beruht und häufig nur wenig mit der wirklichen Eignung der Baustoffe zu tun hat.*

*Das Hauptziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist die Entwicklung eines verbesserten Ansatzes für die Bestimmung der Mischgutzusammensetzung, welcher sich an verschiedenen Leistungstests orientiert und bituminöse Beläge mit einer auch entsprechend verbesserten Leistungsfähigkeit und Stabilität liefern soll.*

*Die neue Optimierungsmethode basiert auf einem volumetrischen Ansatz, sowie auf analytischen Modellen, welche die Eignung von bituminösen Schichten unter gewissen Umständen voraussagen können. Tatsächlich ist es möglich, die Eignungsprüfung und deren Optimierung, sowie die Auswertung der Langzeit-Leistungsfähigkeit mit Hilfe der Kombination einer berechneten Prognose und einiger zusätzlicher Laborversuche durchzuführen.*

*Die sorgfältige Auswahl der in der Schweiz verbreitetsten eignungsorientierten Prüfungen erlaubt es zudem, wichtige Informationen über die Eignung und die Dauerhaftigkeit der verschiedenen Mischgute zu erhalten. Zur Zeit läuft eine Studie, welche die Auswahl dieser Versuche anhand einiger Versuchsstrecken bestätigen soll.*

## **FP 3-2 - PROJEKTABSCHLUSS ( ARAMIS – Protokoll )**

### *FP 3-2 - ZUSAMMENFASSUNG DER RESULTATE ( Wertung der FS )*

*La composition des enrobés influence de façon déterminante la durabilité et les performances des revêtements. A ce jour l'optimisation des formules pour mélanges bitumineux se fait encore par une approche trop empirique sur la base d'essais traditionnels qui souvent n'offrent qu'une faible corrélation avec les performances réelles des matériaux.*

*L'élaboration d'une méthodologie de formulation couplée avec des essais de performance permettant d'obtenir des enrobés performants et durables constitue le but essentiel de ce projet de recherche.*

*Cette méthode de formulation se base sur une approche volumique et sur des modèles analytiques capables de prévoir les performances des enrobés dans certains cas. En effet, il est possible de réaliser une étude de formulation, son optimisation et l'évaluation de ses performances à long terme en combinant un calcul de prévision et quelques essais complémentaires.*

*D'autre part le choix judicieux d'essais de performances dont l'utilisation est diffusée en Suisse permet d'obtenir des informations importantes sur la performance et la durabilité des enrobés formulés. Le choix de ces essais doit encore être validé par une étude sur des planches en vraie grandeur qui est actuellement en cours.*

### *FP 3-2 - ATTEINTE DES OBJECTIFS ( Wertung der FS )*

*Les objectifs ont été atteints par le développement d'une méthode de formulation orientée vers les essais de performances pour les enrobés bitumineux. Il a également été montré que l'état de sollicitation au sein des couches bitumineuses, à faible profondeur, est aussi déterminant pour le comportement à long terme des revêtements ( couches supérieures). Les résultats s'intègrent à l'ensemble de la recherche Unterhalt 2000.*

### *FP 3-2 - DÉDUCTIONS ET RECOMMANDATIONS ( Wertung der FS )*

*Une méthode globale de formulation des enrobés bitumineux a été développée. Elle se base sur une approche volumique et permet d'évaluer les caractéristiques de module et de fatigue sans recourir systématiquement à des essais complexes de laboratoire.*

*Il ressort qu'il est possible de réaliser une étude de formulation, son optimisation et l'évaluation des performances à long terme en combinant un calcul de prévision et des essais complémentaires d'optimisation et de performance.*

*Les modèles de prévision ont un domaine de validité restreint ce qui diminue fortement la possibilité de les utiliser pour tous les matériaux. En effet, la variété des sortes d'enrobés (« asphaltés coulés », « enrobés drainants », « macrorugueux »,...) rend le problème de la formulation complexe au point qu'une formule universelle n'est pas envisageable. Ces outils restent néanmoins de bonnes approximations de la réalité pour les enrobés traditionnels et les liants classiques et permettront de repérer très vite des erreurs de formulation.*

*Une phase d'optimisation est préconisée en considérant la compactibilité du mélange par l'essai PCG et Marshall. La résistance à la déformation permanente est évaluée par l'essai d'orniérage. D'autre part, le comportement aux basses températures (fissuration thermique) est quantifié si nécessaire par un essai de retrait empêché et/ou un essai de traction directe.*

*En fonction du type de route, du trafic et des conditions climatiques, des essais de vérification sont recommandés. On distinguera trois niveaux de formulation : formulation de base, formulation intermédiaire, formulation avancée. Les limites d'application restent à établir avec les commissions techniques en charge de la normalisation.*

*Au vu de cette étude il est indispensable de recommander l'utilisation des essais de performances pour caractériser au mieux les enrobés. L'essai Marshall encore très répandu dans plusieurs pays ne peut plus « définir » la performance d'un enrobé*

*Une analyse de sensibilité a permis de mettre en évidence qu'il n'existe pas, à proprement parler, d'optimum en relation avec les performances testées. Pour certaines caractéristiques une augmentation de la teneur en liant de +0.5% diminue la performance (orniérage, fluage Marshall,...). Par contre il existe d'autres caractéristiques qui voient leur performance s'améliorer avec une augmentation de la teneur en liant (fatigue, ...). La formulation doit donc être capable de trouver le bon compromis entre toutes ces caractéristiques.*

*A ce jour les expérimentations sur les performances à long terme sont en cours sur l'installation d'essais en vraie grandeur (Rundlauf de l'IGT-ETHZ) et sous circulation sur l'autoroute A2 dans la région de Pratteln (BL).*

*L'adéquation du comportement in situ avec les prévisions du modèle sera vérifiée lorsqu'un nombre suffisant de charges sera appliqué.*

## 4. FP 4: Rundlaufversuch (Felder z.T. analog FP 7)

IGT, Institut für Geotechnik der ETHZ, Zürich

### FP 4 - ZUSAMMENFASSUNG AUS DEM BERICHT

*Der Grossversuch Rundlauf Nr. 7 hatte zum Ziel, fünf verschiedene, gebräuchliche bituminös gebundene Tragschichten miteinander zu vergleichen und deren Eigenschaften zu ermitteln.*

*Es handelt sich um fünf Versuchsfelder mit denselben Unterbauten, denselben Foundationsschichten und denselben Deckschichten. Alle Schichtdicken in den fünf Feldern haben dieselbe Grösse. Der Unterschied zwischen den fünf Aufbauten besteht allein in der Art der bitumenhaltigen Tragschicht. Leider konnten nicht alle Elemente der Gleichheit im gewünschten Mass durchgezogen werden. Insbesondere die Tragfähigkeit auf Planum und Foundationsschicht des Feldes 4 entsprachen nicht den gewünschten Werten.*

*Durch den Start des Grossversuches in der heissesten Temperaturperiode des „heissen“ Sommers 2003, wurden zusätzlich verschärfende Verhältnisse simuliert.*

*Im folgenden sind die Resultate schlagwortartig wiedergegeben. Die Versuche und die Berechnungen lassen sich kurz wie folgt charakterisieren. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass wegen verschiedener Einflüsse und Bedingungen die Resultate teilweise interpretiert werden müssen:*

**Feld 1** mit dem gebrochenen Fluvialkies und Bindemittel B50/70 zeigt ein schlechtes Verhalten. Schon bald nach dem Beginn des Versuches traten massive Spurrinnen auf.

**Feld 2** mit felsgebrochener Gesteinskörnung und Bindemittel B50/70 zeigt ein gutes Verhalten. Die Tragschicht dieses Feldes wird bei tiefen Temperaturen relativ steif. Dies ist im Gegensatz zu Feld 5, wo die Steifigkeit weniger abhängig von der Temperatur ist.

**Feld 3** mit felsgebrochener Gesteinskörnung und Bindemittel B50/70 (eigentlich war ein B70/100 vorgesehen) zeigt ein schlechtes Verhalten. Aufgrund der Penetration am rückgewonnenen Bindemittel wurde ein B50/70 geliefert.

**Feld 4** mit felsgebrochener Gesteinskörnung und polymermodifizierten Bitumen verhält sich schlecht gegenüber Spurrinnenbildung

**Feld 5** mit dem Spezialbindemittel EME2 zeigt das beste Verhalten bezüglich Verformungen und Temperaturstabilität. Dies konnte sowohl mit den geometrischen und physikalischen Messungen im Feld als auch mit der numerischen Rückrechnung gezeigt werden. Die Resultate stimmen gut mit den Laborresultaten überein.

*Der Grossversuch zeigt recht eindrücklich die unterschiedliche Aussagekraft von verschiedenen Standardversuchen und die Verbesserung der Interpretation der Resultate mittels Kombinieren von Feldversuchen und numerischer Modellierung.*

Kurzbewertung der Versuchsfelder nach 1.4 Mio Achslastübergängen

DMS = Dehnungsmessstreifen

PSI = Befahrbarkeitsindex

Feld	Aufbau	Spurrinntiefe	DMS (*)	LVDT (**)	PSI	Moduli (***)	Gesamt- bewertung	Bemerkungen
		[mm]	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]		[MPa]		
1	HMT 22 B50/70 teilw. gebr.	17	170	(-)	1.15	1547	mittel	Me-Wert auf Planum = 42 Me-Wert auf Planie = 105 Hohlraumgehalt obere Tragschicht ungenügend
2	HMT 22 B50/70 100% gebr.	11	40	2300	3.01	2839	gut	Me-Wert auf Planum = 53 Me-Wert auf Planie = 79
3	HMT 22 B50/70 100% gebr.	25	80	3250	0.33	2718	(-)	Me-Wert auf Planum = 38 Me-Wert auf Planie = 74 Weitere Untersuchungen am Mischgut wünschenswert
4	HMT 22 PmB 100% gebr.	18	100	2800	1.50	990	mittel	Me-Wert auf Planum = 36 Me-Wert auf Planie = 52
5	HMT 22 EME 2 100% gebr.	10	35	2200	3.28	4380	Sehr gut	Me-Wert auf Planum = 52 Me-Wert auf Planie = 99

\* Rückgerechnete Elastizitätsmoduli bei  $\approx 25^\circ$

\*\* DMS auf der Unterfläche der Tragschicht,  $T \approx 36^\circ$ , Geschw. = 25 km/h

\*\*\*  $\approx 160$  sec Wartezeit,  $T \approx 20^\circ$ , Sensor im Feld 1 nicht zuverlässig (ausser Messbereich)

## **FP 4 - PROJEKTABSCHLUSS ( ARAMIS – Protokoll )**

### *FP 4 - ZUSAMMENFASSUNG DER RESULTATE ( Wertung der FS )*

*Im Grossversuch werden fünf verschiedene, bituminös gebundene Tragschichten miteinander verglichen und deren Eigenschaften ermittelt.*

*Der Unterschied zwischen den fünf Aufbauten besteht allein in der Art der bitumenhaltigen Tragschicht. Nachstehend sind die verschiedenen Tragschichten charakterisiert.*

*Feld 1: gebrochener Fluvialkies mit Bindemittel B50/70*

*Feld 2: Felsgebrochener Splitt mit Bindemittel B50/70*

*Feld 3: Felsgebrochener Splitt mit Bindemittel B50/70*

*Feld 4: Felsgebrochener Splitt mit polymermodifiziertem Bindemittel*

*Feld 5: Felsgebrochener Splitt, EME2*

### **Ergebnisse:**

**Feld 1** mit dem gebrochenen Fluvialkies und Bindemittel B50/70 zeigt ein schlechtes Verhalten. Schon kurz nach Beginn des Versuches traten massive Spurrinnen auf.

**Feld 2** mit felsgebrochener Gesteinskörnung und Bindemittel B50/70 zeigt ein gutes Verhalten. Die Tragschicht dieses Feldes wird bei tiefen Temperaturen relativ steif. Dies ist im Gegensatz zu Feld 5, wo die Steifigkeit weniger abhängig von der Temperatur ist.

**Feld 3** mit felsgebrochener Gesteinskörnung und Bindemittel B50/70 (eigentlich war ein B70/100 vorgesehen) zeigt ein schlechtes Verhalten.

**Feld 4** mit felsgebrochener Gesteinskörnung und polymermodifizierten Bitumen verhält sich schlecht gegenüber Spurrinnenbildung.

**Feld 5** mit dem Spezialbindemittel EME2 zeigt das beste Verhalten bezüglich Verformungen und Temperaturstabilität.

*Der Grossversuch zeigt recht eindrücklich die unterschiedliche Aussagekraft von verschiedenen Standardversuchen und die Verbesserung der Interpretation der Resultate mittels Kombinieren von Feldversuchen und numerischer Modellierung.*

### *FP 4 - ZIELERREICHUNG ( Wertung der FS )*

*Das Ziel konnte erreicht werden. Die Klassierung der verschiedenen Tragschichten ist gelungen.*

### *FP 4 - FOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN ( Wertung der FS )*

*Die Resultate dieser Forschung können für zukünftige Normierungsarbeit verwendet werden.*



## **6. FP 6: Griffigkeit auf Autobahnen, Griffigkeitsmessungen SRM/ SCRIM**

IVT der ETHZ, Zürich

### **FP 6 - ZUSAMMENFASSUNG AUS DEM BERICHT**

Ziel der Forschungsarbeit war es, einerseits die Zweckmässigkeit des SCRIM-Messsystems für eine netzweite Erhebung der Griffigkeit auf den schweizerischen Nationalstrassen zu prüfen. Andererseits war aufgrund des bekannten Griffigkeitshintergrundes von Skiddometer- und SRM-Messungen der Zusammenhang zwischen Messwerten der SCRIM-Messungen und SRM-Messungen gesucht.

Zur Klärung dieser Fragen wurden über 40 Messstellen auf den schweizerischen Nationalstrassen ausgewählt. Dabei wurden alle bekannten und üblicherweise angewendeten Belagsarten mit unterschiedlichen Alter einbezogen, so dass eine für die schweizerischen Nationalstrassen repräsentative Auswahl von Messstellen vorlag.

Die Messungen erfolgten mit beiden Messsystemen SCRIM (Sideway Coefficient Routine Investigation Machine) und SRM (Stuttgarter Reibungs-Messer) zur gleichen Zeit am gleichen Ort direkt über Abschnitte von 2 km Länge hintereinander gefahren. Damit können die Messbedingungen als identisch betrachtet werden.

Die Auswertungen erfolgten für beide Messsysteme getrennt, ausgerichtet auf deren Erfassungsart. Die Einzelmesswerte - beim SCRIM in konstanten Intervallabständen entstanden, beim SRM in unregelmässigen Abständen erhoben - wurden schliesslich zu Mittelwerten für 100m-Intervalle aggregiert und aus diesen zu Durchschnittswerten für die 2 km-Messabschnitte (Messstellen) zusammengesetzt. Diese beiden Grundlagen wurden dann für die Gegenüberstellungen, Vergleiche und Analysen verwendet.

Die Untersuchung bestätigte grundsätzlich die Zweckmässigkeit des SCRIM- Messsystems für netzweite Erhebungen, indem einerseits grosse, tägliche Messleistungen erbracht werden können. Andererseits konnten die angesetzten Genauigkeitsanforderungen (insbesondere bei Wiederholungsmessungen) erfüllt werden.

Anhand von Korrelationsrechnungen konnte ein Zusammenhang zwischen den Messwerten der beiden Messsysteme mit genügendem Bestimmtheitsmass gefunden werden. Dabei ergab sich eine mittlere Differenz von rund 0.2 zwischen den Messwerten SCRIM und denjenigen von SRM.

Da bei den Erhebungen auch tiefe SCRIM-Messwerte erhoben (Bereich  $0.2 < \sim < 0.3$ ) wurden, muss es als grundsätzlich unzulässig angesehen werden, den gefundenen Korrelationszusammenhang zwischen SCRIM und SRM für die Umrechnung von SCRIM-Messwerten zu verwenden, weil diese bei derart tiefen Werten zu unrealistischen Resultaten führen würden.

Aufgrund dieser Sachlage wird empfohlen, Messergebnisse, welche mit dem Messsystem SCRIM erhoben wurden, mit dem in Deutschland für die Bewertung verwendeten Bewertungsmassstab der Forschungsgesellschaft für den Strassen- und Verkehrswesen (Entwurf Nov. 1998) zu beurteilen.

## **FP 6 PROJEKTABSCHLUSS ( ARAMIS – Protokoll )**

### *FP 6 - ZUSAMMENFASSUNG DER RESULTATE ( Wertung der FS )*

*Die grundsätzlichen Erkenntnisse geben Antworten auf die Zielsetzungen der Untersuchung und lassen sich wie folgt zusammenfassen.*

*1. Das Messsystem SCRIM ist aufgrund der durchgeführten Untersuchungen geeignet und zweckmässig für einen netzweiten Einsatz zur Erhebung der Griffigkeit auf den Fahrbahnen der Schweizerischen Nationalstrassen.*

*Die Zweckmässigkeit zeigte sich einerseits durch die hohe, ohne Störung des Verkehrs erbrachte tägliche km-Leistung und die i ausgewiesene Robustheit des Messsystems. Andererseits standen die Messresultate durch eine umgehend mögliche Auswertung rasch zur Verfügung, so dass nur wenig Zeit für die Auswertung benötigt wird.*

*2. Anhand der Untersuchungen an über 40 Messstellen auf dem Nationalstrassennetz konnten nach der Überprüfung (Gegenüberstellung) der ausgewerteten Verlaufskurven auf Plausibilität, die 100 m-Intervallwerte für die entsprechenden Messintervalle aus den SRM- resp. SCRIM-Messdaten gewonnen und korreliert werden. Naturgemäss ergaben sich Differenzen im Griffigkeitsniveau zwischen den beiden Messsystemen SRM und SCRIM. Sie betragen im Mittel rund 0.2. Diese Differenz führt zu Problemen bei der vorgesehenen Verwendung des Beurteilungsmassstabes der Schweizerischen Griffigkeitsnormen, die auf dem Griffigkeitshintergrund des IVT beruhen. Eine schlüssige Klärung der aufgeworfenen Fragen konnte im Rahmen des vorliegenden Forschungsauftrages aus Zeit- und Aufwandgründen nicht vorgenommen werden.*

### *FP 6 - ZIELERREICHUNG ( Wertung der FS )*

Die Ziele konnten nur teilweise erreicht werden:

- Die Prüfung eines netzweiten Einsatzes des SCRIM - Messsystems zeigte, dass dies möglich ist.
- Mit der Untersuchung konnte der Nachweis erbracht werden, dass auch die Genauigkeitsanforderungen mit dem SCRIM - Messsystem erfüllt werden können.
- Obwohl ein gut korrelierter Zusammenhang zwischen den Messergebnissen von SCRIM und SRM gefunden wurde, konnte keine Umrechnungsfunktion SCRIM-SRM abgeleitet werden.

## FP 6 - FOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN ( Wertung der FS )

*Die Untersuchung hat gezeigt, dass das SCRIM - Messsystem für die netzweite Erhebung der Griffigkeit geeignet und zweckmässig ist. Wie bereits aus anderweitig durchgeführten Untersuchungen bekannt ist, führt das SCRIM-Messsystem zu etwas höheren Griffigkeitswerten als das Messsystem SRM (und Skiddometer).*

*Aufgrund der im Rahmen dieser Untersuchung nicht abschliessend erklärbaren Differenz von 0.2 im Griffigkeitsniveau zwischen den Messergebnissen der beiden Messsysteme SCRIM und SRM wurde klar, dass eine Umrechnung von SCRIM-Werten via Korrelationszusammenhang SCRIM/SRM nicht zulässig ist.*

*Es wird deshalb empfohlen, Messergebnisse, welche mit SCRIM-Messsystemen aus Deutschland erhoben wurden, mit dem in Deutschland verwendeten Beurteilungsmassstab gemäss „Merkblatt zur Bewertung der Strassengriffigkeit bei Nässe“ zu bewerten.*

*Da in der Schweiz zurzeit für die Erhebung der Griffigkeit keine SCRIM-Messsysteme vorhanden sind resp. eingesetzt werden und die geltende SN-Norm der VSS zur Bewertung der Griffigkeit auf dem Griffigkeitshintergrund IVT (Messprinzip blockiertes Rad/Schlupf der Messsysteme Skiddometer und SRM) basiert, drängt sich eine Festlegung oder Kalibrierung zwischen SCRIM und SRM im Moment nicht auf. Zudem fehlt für die Beurteilung von SCRIM-Messergebnissen die Erfahrung im Bereich SCRIM-Messgeschwindigkeiten 60 km/h und 40 km/h und somit für alle Strassen mit Ausnahme der Nationalstrassen. Ob, und wenn ja, wie weit sich der SCRIM-Beurteilungsmassstab aus Deutschland allgemein verwenden lässt, ist zurzeit unklar und wird im Zusammenhang mit der zurzeit laufenden Überarbeitung der schweizerischen Griffigkeitsnormen über die Messsysteme und die Anforderungen an die Griffigkeit (Bewertung der Griffigkeit) in der Fachkommission 7 der VSS geprüft. Dabei gilt es auch, die europäische Normungstätigkeit in der CEN auf diesem Gebiet, die zurzeit ebenfalls im Gange ist, zu berücksichtigen bzw. einzubeziehen.*

### **FAZIT:**

Naturgemäss ergaben sich Differenzen im Griffigkeitsniveau zwischen den beiden Messsystemen SRM und SCRIM. Sie betragen im Mittel rund 0.2. Diese Differenz führt zu Problemen bei der vorgesehenen Verwendung des Beurteilungsmassstabes der Schweizerischen Griffigkeitsnormen, die auf dem Griffigkeitshintergrund des IVT beruhen. Eine schlüssige Klärung der damit aufgeworfenen Fragen konnte im Rahmen des vorliegenden Forschungsauftrages aus Zeit- und Aufwandgründen nicht vorgenommen werden.



## 7. FP 7: Vergleichsstrecken auf einer Nationalstrasse

IMP Bautest AG, Oberbuchsiten

### FP 7 - ZUSAMMENFASSUNG AUS DEM BERICHT

*Das Forschungsprojekt FP7 ist Bestandteil eines nationalen, koordinierten Gesamtprojektes, in welchem mehrere Prüfstellen beteiligt waren. Das Ziel des Gesamtprojektes bestand darin, die Dauerhaftigkeit der Beläge zu verbessern. Zu diesem Zweck wurden die Bestandteile sowie die Zusammensetzung der Beläge optimiert und auf der Rundlaufanlage der ETH Zürich eingebaut und beobachtet.*

*Parallel zu den Laborarbeiten sowie zum Rundlauf wurde eine Teststrecke auf einer Autobahn eingebaut. Auf der Nationalstrasse A2 Abschnitt Augst – Sissach, konnte auf der Normalspur Fahrtrichtung Luzern eine Versuchsstrecke, bestehend aus 10 Versuchsfeldern, realisiert werden.*

*Das Ziel dieser Versuchsstrecke bestand darin, die in den übrigen Forschungsprojekten optimierten Beläge sowie weitere Belagsvarianten im Massstab 1:1 einzubauen, deren Eigenschaften zu überprüfen sowie das Langzeitverhalten unter schwerer Belastung zu überwachen.*

*Das Objekt auf der Nationalstrasse A2 ermöglichte den Einbau einer oberen Tragschicht und einer Deckschicht in einer Gesamtschichtdicke von 110 mm. Um einen repräsentativen Einbau zu ermöglichen wurde die Länge der einzelnen Versuchfelder zu 220 m festgelegt; die Gesamtlänge der Probestrecke beträgt 2200 m. Es wurden 10 unterschiedliche Tragschichten und 2 unterschiedliche Deckschichten eingebaut. Die ersten 5 Felder wurden mit dem gleichen Mischgut wie im Rundlauf realisiert, auf 5 weiteren Feldern wurden neuartige, zukunftsorientierte Belagsvarianten eingebaut. Die ausklappbare Tabelle im Einband gibt einen Überblick über den Aufbau und den gewählten Belagsorten.*

*Zur Sicherstellung der geforderten Qualität der Beläge wurden erweiterte Eignungsprüfungen, Probeaufbereitungen in der Aufbereitungsanlage sowie einige Probeeinbauten durchgeführt. Der Einbau der Beläge auf den Teststrecken wurde minutiös begleitet, ausreichend beprobt und untersucht. Die Beläge erfüllen mit einer Ausnahme die gestellten Anforderungen bezüglich Zusammensetzung und Eigenschaften des Mischgutes sowie Einbauqualität (Schichtdicke, Verdichtung).*

*Zur Erfassung der mechanischen Eigenschaften der Mischgutsorten, wurden verschiedene Prüfungen durchgeführt. Dabei wurde das Ziel verfolgt, vergleichende Betrachtungen der unterschiedlichen Prüfmethoden durchzuführen. Im Focus stand auch ein Vergleich des Verhaltens der Probestrecken mit den Laborprüfverfahren und mit dem Verhalten der auf dem Rundlauf eingebauten Beläge. Die Versuche zielen dahin, 4 wesentliche Eigenschaften anzusprechen, nämlich den Verformungswiderstand bei sommerlichen Temperaturen, das Ermüdungsverhalten, das Kälteverhalten und die Wasserempfindlichkeit des Mischgutes. Das Verhalten der Teststrecken wurde jährlich durch Quer- und Längsebenenmessungen beobachtet.*

#### **Die wesentlichen Folgerungen aus dem Vergleich der Prüfmethoden sind:**

*Es konnte festgestellt werden, dass die mit dem Falling Weight Deflectometer FWD auf dem Objekt gemessenen E-Moduli eine ähnliche Beurteilung wie die am Mischgut bestimmten E-Moduli (KAST) erlauben.*

Offenbar eignen sich dynamische Versuche wie der Druckschwellversuch oder der KAST-Versuch, um das Verformungsverhalten bituminöser Schichten bei erhöhten Temperaturen zu beurteilen.

Aufgrund der durchgeführten Versuche empfehlen wir die Kälteviskosität für die Beurteilung des Kälteverhaltens eines Mischgutes. Der Vorteil dieser Prüfung besteht darin, dass das ganze Mischgut einem Kälteversuch unterzogen wird und nicht nur das reine Bindemittel wie dies zum Beispiel beim Bending-Beam-Rheometer der Fall ist. Im Vergleich zum Abkühlversuch führt die Kälteviskosität zu einer besseren Differenzierung.

Im Projekt FP2 wurden einige Objekte des Nationalstrassen - Netzes, die sich jahrelang positiv verhalten haben, ausgewählt und untersucht. Eine der Folgerungen aus diesen Untersuchungen war, dass sich Beläge mit felsgebrochenem Splitt besonders gut verhalten haben. Aus diesem Grunde wurden 4 Felder mit diesen Gesteinskörnungen aufbereitet.

Aus den Ergebnissen der Untersuchungen aus den Laborergebnissen sowie auf dem Rundlauf lassen sich keine Vorteile des felsgebrochenen Splittes gegenüber dem gebrochenen Kies feststellen. Die Beobachtungen auf den Versuchsfeldern der A2 sind diesbezüglich nach 4 Jahren noch zu wenig aussagefähig,

Im Gegensatz zu den langjährigen Beobachtungen auf den Vergleichstrecken der A 9 konnten weder in den durchgeführten Laborprüfungen, dem Rundlauf noch aufgrund der bisherigen Beobachtungen (4 Jahre) auf den Versuchstrecken markante Vorteile der direkt destillierten Bitumen festgestellt werden.

Bei den polymer-modifizierten Bitumen konnten jedoch die bekannten Vorteile der grösseren Gebrauchstemperatur-Spanne bestätigt werden.

Die Erfahrungen mit den beiden EME – Tragschichten EME-1 und EME-2 sind als positiv zu beurteilen. Bei der Aufbereitung und dem Einbau dieser Beläge traten keine Probleme auf. Der Einbau des EME-2 ist allerdings etwas gewöhnungsbedürftig, denn das heisse Mischgut ist sehr fett und „speckig“. Die guten Eigenschaften bei hohen Temperaturen konnten sowohl auf dem Rundlauf wie auch bei den Laborprüfungen bestätigt werden. Die mit dem FWD bestimmten E-Moduli zeigen die höchsten Werte bei den zwei EME- Tragschichten. Die Prüfungen bei tiefen Temperaturen decken allerdings auf, dass das Kälteverhalten dieser Beläge ungünstig ist. Wie erste Erfahrungen aus der Praxis bereits zeigen, dürfen auch die EME - Tragschichten ab einer bestimmten Höhenlage nicht ohne Deckschicht überwintert werden. Die Wasserempfindlichkeit des EME-1 wurde als knapp genügend beurteilt. Ob es sich dabei um einen Einzelfall handelt oder ob die mit einem Spezial – Hart - Bitumen aufbereiteten Mischgut generell diesbezügliche Schwächen haben, kann noch nicht beurteilt werden.

Bei der Aufbereitung und dem Einbau der Niedertemperatur-Asphalte traten keine Probleme auf. Beide Tragschichten verfügen über gute mechanische Eigenschaften auch bei hohen Temperaturen. Bei den tiefen Temperaturen konnte ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Produkten beobachtet werden. Die Wasserempfindlichkeit ist etwa gleich wie die der anderen untersuchten Mischgutsorten. Offenbar können die Vorteile dieser Bindemittel – Modifikation genutzt werden ( tiefere Einbautemperatur ), ohne dass im Gebrauchsverhalten Nachteile zu erwarten sind.

Die beiden Deckschichten MR8 und SMA8 haben sich bisher sehr gut verhalten; auf dem Objekt sind keine Unterschiede feststellbar. Die mechanischen Eigenschaften beider Mischgutsorten sind sehr ähnlich. Allerdings wurden mit dem FWD, bei welchem die Moduli der einzelnen Schichten des Oberbaus bestimmt wurden, Unterschiede festgestellt. Die E - Moduli der Beläge mit SMA sind systematisch grösser als diejenigen mit MR.

## **FP 7 PROJEKTABSCHLUSS ( ARAMIS – Protokoll )**

### *FP 7 - ZUSAMMENFASSUNG DER RESULTATE ( Wertung FS )*

*Das Objekt auf der Nationalstrasse A2 ermöglichte den Einbau einer oberen Tragschicht und einer Deckschicht in einer Gesamtschichtdicke von 110 mm. Es wurden 10 unterschiedliche Tragschichten und 2 unterschiedliche Deckschichten eingebaut.*

*Der Einbau der Beläge auf den Teststrecken wurde minutiös begleitet, ausreichend beprobt und untersucht. Die Beläge erfüllen mit einer Ausnahme die gestellten Anforderungen bezüglich Zusammensetzung und Eigenschaften des Mischgutes sowie Einbauqualität (Schichtdicke, Verdichtung).*

*Zur Erfassung der mechanischen Eigenschaften der Mischgutsorten, wurden verschiedene Prüfungen durchgeführt. Dabei wurde das Ziel verfolgt, vergleichende Betrachtungen der unterschiedlichen Prüfmethode durchzuführen. Im Focus stand auch ein Vergleich des Verhaltens der Probestrecken mit den Laborprüfverfahren und mit dem Verhalten der auf dem Rundlauf eingebauten Beläge. Die Versuche zielen dahin, 4 wesentliche Eigenschaften anzusprechen, nämlich den Verformungswiderstand bei sommerlichen Temperaturen, das Ermüdungsverhalten, das Kälteverhalten und die Wasserempfindlichkeit des Mischgutes. Das Verhalten der Teststrecken wurde jährlich durch Quer- und Längsebenheitsmessungen beobachtet.*

*Die wesentlichen Folgerungen aus dem Vergleich der Prüfmethode sind:*

- *Die mit dem Falling Wheigt Deflectometer FWD auf dem Objekt gemessenen E - Moduli erlauben eine ähnliche Beurteilung wie die am Mischgut bestimmten E - Moduli (KAST).*
- *Offenbar eignen sich dynamische Versuche wie der Druckschwellversuch oder der KAST-Versuch, um das Verformungsverhalten zu beurteilen.*
- *Wir empfehlen die Kälteviskosität für die Beurteilung des Kälteverhaltens eines Mischgutes.*
- *Es lassen sich keine Vorteile des felsgebrochenen Splittes gegenüber dem gebrochenen Kies feststellen. Die Beobachtungen auf den Versuchsfeldern der A2 sind diesbezüglich nach 4 Jahren noch zu wenig aussagefähig,*
- *Es konnten keine markanten Vorteile der direkt destillierten Bitumen festgestellt werden.*
- *Bei den polymer-modifizierten Bitumen konnten die bekannten Vorteile der grösseren Gebrauchstemperatur-Spanne bestätigt werden.*
- *Die Erfahrungen mit den beiden EME-Tragschichten EME-1 und EME-2 sind generell als positiv zu beurteilen. Die mit dem FWD bestimmten E-Moduli zeigen bei diesen Schichten die höchsten Werte. Die Prüfungen bei tiefen Temperaturen decken jedoch auf, dass das Kälteverhalten dieser Beläge ungünstig ist. Wie erste Erfahrungen aus der Praxis bereits zeigen, dürfen auch die EME-Tragschichten in bestimmten Höhenlagen nicht ohne Deckschicht überwintert werden.*

- *Bei der Aufbereitung und dem Einbau der Niedertemperatur-Asphalte traten keine Probleme auf. Beide Tragschichten verfügen über gute mechanische Eigenschaften bei hohen Temperaturen. Bei tiefen Temperaturen konnte ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Produkten beobachtet werden. Die Wasserempfindlichkeit liegt im Rahmen der übrigen untersuchten Mischgutsorten.*

*Die beiden Deckschichten MR8 und SMA8 haben sich bisher sehr gut verhalten; auf dem Objekt sind keine Unterschiede feststellbar.*

#### *FP 7 - ZIELERREICHUNG ( Wertung der FS )*

*Das Ziel dieser Versuchsstrecke bestand darin, die in den übrigen Forschungsprojekten optimierten Beläge sowie weitere Belagsvarianten im Massstab 1:1 einzubauen, deren Eigenschaften zu überprüfen sowie das Langzeitverhalten unter schwerer Belastung zu überwachen.*

*Dieses Ziel konnte mehrheitlich erreicht werden. Die Beobachtung des Langzeitverhaltens konnte im Zeitraum von 4 Jahren nicht erfolgen.*

#### *FP 7 - FOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN ( Wertung der FS )*

*Die Resultate dieser Forschung könnte für zukünftige Normierungsarbeiten verwendet werden. Der bisherige Beobachtungszeitraum von 4 Jahren ist zu klein, um unterschiedliche Entwicklungen der verschiedenen Versuchsfelder auf der Nationalstrasse zu beobachten. Die Beobachtungen der Versuchsfelder sind daher unbedingt über einen längeren Zeitraum von etwa 10 weiteren Jahren zu erstrecken.*

# **F BEURTEILUNG DES GESAMTPROJEKTES (BK)**

## **( Beurteilung durch die Begleitkommission BK )**

### **ENTSTEHUNG DES PROJEKTES**

#### **Ein ungewohnter Approach**

Bei diesem Projekt haben sich erstmalig in der Schweiz die drei „eidgenössischen“ Labors, die auf dem Fachgebiet der Strassenbautechnik tätig sind, mit Fachleuten aus der Privatwirtschaft der Firmen Viagroup SA und IMP Bautest AG zusammengruppiert, um ein Grossprojekt durchführen zu können.

Es ist anzumerken, dass die Entstehung des Gesamtprojektes auf eine bemerkenswerte Initiative von Herrn Peter Hüppi zurückzuführen ist, der sich sehr für die Realisierung des Projektes und die Motivation der beteiligten Forschungsstellen eingesetzt hat.

Das Projekt sollte gemäss seiner ersten Definition die Fragen der Dauerhaftigkeit der bituminösen Beläge und die Problematik des Unterhaltes durch Erarbeitung klarer Strategien abschliessend und definitiv behandeln und beantworten. Durch die gemeinsame Anstrengung der staatlichen und privaten Labors sollte diese Zielsetzung erreicht werden.

Gewiss war diese lobenswerte Zielsetzung zu ambitiös, damit zu hoch gesteckt, - und es wäre realistischer gewesen -, zumindest schrittweise gewisse Fortschritte und Innovationen für die Materialien und Anwendungstechniken im bituminösen Belagsbau anzustreben.

#### **Realisierung und Koordination**

Die Koordination zwischen den einzelnen Forschungsprojekten erfolgte durch Professor A. G. Dumont, LAVOC der ETH Lausanne. Diese Koordination umfasst folgende Projekte:

FP 1: „Verhaltensbilanz“; Viagroup SA, Lausanne und Winterthur

FP 2: „Dauerhafte Komponenten“; EMPA Dübendorf

FP 3: «Durabilité des enrobés»; LAVOC ETH Lausanne

FP 4: „Dauerhafte Beläge“; Rundlauf; IGT ETH Zürich

FP 7: „Vergleichsstrecken auf einer Nationalstrasse“, IMP Bautest AG, Oberbuchsiten

## **ERGEBNISSE UND ALLGEMEINE FESTSTELLUNGEN**

Die erarbeiteten Erfahrungen aus dem Gesamtprojekt „Unterhalt 2000 – M17, Dauerhafte Beläge“ – sollten wegbereitend und wegleitend für weitere Forschungsprojekte sein, insbesondere für weitere Forschungsgesamtprojekte, die auch in Zukunft aus verschiedenen Einzelprojekten bestehen sollen und entsprechend koordiniert werden müssen... .

Gesamthaft sind die innerhalb des Gesamtprojektes erfolgten umfangreichen und zahlreichen Untersuchungen als grosse Anstrengung zu werten und zu würdigen.

Gleichzeitig ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die ursprüngliche Absicht - gewissermassen „ein schweizerisches SHARP - Programm“ ( ähnlich einem in den USA durchgeführten Forschungsprogramm SHARP - in kürzester Zeit durchzuziehen – kaum realisierbar war.

Die Hauptzielsetzung bestand darin, aus dem Forschungsvorhaben neue und direkt umsetzbare Erkenntnisse in der Form von Empfehlungen – als Standards - oder als neue Normelemente - abzuleitenden. Diese sollten baldmöglichst den ausführenden Organen der Bauherrschaft und den Kantonen neue und direkt umsetzbare Entscheidungsgrundlagen liefern. Diese ursprüngliche Zielsetzung war in der Folge als zu hoch angesetzt zu bezeichnen.

Insbesondere gilt dies für die Umsetzung der mit jeweils einzeln und direkt an die verschiedenen Forschungsstellen erteilten Aufträge des ASTRA für die einzelnen Forschungsprojekte, die eine für die Forschungsstellen zu offene „Interpretation“ und Festlegung ihres tatsächlichen ursprünglichen „Untersuchungsfeldes“ offen liessen.

## **ZIELSETZUNG UND UMSETZUNG**

Es wurde sehr bald – auch von der durch das ASTRA nachträglich eingesetzten Begleitkommission, wie auch von den einzelnen Forschungsstellen - festgestellt,

dass:

- die in zeitlicher Reihenfolge und Abfolge angedachten Inputs von den einzelnen Forschungsprojekten zu anderen Forschungsprojekten nicht in einem ursprünglich angenommenen Zeitrahmen erfolgen konnten, und die anvisierte Zeitspanne für das Gesamtprojekt auf eher 3 - 5 - 6 Jahre auszudehnen war;
- sich auch die Themenwahl und die vergleichenden Untersuchungen in den verschiedenen Forschungsprojekten (FP 1-4) sich eher auf die Erarbeitung von Methoden der Untersuchungen und der Erarbeitung neuer Prüfverfahren beschränkten. Aufgrund dieser sehr heiklen und (zu) aufwändigen nötigen Abklärungen war es jedoch nicht möglich, die in der geplanten kurzen Frist von 2 – 3 Jahren erwarteten neuen Erkenntnisse für eine klare Umsetzung in die Praxis zu liefern, auch wenn die Begleitkommission vermehrt auf diese Problematik für die Realisierung des Gesamtprojektes hingewiesen hatte...;
- der von der Begleitkommission empfohlene Weg einer erforderlichen Definition eines klaren „Roten Fadens“ - eines „fil rouge“ - der Untersuchung gleicher Materialien in den parallel laufenden verschiedenen Forschungsprojekten in der Folge auch mitgeholfen hat, eben diese vergleichenden Untersuchungen auch deutlicher abzustimmen;

- die gewählten Verbindungen der einzelnen Forschungsprojekte durch Verwendung gleicher Materialien sowie die vorgesehenen Out – respektive Inputs der verschiedenen Forschungsstellen für und untereinander – wie nachträglich erkannt werden musste, gesamthaft ein (zu) grosses und zu anspruchsvolles Vorgehen darstellten;
- die Erarbeitung einer Verhaltensbilanz in FP1 mit Empfehlungen für die Materialwahl und von geeigneten Strecken des Nationalstrassennetzes für die weiteren Untersuchungen in den FP 2-4 sich als sehr schwierig gestaltete und nach Auffassung der Begleitkommission und des Berichtverfassers in der Feststellung und Empfehlung mündet, dass die Erhebung, Bearbeitung und Verwaltung der technischen Daten des Nationalstrassennetzes in Zukunft unabdingbar ausschliesslich Aufgabe der verantwortlichen Instanz selber bleiben sollte. Dies bedeutet, dass gemäss neuer Organisation in Zukunft das ASTRA die laufende Bearbeitung aller Daten selbst durchführen sollte.
- insbesondere ist auch zur Materialwahl für die Untersuchungen anzumerken, dass der angestrebte Vergleich zwischen den Resultaten von FP2, FP3 und FP4 (Grossversuch im Rundlauf) aufgrund der bekannterweise doch schwierigen Einbaubedingungen auf dem Rundlauf einerseits und den bei der Herstellung der Versuchsfelder im Rundlauf und zum teil auch auf den Versuchsstrecken auf der Nationalstrasse A2 ( in einem Feld aufgetretene Fehllieferungen, wie falsches Bindemittel oder anderer Filler, die nicht im Einflussbereich der Forschungsstellen lagen (!) ) problematisch blieben und zu nachfolgend schwierigen Bedingungen für die Erarbeitung klarer Aussagen zum Verhalten der Versuchsfelder führten.
- der von der Begleitkommission angeregte zusätzliche Grossversuch in FP7, im Massstab 1:1 – „in situ“ - auf der Nationalstrasse A2 ( mit Versuchsfeldern teilweise analog zu FP4 im Rundlaufversuch ) einen – auch für weitere Grossprojekte der Forschung an bituminösen Belägen – unverzichtbaren tatsächlichen Praxisbezug nachträglich ermöglicht hat.

## **PROBLEMATIK DER MATERIALWAHL**

Unter den Forschungsstellen war es vereinbart, dass die gewählten gleichen Materialien die Verbindung zwischen einzelnen Forschungsprojekten bilden würden. So die Untersuchung von Proben aus speziellen Strassen sollte die Tendenz geben und zu der Wahl der Gesteinskörner, der Bindemittel und der Formulierungen (FP 2) führen. Über die den „Roten Faden“ zwischen den einzelnen Forschungsprojekten bildenden gewählten Materialien wurde lange diskutiert. Nur 6 von den 11 festgehaltenen Strassenstrecken wurden untersucht und letztlich wurden nur 3 im Labor wieder hergestellt. Schliesslich sind nur traditionelle Materialien betrachtet, da der Rückblick auf einige Jahre und das Verhalten von neuen Materialien nicht vorhanden waren.

Die untersuchten Mischgüter (Walzasphalte) gaben die Basis für eine Untersuchung über die Formulierung (Erstprüfung) eines Mischgutes (FP3), dessen Ergebnisse eine Erstprüfungs - Methode zum ersten Mal in der Schweiz gefördert haben. Die Optimierung ergab die Formeln der eingebauten und untersuchten Walzasphalten der FP4 (Rundlauf) und FP 7 (A2).

Bemerkenswert ist es, festzuhalten, wie schwierig für die Forscher war, sich zu vergewissern, ob das durch die Unternehmungen eingebaute Mischgut den richtigen ( den durch die Forscher gewählten und im Voraus geprüften ) Asphalt entspricht. Es gibt manchmal doch eine Differenz zwischen dem, was man will und dem Produkt, das „effektiv“ eingebaut wird. Es gab eingebaute Walzasphalte, deren Formulierung nicht sicher eingehalten wurden, wegen falscher Wahl des Bindemittels und des Fillers durch die Bauunternehmung. Hier wäre eine intensivere Überprüfung der Herstellung und des Einbaus durch die Forschungsstellen angezeigt gewesen.

Es war jedoch kaum zumutbar, dass die Forscher ständig die Hersteller und Einbauunternehmer kontrollieren mussten, um mit vielen zusätzlichen Laborprüfungen sicher zu gehen, dass jeder Parameter und jeder Bestandteil eines Mischgutes der Laborformel entspricht. In einigen Fällen wurden die gemachten Fehler bestätigt. Aufgrund dieser Beispiele ist vereinzelt die Qualität der Bauarbeiten zu hinterfragen, wenn die Bauherrschaft nicht die Möglichkeiten hat, diese Arbeiten intensiv zu kontrollieren oder kontrollieren zu lassen.

## **ZUM ZEITLICHEN PROJEKTVERLAUF**

Nach einigen Jahren der Projektdefinierung und der Festlegung des Arbeitsumfanges haben die Forschungsarbeiten im Jahre 2000 begonnen. Es wurde angenommen, dass man innerhalb der einzelnen Forschungsprojekten zeitlich parallel arbeiten könnte. Leider war dies nicht so, da jeweils der Einfluss eines FP auf die anderen FP die Untersuchungen gesamthaft verzögerte. Zum Beispiel: Die Formulierungen aus FP 3 sollten im FP 4 Eingang finden und waren ebenfalls mit den Versuchsfelder des FP 7 zu koordinieren. Es war zudem auch festzustellen, dass einige Berichte inhaltlich nach längeren Diskussionen noch aufeinander abzustimmen waren. Um die erforderliche Koordination und das Ineinandergreifen der FP zu verbessern, hätten die Forscher weit grösseren Zeitaufwand für gemeinsame Tätigkeiten haben müssen.

## **UMSETZUNG FÜR DIE PRAXIS**

Das Projekt stellt das gute Verhalten der neuen Materialien, wie die Hochmodulasphalte (EME) und die Rauhbeläge (MR, SMA) in den Vordergrund. Das LAVOC hat in weiteren Forschungsprojekten schon früher die Basis für die häufigere Verwendung und eine Normalisierung (oder Normierung) dieser Materialien geschaffen, aber hält erneut fest, dass diese speziellen Walzasphalte mit besonderer Vorsicht einzusetzen sind.

Besonders wird darauf hingewiesen, dass diese Materialien eine ausgeprägte und starke Leistungsfähigkeit haben, dass sie eher für spezielle Anwendungen eingesetzt werden. Ihre Herstellung und der Einbau müssen sehr sorgfältig ausgeführt werden. Diese Mischungen können ungenügende, sogar schwache Eigenschaften besitzen, wenn sie nicht mit Sorgfalt eingebaut sind oder auch wenn diese Materialien einen leicht fehlerhaften ( vom Sollwert abweichenden) Bindemittelgehalt aufweisen.

Der Koordinator ist der Auffassung, dass nach mehr Erneuerungen zu suchen ist, wenn wir uns besser an den gegenwärtigen Schwerlastverkehr und seine vorhersehbare Weiterentwicklung anpassen wollen. Weil jedoch der grösste Teil des Autobahnnetzes dauernd überlastet ist, müssen wir anstreben, Strassen mit gutem Langzeitverhalten („LLP Long life pavement“ oder „Perpetual pavement“) zu bauen.

Nur der oberste Teil des Belagsaufbaus sollte erneuert werden müssen, um der Strassenoberfläche bessere Eigenschaften geben zu können. Diese Unterhaltsarbeiten könnten ausserhalb der Verkehrsspitzenzeiten erfolgen und bedingen auch nicht grosse, lang dauernde Baustellen.

Eine „Kosten-Nutzen-Analyse über die Lebensdauer einer Strasse (30-50 Jahre), die Benutzerkosten in Kauf nimmt, zeigt offensichtlich den Nutzen von Materialien mit langer Verwendungsdauer. Die Wahl einer Strategie mit schrittweisem Bau und Verstärkung ist attraktiv für die zeitliche Staffelung der Investitionskosten, aber heute auf den wichtigsten Nationalstrassenabschnitten kaum mehr „praktikabel“ .

## **EMPFEHLUNGEN FÜR DIE ZUKUNFT**

### **Die Ergebnisse und Hinweise**

Die zukünftigen Lösungen für den Entwurf von stark tragfähigen Strassen sollen (und müssen) 3 wichtigen Kriterien berücksichtigen:

- 1 - lange Lebensdauer der unteren Schichten (NdT: Tragschichten) und leichter Neu - Einbau der Deckschichten(Gesamtkosten über eine Lebensdauer ?);
- 2 -Verwendung von Materialien welche die natürlichen Vorkommen schonen durch Wiederverwendung der Strassenoberbaumaterialien (Recycling) oder durch Verwertung und Verbesserung von örtlichen Baustoffen, die keine grossen und langen Transporte erfordern;
- 3 - Verwendung von technischen Verfahren welche den Energieverbrauch und die Erzeugung von umweltverschmutzenden Verunreinigungen wie CO2 vermindern.

### **Optimierung der Organisation**

Für das Erarbeiten eines grossen Gesamtprojektes, mit einem grossen Umfang und mehreren Beteiligten, müssten die nachstehenden Faktoren berücksichtigt werden:

- Feststellung von fixen Termine während der Entwicklung des Projektes mit der Forderung quantitative Ergebnisse zu erarbeiten;
- Am Anfang des Projektes sollte die Bestimmung eines Projektleiter für jedes Labor erfolgen, welcher mit den anderen Projektverantwortlichen ständig in Verbindung steht;
- Auch am Anfang sollte die Funktion der Begleitkommission bestimmt werden, damit diese während dem Verlauf der Projekte gezieltere Unterstützung bieten kann und Verlauf und Aufbau der Projekte beeinflussen kann. Eine gezielte Strategie für die Verbreitung der Ergebnisse in der Praxis sollte vorgesehen werden.

## **SCHLUSSFOLGERUNG**

Das Gesamtprojekt stellt eine gemeinsame Anstrengung verschiedener Forschungsstellen mit einer sehr hoch angesetzten Zielsetzung dar, die zu einigen wissenschaftlichen und technischen Erkenntnissen geführt hat. Die erarbeiteten Resultate werden jedoch nur in die praktischen Anwendungen umgesetzt wenn die Verantwortlichen der Strassennetze sich für diese Ergebnisse interessieren werden. Dadurch kann die erarbeitete Basis - die mit den vorliegenden Resultaten zur Verfügung gestellt wird - gezielt umgesetzt und weiter vertieft werden.



# **EVALUATION DU PROJET D'ENSEMBLE ( BK )**

( Par la Commission d'accompagnement BK )

## **CONSTITUTION DU PROJET**

### **Une approche non conventionnelle**

Pour la première fois en Suisse, les trois organismes « fédéraux », actifs en technique routière, se sont associés aux entreprises privées - Viagroup AG et IMP\*Bautest AG - pour réaliser un projet important.

Il faut rappeler que la création de ce projet d'ensemble est due à Monsieur Peter Hüppi, qui s'est particulièrement et fortement engagé pour la réalisation de cet objectif, ainsi que pour motiver les centres de recherche impliqués.

Ce projet devait, selon son but premier, traiter, puis résoudre de façon définitive les problèmes de la durabilité des chaussées souples et ceux posés par la problématique de l'entretien lourd par l'établissement de stratégies clairement élaborées. La collaboration des organismes publiques et privés devait permettre d'atteindre ce but.

Il est certain que ce but était trop ambitieux, de ce fait placé bien trop haut- et qu'il aurait été plus réaliste, de s'efforcer, par palier, d'atteindre des progrès certains et des innovations pour les matériaux et les techniques de mise en oeuvre des chaussées souples.

### **Coordination de la réalisation du projet**

La coordination entre les différents projets particuliers a été réalisée par le professeur A.-G. Dumont du LAVOC de l'E P F de Lausanne, pour les projets suivants :

FP1 : «Bilan du comportement» ; Viagroup AG, Lausanne et Winterthur

FP2 : «Composants durables» ; EMPA Dübendorf

FP3 : «Durabilité des enrobés bitumineux» ; LAVOC, EPF Lausanne

FP4 : «Revêtements durables» ; Manège de Dübendorf, IGBT EPF Zurich

FP 7 : «Comparaison et validation sous trafic réel», IMP Oberbuchsitzen

## RESULTATS ET CONSTATATIONS GENERALES

Les résultats obtenus avec le projet d'ensemble « Entretien 2000-M17, Revêtements durables » devraient être des précurseurs pour la mise en route de nouveaux projets de recherche, en particulier pour d'autres projets généraux de recherche qui, dans l'avenir, constitués nécessairement de projets particuliers, doivent être coordonnés en conséquence.

Dans leur ensemble, les très nombreuses et volumineuses recherches, exécutées dans le cadre du projet d'ensemble, représentent un très gros effort qu'il faut apprécier et estimer à sa juste valeur.

En même temps, il faut toutefois signaler que l'intention louable initiale était de réaliser, dans un laps de temps très court, un programme SHRP suisse, dont le but principal était de transformer les nouvelles connaissances en recommandations directement applicables – à titre de standards-ou comme nouveaux éléments constitutifs de normes. Ces notions nouvelles devaient, très rapidement, livrer aux organes d'exécution des maîtres d'ouvrage et aux cantons des bases de décision nouvelles et directement applicables. Il faut alors considérer que ce but a été placé bien trop haut.

Ceci concerne aussi principalement la transposition dans les faits de chaque projet de recherche particulier, dont le mandat a été accordé directement par l'OFROU à chaque centre de recherche : la libre fixation, par chaque centre, de son propre domaine de recherche initial a été bien trop large.

## BUT ET TRANSPOSITION

Il fut très rapidement constaté, aussi bien par la « Commission d'accompagnement », tardivement mise en place par l'OFROU, que par les centres de recherche eux-mêmes que :

- que la succession temporelle des « inputs » successifs des paquets de recherche individuels ne pourrait avoir lieu dans l'espace de temps initialement envisagé et que la durée prévue de 3 ans pour l'ensemble du projet devait être augmentée à 5-6 ans ;
- que le choix des thèmes, ainsi que celui des recherches comparatives, dans les divers paquets de recherche s'est plutôt limité à l'obtention de méthodes de recherche et de procédés de mesure ;
- que compte tenu de l'exécution des nombreux éclaircissements nécessaires, très délicats et coûteux, il n'était de ce fait pas possible de livrer, dans le court délai envisagé de 2-3 ans, les nouvelles connaissances espérées à transposer dans la pratique, quand bien même la Commission d'accompagnement avait, à plusieurs reprises, attiré l'attention sur cette problématique difficile pour la réalisation de l'ensemble du projet
- que le moyen conseillé par la Commission d'accompagnement de créer nécessairement un « fil rouge » clair pour les recherches sur les mêmes matériaux, exécutées dans les paquets de recherche parallèles, a justement permis, par la suite, de synchroniser les recherches comparatives ;

- que la liaison choisie entre les divers projets individuels en utilisant les mêmes types de matériaux, ainsi que le système, envisagé dès l'abord, des « out-« respectivement des « input », destiné à lier les projets entre eux et à régler la succession des recherches comme cela s'est vérifié par la suite- ont représenté pour l'ensemble du projet un procédé très exigeant et trop considérable ;
- que l'acquisition dans le FP1 d'un bilan de comportement permettant le choix des matériaux à tester et celui des tronçons de routes nationales les plus favorables pour l'exécution de recherches ultérieures par les FP2, 3 et 4, s'est révélée plus ardue que prévue. Cette constatation conduit naturellement, selon l'opinion de la CA, et celle de l'auteur du rapport, à recommander que dans l'avenir, l'acquisition, le traitement et l'administration des données techniques du réseau des routes nationales soient exclusivement confiés, sans condition, aux instances responsables, déjà en charge de ce problème. Compte tenu de la nouvelle organisation suisse, c'est l'OFROU qui doit réaliser, dans l'avenir, le traitement courant des données techniques de toutes les missions de construction et d'entretien des routes nationales.
- qu'il faut aussi remarquer en particulier que pour le choix des matériaux à tester, la comparaison entre les résultats des FP2, 3 et 4 a été rendue problématique par les conditions difficiles et bien connues de mise en place des planches d'essai du manège (FP4), et parfois sur les planches de comparaison de la route nationale A2 (avec des livraisons erronées, - telles que classe de bitume fausse, filler autre que prévu – qui ne dépendent pas des centres de recherche. Ce qui amène par voie de conséquence des conditions difficiles pour l'obtention de prévisions claires pour le comportement des planches d'essai ou de comparaison ;
- que l'essai supplémentaire en vrai grandeur, FP7, à l'échelle 1 :1, «in situ», initié par la CA, sur la RN A2 (avec des planches d'essai analogues à celles de la recherche sur le manège du FP 4) a permis d'obtenir- mais aussi pour des essais ultérieurs en vrai grandeur dans la recherche routière – une liaison effective, réelle, supplémentaire, et irremplaçable avec la pratique de la construction routière.

## DES CHOIX DE MATERIAUX DIFFICILES

Il a été convenu que les matériaux retenus feraient le lien entre les axes de recherche. Ainsi l'analyse des prélèvements réalisés sur plusieurs chaussées caractéristiques de Suisse devait apporter la tendance et guider le choix des granulats, des liants et des formulations ( FP2 ). Pour maintenir un « fil rouge » au travers des projets partiels les matériaux sélectionnés ont été longuement discutés. Sur 11 tronçons de chaussée retenus seul 6 ont été analysés et finalement 3 reconstitués en laboratoire. Il n'a été finalement retenu que des matériaux traditionnels car le recul sur plusieurs années et la durabilité des matériaux innovants n'est pas encore disponible.

Les matériaux analysés ont été à la base d'une étude de formulation (FP3) qui a surtout mis en évidence les possibilités de définir une méthodologie de formulation ce qui n'avait encore été fait en Suisse. L'optimisation a donné les formules à reconstituer pour les matériaux testés en varie grandeur (FP4) et sur autoroute (FP7).

Il faut noter encore les difficultés à assurer que les matériaux prescrits par les chercheurs soient effectivement mise en place par l'entreprise. Le fossé reste encore grand entre ce que l'on veut et ce qui est réalisé. On a assisté à une mise en œuvre de matériaux dont on ne peut être sûr de la composition exacte en particulier du type de liant et du type de filler. Il est inadmissible que les chercheurs doivent constamment suivre et contrôler les entreprises de fabrication et de pose de revêtement et finalement réaliser un grand nombre d'essais de laboratoire pour vérifier aussi chaque paramètre et constituant et le cas échéant démontrer les erreurs faites. On peut, de cet exemple, tirer des conclusions « alarmantes » sur la qualité des travaux partout en Suisse - si les administrations n'ont pas les moyens suffisants de contrôler ou de faire contrôler. Comment ensuite tirer des conclusions sur des tronçons qui se comportent mal ?

Cet objectif est globalement atteint car les résultats partiels répondent à des questions tellement importantes et font avancer les connaissances sur la technique des chaussées.

## L'ETALEMENT DU PROJET DANS LE TEMPS

Après plusieurs années de définition du projet et modification du descriptif les travaux de recherche ont été engagés en 2000. L'objectif de travail en parallèle contenu dans plusieurs plannings n'a pas pu être suivi car l'interaction de chaque FP avec les autres a retardé la mise en œuvre de la suite. Par exemple les formulations du FP3 ont passé au FP4 pour l'organisation du FP4 Rundlauf, mais ont dû se coordonner avec la mise en place des planches d'essais du FP7. A ce jour on ne peut que déplorer que plusieurs rapports fassent encore l'objet de modifications et ne sont pas encore publiés. Pour améliorer la coordination et l'imbrication des projets les uns avec les autres il aurait été souhaitable que les chercheurs se déplacent pour plusieurs semaines dans les autres centres de recherche et établissent ainsi un réseau de compétence et aussi de motivation.

## VALEURS POUR LA PRATIQUE

Il est mis en évidence les performances des matériaux de nouvelle génération et en particulier le potentiel des enrobés à haut module ( EME ) et des macrorugueux ( SMA et MR ). Le Lavoc dans d'autres projets a donné des bases pour une plus large utilisation et la normalisation de ces matériaux mais répète encore que des précautions sont à prendre. En particulier nous affirmons que nous sommes en présence de matériaux à fort potentiel que l'on doit appliquer dans des domaines bien définis, qui nécessitent un soin particulier dans leur fabrication, leur mise en place et dans le choix de leur domaine d'application. Ces mélanges peuvent présenter des performances insuffisantes voire faible en cas d'application inadéquate ou de dosage même faiblement erroné.

De l'avis du coordinateur soussigné nous devons désormais explorer des variantes plus innovantes encore si l'on veut répondre à la demande de trafic lourd actuel et à son évolution prévisible. De plus les contraintes d'un trafic proche de la saturation, en tout temps sur une bonne partie du réseau, obligent à recourir à des chaussées à longue durée de vie (LLP Long life pavement ou «Perpetual pavement»). Ainsi il faut absolument concevoir des chaussées dont la portance soit élevée et le reste très longtemps voire pour toujours. Seule la partie supérieure du revêtement est appelée à être renouvelée pour redonner de bonnes caractéristiques de surface. Ces travaux ne doivent pas interférer avec les pointes de trafic et ne doivent pas nécessiter des chantiers de grande envergure. Une analyse coût-bénéfice sur le cycle de vie d'une chaussée (30 à 50 ans) qui prend en compte le coût de l'usager met facilement en évidence le bénéfice à retenir de l'utilisation de matériaux à longue durée de vie. Le choix de stratégie de construction et renforcement progressif peut être attractif en termes d'étalement des investissements mais n'est tout simplement plus réalisable sur les axes de déplacement prioritaire à l'échelle du pays.

## **RECOMMANDATIONS POUR LE FUTUR**

Les solutions de chaussées qui seront viables et acceptables pour le futur doivent répondre à trois arguments :

1. Longue durée de vie pour les couches inférieures et remplacement facile des couches de surfaces (coût global sur un cycle de vie)
2. matériaux de chaussées (recyclage) ou de matériaux locaux qui peuvent être valorisés et améliorés et qui n'exigent que peu de transport
3. Utilisation de techniques qui réduisent la consommation d'énergie et la production de polluants comme le CO<sub>2</sub>.

### **Amélioration de l'organisation**

Pour la réalisation d'un projet de recherche large, en volume de travail et en nombre de divers partenaires, les éléments suivants pourraient être pris en compte :

- Placer des échéances fixes dans le déroulement (milestone) avec des exigences de résultats quantifiables.
- Fixer dès le départ un exécutant/responsable de projet par chaque laboratoire qui soit en contact direct avec les autres chercheurs.
- Définir la fonction de la commission de suivi pour qu'elle puisse contribuer positivement en cours de projet. Comment peut-elle influencer la vision et l'organisation du projet ? Jusqu'où peut-elle imposer ses vues ?
- Mettre sur pied une stratégie de dissémination et implémentation des résultats dans la pratique.

## **CONCLUSIONS**

Le paquet de recherche M17 est un projet très ambitieux qui a permis d'apporter des informations scientifiques et techniques importantes. Celles-ci ne seront intégrées à des applications pratiques que si les gestionnaires de réseau s'y intéressent et approfondissent les bases que nous avons posées et mises à disposition.



# G BEURTEILUNG DER FORSCHUNGSPROJEKTE 1-7

( Beurteilung durch die Begleitkommission BK )

## 1. FP 1: Verhaltensbilanz der Beläge auf NS

*Viagroup AG, Lausanne und Winterthur*

### *FP1 - BEURTEILUNG (Beurteilung der BK )*

*Die Zielsetzungen der Forschungsarbeit wie sie im Auftrag des ASTRA und im Antrag der Forschungsstelle genannt sind wurden weitgehend erfüllt. Der angestrebte Detaillierungsgrad der Erkenntnisse konnte nicht ganz erreicht werden, da zum Teil Daten fehlten oder nicht beschafft werden konnten.*

*Die angestrebten Inputs in die weiteren Forschungsarbeiten innerhalb des Projekte M 17 des ASTRA ( FP 2 und FP3 ) konnten nur beschränkt erreicht werden.*

### *FP1 - UMSETZUNG ( Wertung der BK )*

*Die Forschungsarbeit zeigt, dass zur Erreichung der gleichen Lebensdauer der Beläge wie früher , infolge der heute gesteigerten Beanspruchungen stärkere und hochwertigere , damit konzeptionell bessere Schichtmaterialien verwendet werden müssen.*

### *FP1 - WEITERGEHENDER FORSCHUNGSBEDARF (Wertung BK)*

*Kein direkter weitergehender Forschungsbedarf.*

*Empfehlung: Im Rahmen des Aufbaus von MISTRA sollte durch das ASTRA erreicht werden, dass die in dieser Studie verwendeten Daten laufend nachgeführt werden.*

### *FP1 - EINFLUSS AUF DAS NORMENWERK ( Wertung der BK )*

*Kein Einfluss auf das Normenwerk.*

**FAZIT:** Der Bericht zur „Verhaltensbilanz der Beläge auf Nationalstrassen“ stellt als ganzes einen guten Überblick im Sinne einer „State of die Art“ dar, auch wenn er in gewissen Punkten nicht mehr ganz aktuell war. So wäre es von Vorteil gewesen, wenn auch die zweite netzweite Zustandserfassung von 2003/2004 welche speziell die Veränderungen der Oberflächeneigenschaften aufzeigt, ebenfalls Aufnahme in den Bericht gefunden hätte..

Die Erarbeitung einer Verhaltensbilanz in FP1 mit Empfehlungen für die Materialwahl und von geeigneten Strecken des Nationalstrassennetzes für die weiteren Untersuchungen in den FP 2-4 gestaltete sich als sehr schwierig. Nach Auffassung der Begleitkommission und des Berichtverfassers mündet sie in der Feststellung und Empfehlung, dass die Erhebung, Bearbeitung und Verwaltung der technischen Daten des Nationalstrassennetzes in Zukunft unabdingbar ausschliesslich Aufgabe der verantwortlichen Instanz selber bleiben sollte. Dies bedeutet, dass gemäss neuer Organisation in Zukunft die laufende Bearbeitung aller erhobenen Mess - Daten durch das ASTRA selbst durchgeführt und auch verwaltet werden sollte.



## **2. FP 2: Dauerhafte Komponenten, evaluiert auf der Basis bewährter Strecken.**

Abt. Strassenbau / Abdichtungen der EMPA.

### *FP2 - BEURTEILUNG ( Wertung der BK )*

*Das Projekt konnte die aufgeworfenen Fragen im Ansatz beantworten. Die Analyse erfolgreicher Strecken lieferte wertvolle Erkenntnisse. Aus der im Rahmen des Projektes entwickelten Rekonstruktion wurde ein Vorschlag für eine Methode der gebrauchsorientierten Alterung zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit erarbeitet. Die Arbeit zeigt, dass eine solche Alterung durchgeführt werden könnte um Erkenntnisse über das Langzeitverhalten der Materialien im Verbund zu gewinnen. Die Aussagesicherheit der Methodik konnte im gegebenen finanziellen Rahmen allerdings noch nicht ermittelt werden, die Anzahl der rekonstruierten Schichten reichte dazu nicht aus..*

### *FP2 - UMSETZUNG ( Wertung der BK )*

*Die Methode der gebrauchsorientierten Alterung zur Dauerhaftigkeitsbeurteilung könnte bei Grossprojekten auf bereits optimierten Rezepturen angewendet werden. Die Ergebnisse der Forschungsarbeit weisen darauf hin, dass für hoch belastete Strassen nicht mehr auf empirische, sondern auf fundamentale Kennwerte abgestützt werden sollte. ( Dies wird aber schon seit Jahren angestrebt...)*

*Die Begleitkommission betrachtet die angestrebte Zielsetzung einer Prüfung der gebrauchsorientierten Alterung primär als theoretischen Ansatz. Die Anwendung und Umsetzung für die Praxis dürfte jedoch kaum erreichbar sein, da die Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der zum Einsatz gelangenden Prüfmethode selber Streumasse aufweisen, die die angestrebte Aussagefähigkeit - ohne die Möglichkeit des Erreichens einer erforderlichen hochauflösenden Differenzierung - einschränken dürften und die Methode kaum als praktikabel erscheinen lassen.*

### *FP2 - WEITERGEHENDER FORSCHUNGSBEDARF ( Wertung der BK )*

*Im Rahmen von objektgebundener Forschung wurde von der Forschungsstelle eine Methode der gebrauchsorientierten Alterung definiert. Die Aussagesicherheit der Methode der gebrauchsorientierten Alterung zur Dauerhaftigkeitsbeurteilung wurde in ersten Versuchen abgeklärt. Weitere Ergebnisse könnten helfen, weitere Aussagen zur Dauerhaftigkeit der entsprechenden Objekte zu gewinnen und zu erhöhen, wobei bezüglich Umsetzung in die Praxis die vorgenannten Anmerkungen in der Beurteilung durch die Begleitkommission zu beachten sind.*

*Die Ergebnisse der Forschungsarbeit weisen erneut auf die Bedeutung weiterer Forschungen zur performanceorientierten Bewertung von Mischgut hin, was aber schon seit vielen Jahren als Zielsetzung formuliert wurde und noch stets kaum greifbare und wirklich umsetzbare Methoden erbrachte.*

*Die Begleitkommission betrachtet daher diese Entwicklung als eher kritisch und befürchtet gewissermassen ein Wiederholung bisheriger Forschungsanstrengungen ohne weitere Konkretisierung.*

## *FP2 - EINFLUSS AUF DAS NORMENWERK ( Wertung der BK )*

*Die Forschungsarbeit gibt Hinweise über die Anwendung für die Beurteilung von Mischgut im Rahmen der Erstprüfung auf Basis fundamentaler Prüfverfahren. Diese Verfahren wären - nach vertieften und erforderlichen zusätzlichen Abklärungen- als Elemente in die nationalen Anhängen zur Serie EN 13108 „Aphaltnischgut“ zu integrieren.*

*Um diese Normen für die Anwendung fundamentaler Kennwerte zu ergänzen, wären allerdings wiederum weitere Forschungen erforderlich. Eine Konkretisierung bezüglich Einfluss auf das Normenwerk ist aus Sicht der Begleitkommission zur Zeit kaum gegeben.*

### **FAZIT:**

Die durch die Forschungsstellen selbst angepassten respektive veränderte Themenwahl und die vergleichenden Untersuchungen der verschiedenen Forschungspakete (FP1-4), -insbesondere von FP2- , beschränkten sich eher auf die Erarbeitung von neuen Untersuchungsmethoden einerseits und in der Beurteilung respektive Erarbeitung neuer Prüfverfahren. Aufgrund dieser dazu einerseits heiklen und (zu) aufwendigen erforderlichen Abklärungen war es jedoch nicht möglich, die in der ursprünglich geplanten kurzen Frist von 2 – 3 Jahren angestrebten und erwarteten tatsächlich neuen Erkenntnisse für eine Umsetzung in die Praxis zu liefern. Die Begleitkommission hatte vermehrt auf diese Problematik für die Realisierung insbesondere des Forschungspaketes FP2 wie auch bezüglich des Gesamtprojektes hingewiesen....

### 3. FP 3: Durabilité des enrobés

LAVOC, EPFL

#### **Partie 1: Modélisation des Charges d'essieu,**

#### **Partie 2: Formulation et optimisation des formules**

##### *FP3 – EVALUATION ( Par la BK )*

*Ce projet de recherche PR3 (FP3) est intéressant à plusieurs titres : il donne quelques conclusions positives et apporte quelques confirmations de faits déjà connus par les spécialistes, à savoir :*

*- la méthode de formulation des enrobés, théorique, basée sur la volumétrie - connue depuis 30 ans au- moins, appliquée dans nombreux laboratoires (vol. vides squelette, vol. mastic, vol. vides résiduels) - simple d'application, permet d'obtenir rapidement une valeur de teneur en liant approchée, mais réaliste, sans essai de laboratoire, d'ou gain de temps, donc d'argent.*

*Elle doit être connue du plus grand nombre, mais elle s'applique, pour l'instant, aux enrobés classiques » (AC, ACT) avec bitumes routiers normaux ;*

*- le FP3 montre que l'essai Marshall n'est pas un essai de performance : une fois encore, il faut le dire ;*

*- le FP3 montre aussi que la PCG donne des meilleures indications (compactage optimum, teneur en vides résiduels opt. , d'ou une teneur en liant adéquate ;*

*- l'étude montre bien que les HMT H (ACT H) des normes CH sont sous-dosés : leur module et leur résistance à la fatigue sont faibles.*

*- l'optimisation de la teneur en liant se fait avec un minimum d'essais mécaniques ;*

*- il est clair que pour tous les enrobés (quel que soit le type), s'ils sont très sollicités, il faut déterminer leurs caractéristiques mécaniques (module, fatigue, ornièrage, résistance au froid) avec des essais de performance;*

*- pour les enrobés «classiques», le FP3 donne une méthode intéressante pour estimer  $E^*$  (module complexe),  $\epsilon_b$  et ornièrage .*

*Ce projet doit être publié pour être connu de tous.*

*Il apporte aussi une explication très intéressante de la fissuration toujours plus courante des couches supérieures ( -4 à -10 cm ) sous l'effet des essieux « single » avec pneus à basse pression.*

##### *FP 3 – MISE EN OEUVRE ( Par la BK )*

*Elle est correcte, le projet est bien mené, bien structuré ; il atteint les buts proposés : soit comment obtenir des enrobés plus performants, donc plus durables. Il y est répondu comme vu ci- dessus.*

*Les essais, contrôles de formulation, validation de la méthode théorique volumétrique ont été exécutés sur les enrobés étudiés dans le FP2 (EMPA/composants) ;le résultats des études et formulations exécutées dans ce FP3 ont été utilisés pour les matériaux ( AB, MR, HMT, EME 1 et 2 ) des FP4 (Rundlauf IGT – ETHZ, Dübendorf) et FP 7 (A2, BL, Sissach – IMP +TBA BL)*

*Il y a donc une suite logique, prévue au début de M17 ( par la commission d'accompagnement).*

### FP 3 – BESOIN SUPPLEMENTAIRE EN MATIERE DE RECHERCHE (Par la BK)

La méthode proposée par le Lavoc, dans le FP3, est dérivée de celle du CRR ( L. Francken ), mise au point pour les enrobés belges.

Il faudrait s'assurer ( sur un plus grand nombre de formulations et d'échantillons) que cette méthode et ses conclusions sont applicables totalement aux enrobés suisses ( « classiques » ). Il faudrait aussi la développer pour les enrobés spéciaux ( MR8 / PA 8 / EME 1 et 2 ) avec PmB ou Bitumes routiers durs.

Il faut aussi opter pour une méthode de dimensionnement ( et de renforcement ) moderne, basée sur des calculs analytiques et sur des mesures in – situ, avant et après construction ou renforcement ( avec le FWD – Falling Wight Deflectomètre à masse tombante ).

### FP 3 – INFLUENCE SUR LES NORMES ( Validation par la BK )

- Pour les HMT H ( ACT H, dès 01. 01. 05 ), il faut augmenter la teneur en liant et diminuer la teneur en vides : on aura alors des enrobés avec un bon module et une résistance à la fatigue meilleure.
- pour le reste, toutes les notions confirmées par le FP3 ont déjà été intégrées, par les commissions techniques compétents, dans les annexes nationales aux EN et dans les nouvelles normes SN, parues en 2003, 2004 et 2005, sauf les problèmes de dimensionnement ou de renforcement.

### FAZIT

Il est possible de réaliser une étude de formulation, de procéder à son optimisation et à l'évaluation des performances à long terme en combinant un calcul de prévision et des essais de laboratoire. Au vu de cette étude, il est indispensable de recommander l'utilisation des essais de performances pour caractériser au mieux les enrobés et de recourir à l'approche prévisionnelle pour optimiser les mélanges.

D'autre par, la méthode de dimensionnement traditionnelle des chaussées doit être adaptée pour tenir compte de l'état de sollicitation à faible profondeur qui provoque de la fissuration et des ornières. Le critère de la déformation au bas des couches épaisses doit être complété par la prise en compte de ces sollicitations. Une refonte de la méthode de dimensionnement suisse est souhaitable, mais plus encore, une méthode de renforcement des chaussées actuelles doit être élaborée.

### Des aspects positifs:

- le FP3 montre/ que l'essai Marshall n'est pas un essai de performance : une fois encore, il faut le dire ;
- le FP3 montre aussi que la PCG donne des meilleures indications (compactage optimum, teneur en vides résiduels opt. , d'ou une teneur en liant adéquate ;
- l'étude montre bien que les HMT H (ACT H) des normes CH sont sous-dosés : Leur module et leur résistance à la fatigue sont faibles.
- l'optimisation de la teneur en liant se fait avec un minimum d'essais mécaniques ;
- il est clair que pour tous les enrobés (quel que soit le type), s'ils sont très sollicités, il faut déterminer leurs caractéristiques mécaniques (module, fatigue, ornièrage, résistance au froid) avec des essais de performance;
- pour les enrobés «classiques», le FP3 donne une méthode intéressante pour estimer  $E^*$  (module complexe) et l'ornièrage .

Übersetzung:

### FP3 - BEURTEILUNG ( Wertung der BK)

Das Forschungsprojekt FP3 gibt Erkenntnisse, wissenswerte Angaben und positive Schlussfolgerungen durch den Spezialisten schon bekannte Fakten bestätigen, nämlich das Verfahren der Bestimmung der Volumetrie für die Formulierung eines Mischgut (Bestimmen Hohlraum des Korngerüstes, Volumen der Mastix, restliche Hohlräume des Mischgutes). Diese Methode ist schon seit 30 Jahren bekannt und wird in vielen Labors angewendet. Dieses Verfahren ist leicht anzuwenden und führt rasch zu einem Näherungswert für den optimalen Bindemittelgehalt, ohne dass weitere Prüfungen durchzuführen sind, was einen Nutzen an Zeit und Geld darstellt.

Diese Methode sollte der Mehrheit der Anwender bekannt sein! Sie wurde bis jetzt meist nur für die „klassischen“ Walzasphalte (AC,ACT), die Strassenbaubitumen enthalten, angewendet.

Das FP3 zeigt sehr klar, dass der Marshall-Test sich nicht als Verfahren für das Bestimmen der Dauerfestigkeit („performance orientierte Prüfungen..“) eignet. (Dies wird ausdrücklich festgehalten, ist aber schon lange bekannt..).

Das FP3 zeigt, dass man mit dem Gyrator ( PCG - presse à cisaillement giratoire ) wesentlich bessere Aussagen betreffend optimaler Verdichtung und optimalem Hohlraumgehalt erreicht, so auch eine bessere Bestimmung des optimalen Bindemittelgehaltes der Mischungen.

Die Ergebnisse des FP3 bestätigen zudem, dass die HMT H (ACT H) gemäss der Schweizer Normen bezüglich Bindemittelgehalt unterdosiert sind. Daher sind sie auch anfällig auf Risse und haben eher tiefe Steifigkeitsmoduln und entsprechend geringe Ermüdungsfestigkeit.

Mit der „Volumetrischen Methode“ wird die Erstprüfung eines Mischgut mit sehr wenigen mechanischen Prüfungen durchgeführt.

Es wird auch deutlich, dass im Fall eines sehr hoch beanspruchten Mischgutes dessen wichtige mechanische Eigenschaften ( Modul, Ermüdung, Spurbildung, Kältefestigkeit ) ausschliesslich durch „performance - orientierte mechanische“ Prüfverfahren nachgewiesen werden sollen.

Für die gewöhnlichen („klassischen“) Walzasphalte gibt das FP3 eine interessante Methode an für die Bestimmung des Komplexen-Moduls  $E^*$ , der Ermüdungsfestigkeit und der Standfestigkeit gegen Spurbildung.

FP3 zeigt auch eine interessante Erklärung für das in letzter Zeit vermehrt auftretende neue Risse-Vorkommen in den oberen Schichten (-4 bis-10 cm) der Strassenoberbauten, die verursacht werden durch die „single“ Achselasten (mit sehr breiten Reifen).

### FP3 - UMSETZUNG (Wertung der BK)

Die Umsetzung ist korrekt, das Projekt wurde gut konzipiert und umgesetzt. Die vorgesehenen Ziele wurden erreicht,: das heisst, die Fragestellung - wie kann man ein leistungsfähiges, dauerhaftes Mischgut formulieren und dann herstellen? Die Antwort ist klar und vollständig, wie oben erwähnt. Die Prüfungen, die Erstprüfungen und die Werte der theoretischen „volumetrischen“ Methode wurden auf die durch die EMPA geprüften Asphalte (FP2, EMPA, „Dauerhafte“ Komponente) und auf die, in FP4 (Rundlauf des IGT, ETHZ, Dübendorf) und FP7 (A2, TBA BL und IMP) eingesetzten Materialien übertragen, untersucht und mit der Methode des LAVOC EPFL formuliert ..

So wurde eine durchgehende Betrachtung der Mischgutsorten, welche von der BK angestrebt wurde) im Laufe des gesamten Projektes möglich.

### *FP3 - WEITERGEHENDER FORSCHUNGSBEDARF (Wertung BK)*

*Das vom LAVOC in FP3 portierte Verfahren ist aus der CRR - Methode (CRR, L. Franken) abgeleitet, die für die Formulierung der belgischen Walzasphalte entwickelt worden ist.*

*Man sollte sich durch zusätzliche Versuche jedoch vergewissern, dass diese "neue" Methode und die ersten erarbeiteten Schlussfolgerungen auch für alle gewöhnlichen schweizerischen Asphalte anwendbar sind.*

*Sie sollte noch für die speziellen Walzasphalte, wie MR/ PA/ EME mit PmB oder die harten Strassenbaubitumen überprüft und entwickelt werden.*

*In der Zukunft sollten auch in der Schweiz eine moderne Dimensionierungs- und Verstärkungsmethode, gestützt auf analytischen Berechnungen und in situ - Messungen (mit dem FWD-„Falling Weight Deflectometer“), eingeführt werden.*

### *FP3 - EINFLUSS AUF DAS NORMENWERK (Wertung der BK)*

*Der Bindemittelgehalt der HMT H ( ACT H ) sollte höher angesetzt werden, während der Hohlraumgehalt herabgesetzt werden muss, um bessere Module und höhere Ermüdungsfestigkeiten zu erreichen.*

Zusammenfassend: Alle Angaben, die das FP3 bestätigt hat, sind schon durch die zuständigen Fachkommissionen in den VSS - Normen und in den Nationalen Anhängen der EN-Normen in den Jahren 2003, 2004 und 2005 – ausser im Problembereich der Dimensionierung - eingeführt worden. Dies nachzuholen ist dringend und baldmöglichst vorzunehmen.

#### **FAZIT:**

Die erreichten Resultate und Aussagen basieren im Wesentlichen auf Arbeiten und Methoden des CRR in Belgien, die schon früher entwickelt wurden, aber wohl aufgrund des doch aufwändigen Vorgehens kaum eine dauernde und direkte Praxisanwendung ermöglichen.

Es ist zu bemerken, dass:

- FP3 zeigt , dass der Marshall -Test ( nach wie vor..) kein leistungsorientiertes Verfahren ist;
- FP3 zeigt , dass man mit dem Gyrator bessere Aussagen bezüglich Verdichtung und Bindemittelgehalt erreicht.
- die HMT H einen zu tiefen Bindemittelgehalt aufweisen und diese Materialien eher niedrige Module und geringe Ermüdungsfestigkeiten zeigen und dadurch anfällig sind auf Rissbildung;
- die Ermittlung und Festlegung des Bindemittelgehalt mit wenigen Prüfungen durchgeführt werden kann;
- bei sehr stark beanspruchten Asphalten t die mechanischen Eigenschaften (Modul, Ermüdung, Spurbildung, Kältefestigkeit) durch leistungsorientierte Prüfungen bestimmt werden müssen;
- für die „klassischen, üblichen Walzasphalte“ zeigt FP3 eine interessante Methode um den Modul E\*, die Ermüdung und das Verhalten bezüglich Spurbildung abzuschätzen.

## 4. FP 4: Rundlaufversuch (Felder analog FP 7)

IGT ETHZ

FP 4 - BEURTEILUNG ( Wertung der BK )

### **Rundlauf**

Bereits nach 111 000 Überrollungen konnte die gleiche Rangfolge der Versuchsfelder wie nach 1.4 Millionen Überrollungen festgestellt werden.

Der Rundlauf zeigt ganz klar die Vorteile der EME-Tragschicht (Feld 5) auf. Bei diesem Feld wurden die kleinsten Verformungen festgestellt.

Die Felder 1 und 4 liegen in einer ähnlichen Grössenordnung der Verformungen, was nicht plausibel ist. Bei gleicher Zusammensetzung enthält das Feld 4 ein PmB und zudem felsgebrochene Gesteinskörnungen; das Feld 1 ein Bitumen B 50/70 und gebrochenes Rheinkies. Aufgrund der Erfahrungen der Praxis wären beim Feld 4 kleinere Verformungen zu erwarten gewesen.

Bei näherer Betrachtung der Umstände stellt man fest, dass sowohl die Hohlraum- und Verdichtungsgrade der oberen Tragschicht und die Verformbarkeit der Foundationsschicht zwischen den einzelnen Feldern stark variieren:

Der Verformungswiderstand wird beim Feld 1 durch einen hohen Verdichtungsgrad (102.7 %) positiv beeinflusst, während die Verformbarkeit beim Feld 4 durch eine schlechte Verdichtung der Foundationsschicht ( $ME_1 = 52.5 \text{ MN/m}^2$ ). Die Verdichtung der oberen Tragschicht ist jedoch ausreichend mit einem Verdichtungsgrad von 100.7%.

Die auf dem Rundlauf gemessenen Spurrinnen lassen sich gesamthaft nicht den verschiedenen Mischgutsorten der oberen Tragschichten alleine zuordnen.

FP 4 - UMSETZUNG ( Wertung der BK )

Die Umsetzung der Erkenntnisse dieser Forschungsarbeit erfolgt am effizientesten durch ein Einbinden in entsprechende Normen des VSS. Das unterschiedliche Verhalten der Tragschichten infolge unterschiedlicher Bindemittel und Zuschlagstoffe kann auch in den entsprechenden Normenkommissionen berücksichtigt werden.

FP 4 - WEITERGEHENDER FORSCHUNGSBEDARF (Wertung BK)

Aus den erhaltenen Resultaten lässt sich kein dringender weiterer Forschungsbedarf ableiten. Es konnte allerdings gezeigt werden, dass die Validierung von Laborresultaten effizient in den Versuchsfeldern durchgeführt werden kann.

FP 4 - EINFLUSS AUF DAS NORMENWERK ( Wertung der BK )

Ja. Die Erkenntnisse können von den entsprechenden Normenkommissionen der VSS FK5 genutzt und umgesetzt werden.

## **FAZIT**

Die Forschungsarbeit wurde zielgerichtet entsprechend der vorgeschlagenen Vorgehensweise durchgeführt. Zusätzlich zu den im Forschungsantrag geplanten und beschriebenen Versuchen und Einrichtungen wurden spezielle Sensoren entwickelt, mit welchen es möglich ist, die vertikale Deformation von statisch und dynamisch belasteten bituminös gebundenen Schichten zu messen. Solche Sensoren können auch in anderen Untersuchungen eingesetzt werden, um bessere Erkenntnisse über die Deformationseigenschaften von bituminös gebundenen Schichten zu erhalten. Diese Forschungsarbeit war die letzte im Rahmen der auf dem Rundlauf der ETH Zürich durchgeführten Versuche.

Die Resultate der Forschungsarbeit geben interessante Erkenntnisse über das Verhalten der verschiedenen geprüften bituminös gebundenen Tragschichten. Sie zeigen den Einfluss verschiedener Bindemittel als auch den Einfluss des Brechanteils der mineralischen Korngemische.

## **6. FP 6: Griffigkeit auf Autobahnen, Messungen SRM und SCRIM**

IVT ETHZ

*FP 6 - BEURTEILUNG (Beurteilung der BK, aus Aramis)*

*Die Untersuchung konnte einerseits die Differenzen der Messergebnisse der beiden Messsysteme SCRIM und SRM erfassen und bestimmen und einen recht gut korrelierenden Zusammenhang aufzeigen.*

*Die Beurteilung der Ergebnisse führt aber zum Schluss, dass sich damit keine allgemein anwendbare Umrechnungsformel ableiten lässt. Damit müssen Messergebnisse SCRIM und Messergebnisse SRM jeweils mit den für diese Messsysteme gültigen Beurteilungsmassstäben bewertet werden.*

*Ergebnisse der zusätzlichen Pilot-Untersuchung zu den Gründen für die Differenzen im Griffigkeitsniveau von SCRIM und SRM-Messungen deuten daraufhin, dass nebst der Messsystem bedingten Unterschiede auch die Reifenart beim SRM auf das Griffigkeitsniveau einen Einfluss hat. Diesem Umstand konnte aber in Rahmen dieser Untersuchung nicht weiter nachgegangen werden.*

*FP 6 - UMSETZUNG (Beurteilung der BK aus Aramis )*

*Die Erhebung der Griffigkeit auf den Schweizer Nationalstrassen kann mit dem Messgerät SCRIM netzweit durchgeführt werden.*

*Die netzweite Erfahrung und Bewertung der Fahrbahngriffigkeit auf den verschiedenen Typen der Nationalstrassen mit dem Messsystem SCRIM erfolgte bereits 2001. Im Bericht „Zustandserfassung und –Bewertung Nationalstrassen, Fahrbahnen (ZEB-NS)“ des ASTRA und IVT sind die Ergebnisse enthalten.*

*FP 6 - WEITERER FORSCHUNGSBEDARF (Beurteilung der BK aus Aramis)*

*Nach Abschluss dieses Forschungsauftrages wurden aufgrund dieser Untersuchung zwei weitere Forschungsprojekte injiziert und vom UVEK bewilligt.*

*Das erste Forschungsprojekt erarbeitet die Grundlagen zur Beschreibung der heute einsetzbaren und zweckmässigen Messgeräte zur Erhebung der Fahrbahngriffigkeiten inkl. des Messsystems SCRIM (FP VSS 1999/298). Die Arbeiten stehen vor dem Abschluss (2007). Das zweite Forschungsprojekt wurde im Jahre 2006 bewilligt. Es hat zum Ziel den heute gültigen, aus den 70er Jahren stammende Bewertungshintergrund für die Griffigkeit zu überprüfen und wenn nötig anzupassen. Das Forschungsprojekt VSS 2005/702 wurde erst kürzlich vom IVT begonnen (2007) und wird im Jahre 2008 abgeschlossen.*

## *FP 6 - EINFLUSS AUF DAS NORMENWERK (Beurteilung BK, aus Aramis )*

*Die bestehenden Normen über die Fahrbahngriffigkeit stehen zurzeit in Überarbeitung. Die erste Norm SN 640 510 b, Griffigkeit, Messverfahren aus dem Jahre 1985 wird aufgrund des oben erwähnten Forschungsauftrages VSS 1999/298 zurzeit (2007) revidiert. Die zweite Norm SN 640 511 b, Griffigkeit, Bemerkungen aus dem Jahre 1984 wird nach Abschluss des Forschungsauftrages VSS 2005/702 revidiert.*

*Die Gründe für diese Revisionen sind zum Teil ursächlich auf die Ergebnisse und Erkenntnisse des im Rahmen von U2000 durchgeführten Forschungsprojektes ASTRA 2000/423, Griffigkeit auf Autobahnen, Vergleich der Messergebnisse SRM und SCRIM zurückzuführen.*

### **FAZIT**

Das Forschungsprojekt ASTRA 2000/423, Griffigkeit auf Autobahnen, Vergleich der Messwerte SRM und SCRIM hat einerseits die kostengünstigere, netzweite Erhebung der Fahrbahngriffigkeit auf den Nationalstrassen im Jahre 2001 als Teil der ersten gesamtschweizerischen Zustandserfassung der Nationalstrassenfahrbahnen ermöglicht. Die netzweite Erfassung der Fahrbahngriffigkeit mit dem Messsystem SCRIM hat sich bewährt. Als Teil vom zukünftigen, systematisch wiederholten Zustandserfassung konnten die nötigen Erfahrungen gesammelt werden.

Andererseits lieferten die Ergebnisse und Erkenntnisse wesentliche Grundlagen für die beiden neuen, heute (2007) in Bearbeitung stehenden Forschungsarbeiten betreffend „Messverfahren“ und „Bewertungshintergrund“ und dienten damit auch zur Erarbeitung resp. Revision der entsprechenden, wichtigen Normen über die Fahrbahngriffigkeit.

## **7. FP 7: Vergleichsstrecken auf einer Nationalstrasse**

### **IMP-BAUTEST AG**

#### *FP7 - BEURTEILUNG ( Beurteilung der BK )*

*Das Ziel des Forschungsauftrages bestand darin verschiedene Belagsvarianten im Massstab 1:1 auf einer Nationalstrasse einzubauen, deren Eigenschaften zu prüfen sowie das Langzeitverhalten unter schwerer Belastung zu überwachen. Dieses Ziel konnte mehrheitlich erreicht werden; die Langzeitbeobachtung konnte allerdings im Zeitraum von 4 Jahren nicht erfolgen.*

*Trotz grosser organisatorischer Probleme in der Aufbereitungsanlage konnten 9 von 10 Vergleichsfeldern zielgerecht realisiert werden. Aufgrund von Falschlieferungen des Bitumens, die ausserhalb des Einflussbereiches der Forschungsstelle lag, konnte ein Feld nicht realisiert werden.*

#### *FP7 - UMSETZUNG ( Beurteilung der BK )*

*Die aus der Forschungsarbeit hervorgegangenen Empfehlungen und Schlussfolgerungen können direkt umgesetzt werden, zum Teil mittels Ausarbeitung / Ergänzung von Normen.*

#### *FP 7 - WEITERER FORSCHUNGSBEDARF ( Beurteilung der BK )*

*Der bisherige Beobachtungszeitraum von 4 Jahren ist zu klein um unterschiedliche Entwicklungen der verschiedenen Versuchsfelder auf der Nationalstrasse zu beobachten. Das Monitoring der Versuchsfelder ist daher unbedingt über einen längeren Zeitraum (beispielsweise 10 Jahre) zu erstrecken.*

*Im Weiteren konnten aufschlussreiche Zusammenhänge zwischen den auf dem Felde bestimmten E-Moduli (mittels FWD) und den im Labor an Mischgutproben gemessenen E-Moduli festgestellt werden. Im Zusammenhang mit den analytischen Dimensionierungsmethoden für Strassenoberbauten sind derartige Zusammenhänge von hoher Bedeutung und sollten weiter abgesichert werden.*

#### *FP 7 - EINFLUSS AUF DAS NORMENWERK (Beurteilung BK )*

*Die durchgeführten vergleichenden Betrachtungen verschiedener Prüfmethode zur Ansprache sowohl des Kälte- als auch des Wärmeverhaltens zeigen auf, welche Prüfmethode aussagekräftige Ergebnisse liefern. Diese Erkenntnisse sollten in das Normenwerk Eingang finden.*

### **FAZIT**

Das Objekt auf der Nationalstrasse A2 ermöglichte den Einbau einer oberen Tragschicht und einer Deckschicht in einer Gesamtschichtdicke von 110 mm. Es wurden 10 unterschiedliche Tragschichten und 2 unterschiedliche Deckschichten eingebaut.

Der Einbau der Beläge auf den Teststrecken wurde minutiös begleitet, ausreichend beprobt und untersucht. Die Beläge erfüllen mit einer Ausnahme die gestellten Anforderungen bezüglich Zusammensetzung und Eigenschaften des Mischgutes sowie Einbauqualität (Schichtdicke, Verdichtung).

Zur Erfassung der mechanischen Eigenschaften der Mischgutsorten, wurden verschiedene Prüfungen durchgeführt. Dabei wurde das Ziel verfolgt, vergleichende Betrachtungen der unterschiedlichen Prüfmethode durchzuführen. Im Focus stand auch ein Vergleich des Verhaltens der Probestrecken mit den Laborprüfverfahren und mit dem Verhalten der auf dem Rundlauf eingebauten Beläge. Die Versuche zielen dahin, 4 wesentliche Eigenschaften anzusprechen, nämlich den Verformungswiderstand bei sommerlichen Temperaturen, das Ermüdungsverhalten, das Kälteverhalten und die Wasserempfindlichkeit des Mischgutes. Das Verhalten der Teststrecken wurde jährlich durch Quer- und Längsebenenmessungen beobachtet.

Die wesentlichen Folgerungen aus dem Vergleich der Prüfmethode sind:

- Die mit dem Falling Weight Deflectometer FWD auf dem Objekt gemessenen E-Moduli erlauben eine ähnliche Beurteilung wie die am Mischgut bestimmten E-Moduli (KAST).
- Offenbar eignen sich dynamische Versuche wie der Druckschwellversuch oder der KAST-Versuch, um das Verformungsverhalten zu beurteilen.
- Wir empfehlen die Kälteviskosität für die Beurteilung des Kälteverhaltens eines Mischgutes.
- Es lassen sich keine Vorteile des felsgebrochenen Splittes gegenüber dem gebrochenen Kies feststellen. Die Beobachtungen auf den Versuchsfeldern der A2 sind diesbezüglich nach 4 Jahren noch zu wenig aussagefähig,
- Es konnten keine markanten Vorteile der direkt destillierten Bitumen festgestellt werden.
- Bei den polymer-modifizierten Bitumen konnten die bekannten Vorteile der grösseren Gebrauchstemperatur-Spanne bestätigt werden.
- Die Erfahrungen mit den beiden EME-Tragschichten EME-1 und EME-2 sind generell als positiv zu beurteilen. Die mit dem FWD bestimmten E-Moduli zeigen bei diesen Schichten die höchsten Werte. Die Prüfungen bei tiefen Temperaturen decken allerdings auf, dass das Kälteverhalten dieser Beläge ungünstig ist. Wie erste Erfahrungen aus der Praxis bereits zeigen, dürfen auch die EME-Tragschichten in bestimmten Höhenlagen nicht ohne Deckschicht überwintert werden.
- Bei der Aufbereitung und dem Einbau der Niedertemperatur-Asphalte traten keine Probleme auf. Beide Tragschichten verfügen über gute mechanische Eigenschaften bei hohen Temperaturen. Bei tiefen Temperaturen konnte ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Produkten beobachtet werden. Die Wasserempfindlichkeit liegt im Rahmen der übrigen untersuchten Mischgutsorten.
- Die beiden Deckschichten MR8 und SMA8 haben sich bisher sehr gut verhalten; auf dem Objekt sind keine Unterschiede feststellbar.

# H ANMERKUNGEN UND EMPFEHLUNGEN ( BV )

## DES BERICHTVERFASSERS (BV) ZUR FORSCHUNG IM ASPHALTBELAGSBAU

Der Asphaltstrassenbau, insbesondere die Entwicklung von neuen Belagssorten, Aufbaustrukturen, von neuen Bindemitteln und Komponenten ( Bitumen, Polymermodifizierte Bitumen, Spezialfiller usw.) sowie der Geräteeinsatz bei der Herstellung und beim Einbau von bituminösem Mischgut sind – wie alle Gebiete der Technik - in stetem Wandel begriffen und neuen Entwicklungen und Verbesserungen unterworfen.

Generell ist festzuhalten, dass die Forschungstätigkeit an bituminösen Belägen nunmehr schon seit Jahrzehnten sehr intensiv und breit betrieben wird. Dabei sind aber auch eine gewisse Wiederholungs – und vielleicht auch eine gewisse „Ausuferungstendenz“ festzustellen.

Parallel dazu ist gleichzeitig - seit etwa 10 – 15 Jahren – gesamthaft eher eine (starke) Abschwächung der eigenen Forschungstätigkeit der Herstellenden Industrie (Hersteller von Bindemitteln und Zusätzen) festzustellen. Dies erstaunt und ist zugleich bedenklich, insbesondere bezüglich der notwendigen und erwünschten Transparenz bei Innovationen in der Praxisumsetzung.

Bezüglich der laufenden, vorwiegend von staatlichen Instituten gepflegten Forschungstätigkeit kann damit im Vergleich zur abgeschwächten Forschungstätigkeit der Herstellenden Industrie die Frage gestellt werden, ob es denn der Druck europäischer Gremien und Labors sowie vielleicht auch die Ansprüche der zahlreichen normenschaaffenden Gremien und ihrer Mitglieder an sich selbst ist, - und auch tatsächlich Aufgabe von staatlichen Labors und von privaten Laborfirmen sein kann (?) - mit hohen öffentlichen Forschungsgeldern in, von der Praxis nicht, oder kaum nachvollziehbare „Tiefen“ - oder „Spähren“ der einzelnen Ausgangs – Produkte (Konstanz der Provenienz, Änderungen der Basisstoffe der Bindemittel und Zusätze ..?) und ihrer Herstellungsverfahren vorzudringen. Desgleichen stimmen die für die laufende Überprüfung und Optimierung des Herstellungsprozesses und des Einbaus in der Praxis seit nunmehr Jahrzehnten angedachten (zu ?) zahlreichen aufwändigen Prüfmethode und Prüfverfahren im bituminösen Belagsbau kritisch, wenn dann auf Seite der Praxis (Aufbereitungsanlagen, Einbau durch Unternehmer u.a.) aufgrund der wiederum oft nicht gänzlich überschaubaren Produktions– oder Lieferbedingungen der bituminösen Baustoffe - insbesondere der Bindemittel - im Vergleich zur „Forschungsintensität“ nicht immer die erwünschten transparenten Verhältnisse vorliegen (können..).

Die möglichst praxisnahe Forschung - mit tatsächlich auch in der Praxis anwendbaren Prüfmethode und Verfahren (Kosten, Zeit) - sollte, wie schon seit Jahrzehnten empfohlen und angestrebt, noch stärker in den Vordergrund rücken, wobei umfangreiche Praxisversuche ( im Massstab 1:1, „in situ“ , als Versuchseinbauten, Versuchsstrecken ) auch innerhalb, an der Grenze - oder eben auch ausserhalb – bestehender Normvorschriften gezielt mit dem Einsatz von Neuerungen und damit auch Risiken zu verbinden wären, die auch bei einzelnen Misserfolgen solcher Experimente kaum höhere Kosten verursachen als dies die nur schwer umsetzbaren, eher zu „akademischen“ und stets wiederkehrenden (!) Forschungsarbeiten der gleichen Art erfordern. Deren Ergebnisse bleiben - aufgrund der unter starker Vergrößerung der „Prüffenster“ (Wiederholbarkeit, Reproduzierbarkeit, Streumass der Verfahren ?... ) hergeleiteten Aussagen – eben nur beschränkt wiederholbar oder vergleichbar. Für die Praxis sind sie dann eher irrelevant und ohne direkten Bezug und anwendbare Umsetzungsmöglichkeit.

Auch bezüglich Grossversuchsanlagen (wie die abgebaute Rundlaufanlage des IGT der ETHZ) wäre aus Sicht des Verfassers eher (grosse) Zurückhaltung gegenüber neuen Anlage-Projekten angebracht, da auch gemäss den bisher gemachten Erfahrungen bei solchen Grossanlagen doch stets relativ grosse Probleme bei der Realisierung der Versuchsfelder (kritische Einbaubedingungen infolge der zu geringen Dimensionen der Radien, Feldlängen etc.) auftreten und die ungelöste Frage der Klimaabhängigkeit (Problematik der erforderlichen Vergleichbarkeit aufeinanderfolgender Versuche) stets ein Nachteil bleiben dürfte. Der direkte Übergang auf praxisgerechte Versuchsstrecken - wie vorgehend beschrieben - ist daher von Vorteil und für Forschungstätigkeiten in der Zukunft zu empfehlen.

Gewiss werden bezüglich der Laborprüfungen auch in Zukunft zumindest die beiden Vorgehensweisen respektive „Schienen“ der Forschungstätigkeiten bestehen bleiben und mit Prüfverfahren für die Grundlagenforschung einerseits, und solchen für Routine – und Eignungsprüfungen andererseits weiter zu verfolgen sein . Der Berichtverfasser empfiehlt dringendst eine verstärkte und konsequente Anbindung der gesamten Forschungstätigkeit auf dem Gebiet der bituminösen Beläge an praxisnahe Forschung. Eine konsequente Verbindung der Laborforschung mit Objekten im Massstab 1:1, das heisst mit Versuchen „in situ“ ist konsequent umzusetzen.

Ansonsten ist zu befürchten, dass die gleichen ursprünglichen Fragestellungen und Zielsetzungen für Forschungstätigkeiten an bituminösen Belägen - insbesondere die mechanischen Festigkeitsprüfungen betreffend – auch nach weiteren wiederum 20 Jahren erneut und kaum verändert auftauchen werden.

Als ein erstaunliches Beispiel bezüglich des „Zeitbedarfs der Forschung an bituminösen Baustoffen ist der in den vorliegenden Forschungsergebnissen erneut (und wohl auch zu Recht, weil in den letzten ca. 20 Jahren kaum Fortschritte erzielt wurden..? !) wiederum enthaltene Ruf nach Entwicklung und Einsatz von Prüfverfahren, die physikalische Kennwerte liefern, zu nennen. Diese Forderung steht schon sehr lange im Raum und ist daher wirklich nicht neu, haben doch schon viele Fachleute - gewissermassen seit mehreren Jahrzehnten (!) – ebenso beispielsweise auch der Verfasser des Syntheseberichtes in seiner Dissertation der EHTZ 8177/1987 (und EMPA Bericht 215) - speziell auf diese Problematik hingewiesen.

Der Verfasser erlaubt sich an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass das von ihm 1987 neuentwickelte Prüfverfahren **PK-BSA** ( **PRÜFKÖRPER – BIEGE – SCHUB – AXIAL** - das später von der EMPA in „KAST“ umbenannt wurde...) das bisher einzige Prüfverfahren darstellt, das die dimensionsunabhängige (kein Formfaktor wirksam) Prüfung an zylindrischen Prüfkörpern ( auch Bohrkerne!) erlaubt und durch Doppelintegration (FE – Elemente i-n im Querschnitt und Drehung der Ebene von 0–180 Bogengrade, oder Drehung der halben Ebene um 0-360 Bogengrade) die räumliche physikalische Berechnung des Spannungszustandes – als tatsächliche Triaxialversuch - ermöglicht und dadurch den Vergleich zum Verhalten der Beläge „in situ“ (daher auch ganzer Belagsaufbauten - allenfalls mehrschichtige Bohrkerne mit grossen Durchmessern bis 500mm) somit physikalisch sauber ermöglicht.

Es ist ja einerseits auch verständlich, dass – historisch betrachtet - durch zeitlich parallele Entwicklungen in verschiedenen Ländern auch unterschiedlichste verschiedene Prüfverfahren entwickelt wurden, beeinflusst von industriellen Schwerpunkten und von den vorgegebenen ausrüstungstechnischen und auch finanziellen Möglichkeiten der zahlreichen staatlichen und privaten Prüfinstitute und Prüflabors. Aus Sicht der jeweiligen Anwender ist deren Anwendung und Berechtigung logischerweise gegeben.

Da nun aber auf internationaler und nationaler Ebene in den Gremien jedes Mitglied bestrebt sein dürfte, seine eigenen Entwicklungen zu portieren, erstaunt die seit Jahren gepflegte und auch „gegenseitig“ berücksichtigte Vielfalt des Angebotes und die Anwendung der prüftechnischen Palette mit dermassen zahlreichen Prüfverfahren nicht. Vielleicht müssten diesen (zu) breit laufenden Anstrengungen (zu viele, auch jeweils „laborspezifische“ und entsprechend angepriesene Prüfverfahren) auf diesem Gebiet schlicht und einfach durch Vorgabe und Festlegung der Eingrenzungen der Vielfalt durch die, die Mittel für die Forschung zuteilenden, übergeordneten fachlichen Instanzen begegnet werden.

Letztendlich müssten solche „Prüfverfahren mit Zukunft“ doch stets praxistauglich, damit relativ einfach und schnell anwendbar bleiben und auch aussagefähig sein, was in der Tat das zentrale Problem ist und somit noch bleiben wird.

Für die „reine Forschung“, für Grundlagenerarbeitung und spezifische Untersuchungen ist klar, dass die schon vorhandenen, (siehe oben) aufwändigeren, anspruchsvolleren und teureren Prüfverfahren (mit den entsprechenden Apparatkosten, Zeitbedarf ) ihre Anwendung weiter verdienen und auch speziell an den Hochschulen und in spezialisierten Grosslabors zur Anwendung gelangen werden. Es zeichnet sich dabei jedoch ab, dass die angestrebte Praxisumsetzung kaum vollziehbar bleibt. Oft bleibt die Aussagefähigkeit auch an die persönliche, damit individuelle „Erfahrungswolke“ der jeweiligen spezifischen Anwender eng gebunden (!) und wird damit nicht allgemein zugänglich.

Kommt dazu, dass auch fachlich versierte Vertreter von Bauherren und Unternehmungen in den normenschaffenden Fachkommissionen der an und für sich erfreulichen hohen „Eigendynamik“ der Vertreter von staatlichen und privaten Labors bezüglich prüftechnischer Anwendungen kaum mehr folgen können.... Daher ist nicht auszuschliessen, dass sich auch die Normierungen bezüglich der erwünschten Praxisnähe – und Praxistauglichkeit – sich gelegentlich eher kritischen Bereichen nähern können.

Es ist möglicherweise auch denkbar, dass Forschungsbegehren primär durch Vertreter von Labors und staatlichen Forschungsstellen über Kommissionen zum Vorschlag gelangen - in denen wiederum gleiche Forschungsinteressierte selber sitzen – und diese in der Folge dann einfach an die eigentlichen Vergabegremien „durchgewinkt“ werden, denen möglicherweise zu wenige Experten mit der erforderlichen Praxiserfahrung angehören. Dadurch würde dann nur schwerlich die erforderlichen Eingrenzungen und die anzustrebende Verbesserung in der komplexen Situation der Forschung an bituminösen Belägen erfolgen.

Gesamthaft sind in Zukunft weitere verbundene Forschungsarbeiten verschiedener Forschungsstellen in Verbindung mit Grossversuchen ( Massstab 1:1, „in situ“ ) und mit Langzeitüberprüfungen zu empfehlen.

# REMARQUES ET RECOMMANDATIONS ( BV )

## DU RAPPORTEUR ( BV, Auteur du rapport ) EN FAVEUR DE LA RECHERCHE DANS LA CONSTRUCTION DES CHAUSSÉES SOUPLES

La construction des chaussées souples, tout particulièrement la recherche de nouveaux revêtements, de nouvelles superstructures et de liants nouveaux (bitumes, bitumes-polymères), fillers spéciaux, etc., la mise en œuvre de nouvelles machines pour la fabrication et la mise en place des enrobés bitumineux, est placée sous la pression constante du changement et de la nouveauté.

Il faut admettre désormais que l'activité de recherche dans le domaine des chaussées souples est conduite depuis de nombreuses décennies de façon intensive et à grande échelle. Il faut toutefois remarquer une tendance certaine à une répétition envahissante.

En parallèle et dans le même temps - depuis 10-15 ans - on constate une forte diminution de l'activité de recherche de l'industrie impliquée dans ce domaine, ce qui est préoccupant et ne montre pas une situation réjouissante pour l'apparition d'innovations industrielles.

En considérant la part constante, toujours plus importante, consacrée par les instituts étatiques à la recherche par rapport à l'activité diminuée de l'industrie, se pose la question de savoir si ce n'est pas alors la pression exercée par les assemblées et autres laboratoires européens, ainsi que les revendications des très nombreux groupes de normalisation et même celles de leurs membres, qui conduisent à mettre en avant, avec des crédits de recherche publiques, les « profondeurs longuement scrutées », sans - ou avec peu d'application directe, de produits ou de procédés de fabrication particuliers. De même, les très nombreuses méthodes d'essai et de vérification, compliquées et coûteuses, utilisées depuis des décennies, destinées au contrôle courant, à l'optimisation de la fabrication, ainsi qu'à celle de la mise en place des enrobés bitumineux, paraissent bien préoccupantes, alors que, du côté pratique, à cause des conditions de production ou de livraison des produits bitumineux, en particulier les liants, souvent pas totalement contrôlables, il n'existe pas de rapports bien clairs avec l'« intensité » de la recherche.

La recherche appliquée, la plus proche possible de la pratique - comportant des méthodes et des procédés effectivement utilisables en pratique - devrait, comme réclamé depuis très longtemps, de toute urgence et plus fortement encore, se mettre au premier rang, en réalisant plus des essais en vrai grandeur (à l'échelle 1 :1, in situ, sous la forme de planches d'essai ou de comparaison, sous trafic réel), dans un cadre proche, ou même éloigné des normes existantes en combinant nouveautés et risques. Cette façon de faire ne provoquera pas plus d'échec coûteux que les travaux de recherche répétitifs, difficilement transposables, académiques mêmes, exécutés dans ce domaine, dont les résultats, à cause de la trop grande dimension de la « fenêtre de mesure » (répétition, reproduction, dispersion de mesure des procédés ?) sont à considérer comme peu reproductibles ou difficilement comparables. En pratique, ils sont souvent même sans portée, sans relation directe et sans possibilité d'application.

En ce qui concerne les installations d'essai en vrai grandeur (comme le manège, désormais démonté, du FP4, IGT EPFZ), l'auteur est d'avis qu'il ne faut envisager la construction de nouvelles installations qu'avec la plus grande modération. En effet, comme l'ont montré les dernières expériences exécutées avec ce type de dispositif, lors de la réalisation de planches d'essai, il y a constamment de grands problèmes d'exécution (conditions difficiles lors de la mise en œuvre, dimensions trop restreintes: rayons, longueurs des planches, etc.). De plus, la dépendance aux conditions météorologiques fait que la vraie comparaison nécessaire d'essais successifs restera toujours problématique, ce qui constitue un handicap pour ce type de recherche. Le passage direct à des planches de comparaison (ou d'essai) pensées, puis exécutées dans un site réel, comme décrit précédemment, est assurément un avantage certain ; cette méthode est, de ce fait, entre autre, recommandée pour les recherches futures.

En ce qui concerne les essais en laboratoire, la recherche se poursuivra aussi dans le futur avec les deux procédures, donc sur les deux voies respectivement, avec, - d'une part, des méthodes de mesure pour la recherche de base et d'autres plus spécifiques pour la routine - et, d'autre part, des méthodes pour les épreuves de formulation. L'auteur de ce rapport recommande de façon urgente le transfert de toute la recherche dans le domaine des chaussées souples dans l'exécution de travaux de recherche pratique, liés à réalisation de projets « in situ », à l'échelle 1 :1, permettant d'atteindre des buts utilisables rapidement en construction et en entretien routiers.

Sans quoi, on peut craindre de voir réapparaître, d'ici une vingtaine d'années à nouveau, les mêmes questionnements originels et les mêmes buts à atteindre dans la recherche sur les chaussées souples, en particulier à tout ce qui touche à la détermination des caractéristiques mécaniques.

A titre d'exemple frappant, concernant le besoin actuel de recherche sur les enrobés bitumineux, il n'est que de lire le nouvel appel - pas forcément inapproprié, puisque ces 20 dernières années, il ne s'est pas réalisé grand chose – figurant dans les rapports de recherche en cours d'appréciation - pour le développement et l'utilisation de méthodes permettant de définir les caractéristiques physiques (appelées maintenant, selon de « nouvelles » définitions européennes, « caractéristiques fondamentales »). Cette exigence est en vigueur depuis très longtemps et n'est maintenant pas nouvelle. Déjà, depuis plusieurs dizaines d'années (!), de nombreux professionnels ont attiré l'attention sur cette nécessaire problématique, tel le rédacteur de cette contribution dans sa thèse de doctorat de 8177/1987 à l'EPFZ et Rapport EMPA 215.

A ce propos, dans ce cas d'espèce, l'auteur se permet de faire remarquer que la méthode d'essai **PK-BSA** (nommée **PRÜFKÖRPER – BIEGE – SCHUB – AXIAL** / Eprouvette – Flexion – Poussée – Axial), qu'il a conçue et développée en 1987 (nommée, plus tard « **KAST** » par l'EMPA.....), est, à l'heure actuelle, encore le seul essai qui permet de tester, sans influence d'un facteur de forme, des éprouvettes cylindriques (et même des carottes multicouches forées avec des diamètres même de 500mm)

Cette méthode permet, en utilisant la méthode des éléments finis ( FE – Finite Elements i-n, avec, dans un plan, une rotation 0-180 degrés d'arc ou, dans un demi-plan, une rotation de 0-360 degrés d'arc) , par une double intégration, de calculer l'état de contraintes, physiques et spatial, régnant dans l'éprouvette soumise à la poussée – alors un vrai essai triaxial !

Elle rend aussi possible l'établissement bien net de la comparaison du comportement physique de revêtements « in situ » - avec même de superstructures routières complètes avec, bien sûr, des carottes de grand diamètre.

Si l'on considère la situation du point de vue historique, il est compréhensible que divers procédés très différents se soient développés parallèlement au même moment, influencés par des besoins industriels, mis en œuvre avec les moyens techniques (financiers) existants des très nombreux instituts de recherche et laboratoires officiels ou privés.

Mais alors que maintenant au niveau international aussi bien que national, chaque membre des commissions se devrait de faire la promotion de ses propres développements, on ne s'étonne pas de la diversité abondante, cultivée pendant de nombreuses années, avec une considération « mutuelle », de l'offre et de l'utilisation des nombreuses méthodes de contrôle de la palette de la vérification.

Il faut pourtant remarquer que malgré l'appel vibrant, constamment répété pendant 20 ans, il ne s'est pas fait grand chose dans le domaine combien nécessaire de l'utilisation de méthodes de mesure physiques. Peut-être que, dans ce domaine, ces trop larges et grands efforts, exécutés en permanence – trop de procédés de mesure, chaque fois « spécifique en laboratoire » et de ce fait particulièrement appréciés - devraient être fortement réduits au plus simple, sans apprêt, par un cadrage ferme, strict, affirmé, définissant clairement les buts visés, imposés par les responsables des instances qui accordent les crédits de recherche ou définies par les groupements des laboratoires eux mêmes.

Enfin, ces méthodes d'essai „d'avenir“ devraient être relativement simples, faciles d'emploi, tout en restant péremptoire, ce qui en fait, laisse toutefois subsister un très important problème.

Pour la recherche pure, pour la mise au jour de bases, pour des expérimentations spécifiques, il est bien clair que les méthodes de mesure, déjà existantes (voir plus haut), coûteuses, exigeantes et chères trouveront leur justification et leur utilisation, tout spécialement dans les Ecoles polytechniques et dans les grands laboratoires. Mais leur utilisation à des fins pratiques ne semble pas réalisable !

En plus, il se trouve que les représentants des maîtres d'ouvrage et des entreprises dans les commissions professionnelles rédigeant des normes sont de plus en plus dans l'incapacité de suivre à la dynamique « propre » (au fond positive !) des représentants des laboratoires publics ou privés. C'est pourquoi, il ne faut pas exclure aussi que la normalisation souhaitée pour des applications pratiques sûres puisse s'approcher de domaines critiques.

Il est à craindre sérieusement, tant que les demandes de recherche seront présentées, en premier lieu, par les représentants des laboratoires privés et publiques, à titre de proposition, au travers de commissions, auxquelles, en tant que chercheurs, ils appartiennent, et que ces projets seront ensuite présentés ostensiblement dans les groupes d'attribution (où d'ailleurs, souvent, ils siègent, et où, généralement, on constate un manque d'experts possédant une véritable expérience pratique) par les mêmes experts ou d'autres qui leurs sont liés, qu'il ne faut pas espérer beaucoup d'améliorations, voire un début de recadrage de la situation de la recherche dans les chaussées souples.

Un premier pas pour améliorer cette situation sera de proposer la réalisation de projets en vraie grandeur « in situ », à l'échelle 1:1 – , bien liés entre eux et bien accompagné par différents laboratoires travaillant en coopération, avec le minimum des méthodes d'essais. Cela permettra ainsi d'atteindre, après observation du comportement en place, des buts utilisables, rapidement, en construction et en entretien routiers.

# I ABSCHLIESSENDE BEMERKUNG UND DANK

Die vom Berichtverfasser in Kapitel H gemachten Anmerkungen und Empfehlungen enthalten gewisse „harte Aussagen“. Sie sollen jedoch konstruktiv dazu beitragen, den Realitätsbezug, damit den Praxisbezug von zukünftigen Forschungsanstrengungen zu fördern – oder zumindest - eine kritischere Sichtweise der an der Forschung beteiligten Stellen, insbesondere der Forschungsstellen selbst, zu fördern.

Im Syntheseberichtes ist an dieser Stelle festzuhalten, dass das Gesamtprojekt der hier vorliegenden Forschung zur „Dauerhaftigkeit bituminöser Beläge“ innerhalb der Massnahme M17 des grossen Projektes „Unterhalt 2000“ - aus Sicht des Auftraggebers ASTRA und gemäss Absicht der gemeinsam auftretenden Forschungsstellen - ursprünglich die Zielsetzung hatte, gezielte Abklärungen zur erforderlichen Verbesserung der Dauerhaftigkeit von bituminösen Belägen durch Untersuchungen innerhalb verschiedener und zudem parallel laufender Forschungsprojekte vorzunehmen, um dann in einer doch gewünschten kurzen Zeit (nach 2–3 Jahren) Empfehlungen aus den erarbeiteten Resultaten abzuleiten und in die Normen und / oder in Standards des ASTRA unmittelbar einfließen zu lassen.

Wie vorgängig in den Kapiteln A, B, C beschrieben, musste diese Zielformulierung nachträglich als (zu) hoch eingestuft werden.

Grundsätzlich waren die verschiedenen Forschungsstellen als Auftragnehmer des ASTRA weitgehend frei, Ihre Programme festzulegen und zu formulieren.

Die Verhaltensbilanz in FP1 stellt eine gute Übersicht dar, konnte aber nur wenige Inputs für die anderen Forschungspakete erzielen.

In den weiteren Forschungsprojekten wurden zahlreiche Untersuchungen vorgenommen und auch positive Ergebnisse erzielt, jedoch ohne dass die direkte praktische Umsetzung der Resultate erreicht wurde.

Dies liegt einerseits daran, dass auch Ansätze für neue Methoden ausgearbeitet wurden, die jedoch für sich selbst noch umfangreiche Abklärungen erfordern werden bis ihre Aussagen und die praktischen Anwendungen als sicher und geeignet gelten können. Dies trifft speziell für die Untersuchungen im umfangreichen Forschungsprojekt FP2, zum Teil auch für FP3 zu, wie dies in den Wertungen und in den Beurteilungen in den Kapiteln E, F und G festgehalten wird.

Aus FP3 kann ein Vorschlag für erweiterte und im Ansatz brauchbare Eignungsprüfungen gemäss dem Verdichtungsverhalten der Beläge und bezüglich der Volumetrie ihres Aufbaus abgeleitet werden.

Die Ergebnisse aus dem Grossversuch in FP4 zeigten deutliche Unterschiede im Verhalten der eingebauten verschiedenen Beläge (der oberen Tragschichten), doch waren auch deutliche und nicht ganz erklärbare Resultate infolge der versuchstechnischen Anordnung (kritische Dimensionen) festzustellen.

Die Ergebnisse der vergleichenden Untersuchungen in FP6 mit verschiedenen Messverfahren SRM und SCRIM für die Erfassung der Griffigkeit der Fahrbahnoberflächen sind aussagekräftig und für weitere Untersuchungen und Abklärungen sowie Normierungsvorhaben einsetzbar.

Die in FP7 gemachten Erfahrungen mit den Vergleichsstrecken, - Versuchsstrecken im Massstab 1:1 ermöglichen einen gewissen Praxisbezug zu den anderen Forschungspaketen und bedingen für bessere und auch erhärtende Aussagen eine weitere begleitende Beobachtung der Versuchsstrecken unter der gegebenen hohen Verkehrs-Beanspruchung auf der Nationalstrasse A2.

**FAZIT:** Zukünftig wären ähnliche Grossprojekte schon im Voraus enger und klarer zu formulieren und vorzugeben. Die Entwicklung neuer Methoden wären aber getrennt anzugehen und sollten nicht innerhalb eines breit angelegten Versuchsprogrammes verschiedener Forschungsstellen Aufnahme finden. Zudem wäre zu empfehlen, ein weiteres Grossprojekt durch einen vom ASTRA beauftragten Gesamtprojektleiter fachlich und administrativ ( Realisierungstreue, kontrolliertes Zeitmanagement, Kostenmanagement ) gesamtverantwortlich zu leiten und abzuwickeln. Dadurch könnten Zielsetzung und Ergebnisse besser und auch erfolgreicher zur Deckung gebracht werden.

## Dank

Der Verfasser des Syntheseberichtes dankt allen Beteiligten für die Unterstützung und die Mitarbeit während der Dauer der Ausführung der Forschungsprojekte.

Den Forschungsstellen wird Anerkennung für die grossen geleisteten Einsätze und die sehr zahlreichen Anstrengungen bei den Untersuchungen gezollt, verbunden mit dem Wunsch, dass in Zukunft der angestrebte Praxisbezug noch verstärkt werden kann und gezielt auch konsequenter verfolgt wird.

Dem Bundesamt für Strassen, ASTRA, - als Auftraggeber der Forschungsprojekte und des Syntheseberichtes -, und seinen mitbeteiligten Vertretern gilt grosser Dank für die Unterstützung der vielen Anliegen der Forschungsstellen und für die Unterstützung der Begleitkommission.

Allen Mitgliedern der Begleitkommission gilt ein spezieller Dank für den geleisteten Einsatz und die fortwährende Unterstützung der Arbeiten.

Insbesondere danke ich Herrn Blaise Graf für die Übernahme der anspruchsvollen und stets fachmännisch durchgeführten Übersetzungsarbeiten.

Bern, 10. Juli 2008

Jürg P. Junker

## CONCLUSION ET REMERCIEMENTS

Les remarques et recommandations faites par l'auteur dans le chapitre H contiennent certaines déclarations "un peu dures". Elles ont toutefois pour objectif de contribuer de façon constructive à la prise en compte des rapports avec la réalité afin de faire avancer les recherches futures avec applications pratiques - ou tout au moins – encourager une vision critique des différents acteurs dans la recherche, en particulier les centres de recherches eux-mêmes.

En résumé, l'OFROU, conformément à l'intention des centres de recherche fonctionnant en commun, a mandaté le projet global de la recherche ici présente sur la "durabilité des revêtements bitumineux" de la mesure M17 du grand projet "Unterhalt 2000". L'objectif initial était une clarification visant à l'amélioration de la durabilité des doublures bitumineuses. Les mesures retenues pour y parvenir étaient d'entreprendre différentes études en parallèle à d'autres travaux de recherche pour ensuite pouvoir, en fonction des résultats qui en ont découlés, élaborer des recommandations. Ceci dans un délai court et fixé (après 2 - 3 ans), afin de pouvoir directement s'intégrer aux normes et/ou standards de l'OFROU.

Comme décrit précédemment dans les chapitres A, B, C, la formulation de cet objectif devaient être classés postérieurement comme (trop) difficilement atteignable.

Le bilan des comportements dans les travaux de recherche FP1 représente un bon aperçu. On n'a toutefois pu obtenir que peu d'intrants pour les autres travaux de recherche.

Dans les autres projets de recherche, de nombreuses études ayant également obtenues des résultats positifs ont été entreprises sans toutefois que la transposition directe des résultats à la pratique ait été atteinte.

Cela tient d'une part au fait que des approches pour de nouvelles méthodes ont été élaborées. Elles-mêmes exigeront encore de plus amples clarifications jusqu'à leur validation aux applications pratiques pouvant être considérées comme sûres et appropriées. Cela s'applique particulièrement aux études des travaux de recherche FP2 et en partie également FP3, comme relevé dans les évaluations et appréciations des chapitres E, F et G.

Une proposition a découlé des travaux FP3 pour des tests d'aptitude étendus et utiles dans l'approche conformément au comportement des doublures sous compression et portant sur la volumétrie de leur construction.

Les résultats de l'expérience à grande échelle dans les travaux FP4 ont montré des différences claires dans le comportement des différentes doublures insérées (couches porteuses supérieures). Cependant, des résultats clairs et tout à fait explicables n'ont pas pu être constatés à la suite de la disposition des essais techniques (dimensions critiques).

Les résultats des études comparatives dans les travaux FP6 avec différentes méthodes de mesure SRM et SCRIM pour la saisie de la maniabilité des surfaces de chaussée sont valables. Ils sont aussi applicables à d'autres études et recherches plus détaillées ainsi qu'à des projets de normalisation.

Les expériences faites dans les travaux FP7 avec les distances de comparaison - distances expérimentales à l'échelle 1:1 - permettent une certaine prise en compte de la pratique dans les autres travaux de recherche. Cela conduit à un discours plus crédible confirmant une nouvelle observation d'accompagnement des distances expérimentales effectuée dans des conditions de trafic d'exigence élevée sur la route nationale A2.

**RÉSULTATS** : A l'avenir, de grands projets semblables devraient déjà à l'avance être formulés plus étroitement et plus clairement puis ensuite affectés. Le développement de nouvelles méthodes devrait toutefois être séparément concerné et ne devrait pas à travers un large programme expérimental terminer dans différents centres de recherches.

En outre, il serait recommandé qu'un autre grand projet conduit et achevé, techniquement et administrativement (fidélité de la réalisation, gestion des délais, gestion des frais), par un chef de projet responsable de la globalité, chargé par l'OFROU. De cette manière, l'objectif et les résultats pourraient être amenés avec plus de succès à concorder.

## Remerciements

L'auteur du rapport de synthèse remercie tous les participants pour le soutien et la coopération pendant la durée de la mise en oeuvre des projets de recherche.

Une grande reconnaissance est témoignée à l'égard des centres de recherches pour l'engagement investi et les nombreux efforts de contributions aux études. Ceci lié au désir qu'à l'avenir, la prise en compte de la pratique puisse encore être intensifiée et les objectifs poursuivis fructueux.

Un grand remerciement à l'Office fédéral des routes, l'OFROU - en tant que mandataires des projets de recherche et du rapport de synthèse - et à ses représentants impliqués dans le projet pour le soutien aux nombreuses préoccupations des centres de recherche et au soutien de la Commission de suivi.

Remerciements particuliers à tous les membres de la Commission de suivi pour son engagement et son soutien continuels aux travaux.

Je remercie tout particulièrement Monsieur Blaise Graf pour la prise en charge exigeante et spécialisée du travail de traduction.

Bern, 10. Juli 2008

Jürg P. Junker

# K LITERATURVERZEICHNISSE DER FP 1 - 7

## FP 1 / Literaturverzeichnis 1 / xx

- [1] -, Substanzerhaltung der Nationalstrassenwerke, Schlussbericht einer Arbeitsgruppe, Bundesamt für Strassen, Bern, 1998
- [2] - M. Shojaati, L. Seiler-Scherer, M. Caprez, I. Scazziga, F.L. Yang, Tägliche äquivalente Verkehrslast TF verschiedener Strassentypen in der Schweiz, Forschungsbericht UVEK/ASTRA Nr. 1017, Zürich, 2002
- [3] - , The AASHO Road Test, Special Report 61 A – G, Highway Research Board, Washington, D.C., 1961/1962
- [4] - , AASHTO Interim guide for design of pavement structures, AASHTO, Washington, D.C., 1972
- [5] I. Scazziga, Beobachtung des Verhaltens ausgewählter Strassenabschnitte, Forschungsbericht EDI/ASTRA Nr. 19, Zürich, 1981
- [6] I. Scazziga, Beobachtung des Verhaltens ausgewählter Strassenabschnitte, Forschungsbericht EVED/ASTRA Nr. 365, Zürich, 1996
- [7] O. Pini, I. Scazziga, Vergleich von Dimensionierungsmethoden, EDI/ASTRA Forschungsbericht Nr. 39, Zürich, 1981
- [8] H.P. Rossner, I. Scazziga, Verhalten des Strassenoberbaus unter wiederholter Belastung, Versuch Nr. 1 auf der ISETH-Rundlaufanlage, EDI/ASTRA Forschungsbericht Nr. 50, Zürich, 1982
- [9] A. Jacot, I. Scazziga, Langzeitverhalten und Dimensionierung von Zementstabilisierungen, Versuch Nr. 2 auf der Rundlaufanlage der ETHZ, EVED/ASTRA Forschungsbericht Nr. 113, Zürich, 1985.
- [10] I. Scazziga, C. Treboux, Verleich von Oberbauvarianten für die Kantons- und Gemeindestrassen, Versuch Nr. 3 auf der Rundlaufanlage der ETHZ, EVED/ASTRA Forschungsbericht Nr. 316, Zürich, 1994
- [11] M. Caprez, M. Horat, Heiss- und Kaltmischfundationsschichten aus recyciertem Ausbauasphalt, Überdeckung von Betonbelägen mit Dünnschichtbelägen, Versuch Nr. 4 auf der Rundlaufanlage der ETHZ, EVED/ASTRA Forschungsbericht Nr. 351, Zürich, 1996
- [12] M. Caprez, M. Horat, F.L. Yang, Rundlaufversuch Nr. 6, Zementstabilisierte Fundationsschichten aus Asphaltgranulat und Kiessand unter dünnen bituminösen Schichten, EVED/ASTRA Forschungsbericht Nr. 451, Zürich, 2000

- [13] A. G. Dumont, J.J. Hefti, M. Pigois, Superstructures routières dans des conditions climatiques extrêmes, EDI/ASTRA Forschungsbericht Nr. 77, Lausanne, 1983
- [14] A.G.Dumont, J.J. Hefti, M. Pigois, Comportement des superstructures avec couche de fondation en grave stabilisée au ciment, EVED/ASTRA Forschungsbericht Nr. 181, Lausanne, 1989
- [15] H. Lefebvre, M. Dysli, Effet du gel sur les superstructures routières avec fondation en matériaux concassées, EVED/ASTRA Forschungsbericht Nr. 165, Lausanne, 1988
- [16] - , Schweizerische Nationalstrassen, Info, Bundesamt für Strassen, Bern, 2001.
- [17] F. Ruckstuhl, Achslasterhebungen auf dem National- und Hauptstrassennetz, Strasse und Verkehr, 2/1974.
- [18] I. Scazziga, Erhebungen über die Beanspruchung der Strassen durch schwere Motorwagen, ISETH-Mitteilung Nr. 32, ETH Zürich, 1976.
- [19] - , Schweizerische Strassenverkehrszählung 2000, Bundesamt für Statistik und Bundesamt für Strassen, Neuchâtel, 2001 (und frühere Berichte der Jahre 1995, 1990, 1985, 1980, 1975, 1970, 1965).
- [20] H. Dudli, Praktische Anwendung der systematischen Zustandserfassung aus der Sicht des Bauherrn, Strasse und Verkehr, 1/1992 sowie unveröffentlichte Berichte Viaconsult AG Zürich für das Tiefbauamt des Kantons Graubünden.
- [21] H.P. Lindenmann, F. Schiffmann, T. Weber, J.J. Mäder, D. Bär, M. Fontana, Zustandserfassung und –Bewertung Nationalstrassen (Fahrbahnen) ZEB-NS (1999-2002), Schlussbericht, Bundesamt für Strassen, Bern, 2003.
- [22] - , Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmassnahmen an Strassenbefestigungen (RPE-Str 01), Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Köln, 2001.
- [23] M. Gothié, CETE Lyon, Präsentation bei Projektmeeting TROWS 2002 in Winterthur (unveröffentlicht).

## FP 2 / Literaturverzeichnis 2 / xx

### Fachliteratur

- WLF55 : William M.L., Landel R.F., Ferry J.D. **The Temperature Dependence of Relaxation in Amorphous Polymers and other Glassformig Liquids**. J. Amer. Chem. Soc. 77, p. 3701 (1955)
- DUR.M62 : Durriez, M. et Arrambide J.: **Nouveau traité de matériaux de construction**, Edition Dunod, Paris, 1962
- ARA.W83 : Arand, W.: **Verhalten von Asphalt bei tiefen Temperaturen**, Asphaltstrasse no. 3, p.101-105, (1983)
- SCH.K85: K. Schellenberg: **Die Rottweiler Hydropulsanlage**, Bitumen, S. 145, (1985)
- JUN.J87: Junker, J.P.: **Entwicklungen zur Bestimmung mechanischer Materialkennwerte an bituminösen Baustoffen, insbesondere an Asphalt**. Diss. ETH 8177 (1987)
- GUB.R90 : Gubler, R.: **Methode d'essai par oscillation axiale pour la détermination des caractéristiques mécaniques et du comportement à la fatigue des asphaltes**. Mechanical tests for bituminous mixes. Proceeding of the Fourth International RILEM Symposium pp 432-444, Budapest, (24-26 October 1990)
- REN.P90: Renken, P. **Compaction in the Laboratory and in practice**. Mechanical tests for bituminous mixes. Proceeding of the Fourth International RILEM Symposium pp 32-36, Budapest, (24-26 October 1990)
- JUN.J93: Junker, J.P., Fritz, H.W., Gubler, R., Partl, M.N.: **Bestimmung mechanischer Materialkennwerte an bituminösen Baustoffen**. Eidgenössisches Verkehrs und Energiewirtschaftsdepartement, Bundesamt für Strassenbau. Report Nr 270, Juli, (1993)
- PRO.A96: Pronk, A.C.: **Analytical description of the heat transfer in an asphalt beam – Tested in the 4 point dynamic bending apparatus**, DWW report W-DWW-96-006; Delft, (1996)
- YOU.K97: Younger, K.D., Partl, M.N., Fritz, H.W., Gubler, R.: **Asphalt Concrete Shear Testing with the Coaxial Shear Tester**. Proceedings of 5th Int. RILEM Symposium on Mechanical Tests for Bituminous Materials MTBM '97, Lyon, France, 14-16 May. pp 189-195, (1997)
- AND.D99 Andrei, D., Witczak, M., W., & Mirza, M. W. (1999). **Development of Revised Predictive Model for the Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures**. Development of the 2002 Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP 1-37A. Interim Team Technical Report. Department of Civil Engineering, University of Maryland of College Park, MD.
- BEN.H03: di Benedetto, H. et al. **Fatigue of Bituminous Mixtures: Different Approaches and Rilem Group Contribution**, Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials PTEM'03, Zürich, (2003)
- GUB.R04a: Gubler, R., Baida, L.G., Partl, M.N.: **A New Method to Determine the Influence of Water on Mechanical Properties**. International Journal of Road Materials and Pavement Design, Hermes Science Publications, Special Issue EATA 2004, pp 259-279, (2004)
- GUB.R04b: Gubler, R., Küntzel, S., Partl, M.N.: **Comparison of Rutting Behavior on Test Sections and Circular Test Track Using a Model Mobile Load Simulator**. 1<sup>st</sup> Int. Symp. on Design and Construction of Long Lasting Asphalt. ISAP, Auburn 7-9 Juni (2004)
- SOK.K05: Sokolov, K., Gubler, R., Partl, M.N.: **Extended Numerical Modeling and Application of the Coaxial Shear Test for Asphalt Pavements**, Materials & Structures, Nr. 279, pp 515-522, June (2005)

GUB.R05: Gubler, R., Partl, M.N, Canestrari, F, Grilli, A.: **Influence of Water and Temperature on Mechanical Properties of selected Asphalt Pavements**. Materials & Structures, Nr. 279, pp 515-522 June (2005)

## Teilprojekte U2000

FP1: Unterhalt 2000; Forschungspaket 1: **Verhaltensbilanz**

FP3: Unterhalt 2000; Paquet de recherche PR3: **Durabilité des enrobés**

FP4: Unterhalt 2000; Forschungspaket 4: **Dauerhafte Beläge**

FP7: Unterhalt 2000; Forschungspaket 7: **Vergleichsstrecke A1**

## Forschungsberichte ASTRA

ASTRA25/78: Forschungsauftrag 25/78 (256) **Untersuchung stark beanspruchter Autobahnbeläge**, Empa-Bericht Nr. 30586

ASTRA26/84: Forschungsauftrag 26/84 (164) **Einfluss des Mischprozesses**, IVT, EMPA, Autobahnamt Kt. Bern, SMI

ASTRA8/86: Forschungsauftrag 8/86 (193) **Untersuchungen zur Zertrümmerungsprüfung** Empa-Bericht Nr. 56'244

ASTRA10/86: Forschungsauftrag 10/86 (184) **Polierwiderstand von Mineralstoffen**, Empa-Bericht Nr. 54'400

ASTRA8/90: Forschungsauftrag 8/90 (342) **Polierverhalten von Mineralstoffen**, Empa-Bericht 127916

ASTRA10/94 Forschungsauftrag 10/94 (424) **Influence de la forme des granulats sur les caractéristiques d'un beton bitumineux, 2. partie**, LAVOC et Bureau d'ingénieurs ERTEC SA, Le Mont-sur-Lausanne

ASTRA8/98: Forschungsauftrag 8/98 (1138) **Einfluss von Fillern auf die Alterung von Bindemitteln**, Empa-Bericht Nr. 201145.

GUB.R : R. Gubler et al : **Einfluss des Umhüllungsgrades der Mineralstoffe auf die mechanischen Eigenschaften von Mischgut. Grundlagen für eine Anforderungsnorm**, FA 20/99, Forschung im Gange.

ROE.F : Röthlisberger, F. et al: **Base pour une actualisation des normes suisse SN 670'135 (filler pour enrobés bitumineux) en SN 670'850 (teneur en minéraux argileux)**, FA 1999/276, Forschung im Gange.

## Schweizer Normen

SN640431a: Asphaltbetonbeläge, Konzeption, Anforderungen, Ausführung (nicht mehr in Kraft)

SN640431-1aNA: Asphaltmischgut – Asphaltbeton; Mischgutanforderungen

- SN670130: Sand, Kies, Splitt und Schotter für Beläge – Qualitätsanforderungen 1998
- SN670835: Mineralische Baustoffe; Los Angeles-Versuch
- SN671961: Bituminöses Mischgut; Bestimmung des Schichtenverbundes (nach Leutner) (2000)
- SN671965: Bituminöses Mischgut; Dichte (nicht mehr in Kraft)
- SN671967a: Bituminöses Mischgut; Rohdichte; Berechnen des Hohlraumgehaltes (nicht mehr in Kraft)

## Europäische Normen

- EN933: Prüfverfahren für Bestimmung der geometrischen Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung (1997)
- EN1426: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Nadelpenetration (1999)
- EN1427: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring und Kugel-Verfahren (1999)
- EN12607-1: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft – Teil 1: RTFOT-Verfahren (1999)
- EN12607-2: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft – Teil 2: TFOT-Verfahren (1999)
- EN12697-5: Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 5: Bestimmung der Rohdichte (2002)
- EN12697-6: Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 6: Bestimmung der Raumdichte von Asphaltprobe-Körpern (2003)
- EN12697-12: Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 12: Bestimmung der Wasserempfindlichkeit von Asphaltprobe-Körpern (2003)
- EN12697-22: Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 22: Spurbildungstest (2003)
- EN12697-23: Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 23: Bestimmung der indirekten Zugfestigkeit von Asphaltprüfkörpern (2003)
- EN12697-24: Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung (2004)
- EN12697-26: Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 26: Steifigkeit (2004)
- EN12697-30: Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 30: Probenvorbereitung, Marshallverdichtungsgerät (2004)
- EN12697-31: Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 31: Herstellung von Probekörpern - Gyratorverdichter (2004)
- EN12697-33: Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 33: Probestückvorbereitung mit einem Walzenverdichtungsgerät (2004)
- EN13108-1: Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen – Teil 1: Asphaltbeton

## Andere Normen

- BBR: TP1-98 Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using Bending Beam, Rheometer (BBR), AASHTO, Provisional Standards, April 2000
- DSR TP5-98 Test Method for Determining Rheological Properties of Asphalt Binders Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), AASHTO, Provisional Standards, April 2000

PAV PP1-98 Standard Practise for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV), AASHTO, Provisional Standards, April 2000

STOA PP2-00 Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA), AASHTO, Provisional Standards, April 2000

BS812: Methods for smpling and testing of mineral aggregates, sands and fillers

TPAST99: Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Strassenbau TP A-StB, Einaxialer Druckschwellversuch – Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalten bei Wärme, Ausgabe 1999

## FP 3-1 / Bibliographie 3-1 / xx

- [1] AASTHO (1986). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. Washington D. C., 1986.
- [4] Balay, J.-M. (1998). AlizéWin. Logiciel de calcul. Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC), Nantes (F).
- [5] Bensalem, A., Brown, A. J., Nunn, M. E. and Merrill, D. (2000). Finite element modeling of fully flexible pavements; surface cracking and wheel interaction. 2nd International Symposium on 3D Finite Element for Pavement Analysis, Design and Research, Charleston, pp.103-122.
- [6] Blab, R. (1999). Introducing Improved Loading Assumptions into Analytical Pavement Models Based on Measured Contact Stresses of Tires. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Reno NV.
- [7] Blab, R. and Tarvey, J. T. (2000). Modeling measured 3D tire contact stresses in a viscoelastic FE pavement model. 2nd International Symposium on 3D Finite Element for Pavement Analysis, Design and Research, Charleston, pp.123-148.
- [8] Brown, S. F. (1973). Determination of Young's Modulus for Bituminous Materials in Pavement Design in Highway Research Record 431(Highway Research Board): pp. 38-49.
- [9] Cebon, D. (1999). Handbook of Vehicle-Road Interaction. Lisse, Ed. Swets & Zeitlinger.
- [10] COST\_323 (1998). Pesage en marche des véhicules routiers: 2ème conférence européenne Lisbonne - Actes finaux. Luxembourg, European Commission, 1998.
- [11] COST\_333 (1999). Final report of Cost Action 333: Development of New Bituminous Pavement Design Method. Luxembourg, European Commission, 1999.
- [12] De Beer, M., Fisher, C. and Jooste, F. (1997). Determination of pneumatic tyre/pavement contact stresses under moving loads and some effects on pavements with thin asphalt surfacing layers. 8th International Conference on Asphalt Pavements, Washington, pp. 179-227.
- [13] Dumont, A.-G. et Scazziga, I. (1985). Mesures de déformations dans des couches hydrocarbonées. Berne, Office fédéral des routes (OFROU), Rapport n° 104, 1985.
- [14] Eckmann, B. (1997). New Tools for Rational Pavement Design. 8th International Conference on Asphalt Pavements, Washington, pp. 25-42.
- [15] Eisenmann, J. (1975). Dynamic wheel load fluctuations - road stress in Strasse und Autobahn 4.
- [16] Ekdahl, P. (1998). Analysis of the stresses and strains collected in COST 333 (Swiss contribution) through a short term scientific mission, LAVOC - EPFL, Rapport, octobre 1998.
- [17] Francken, L. (1979). Fatigue d'un enrobé bitumineux soumis à des conditions de sollicitations réalistes in La technique routière.

- [18] Francken, L. (1997). PRADO. Logiciel de calcul. Centre de recherches routières (CRR), Bruxelles (B).
- [19] Groenendijk, J. (1998). Accelerated testing and surface cracking of asphaltic concrete pavements. Thèse de doctorat, Faculty of Civil Engineering, Technical University of Delft, Delft (NL).
- [20] Groenendijk, J. (1999). Relative Pavement Wear Ratios of Wide Base Single and Dual Truck Tyres: a Literature Survey. Delft (NL), Dienst Weg- en Waterbouwkunde (DWW), Rapport, août 1999.
- [21] Huang, Y. H. (1993). Pavement Analysis and Design. Englewoodcliffs, Ed. Prentice Hall.
- [22] Huhtala, M., Pihlajmäki, J. and Halonen, P. (1997). Pavements Response due to Dynamic Axle Loads. 8th International Conference on Asphalt Pavements, Washington, pp. 471-485.
- [23] Kim, H. B. and Buch, N. (2003). Reliability-Based Pavement Design Model accounting for Inherent Variability of Design Parameters. 82nd Transport Research Board Annual Meeting, Washington D. C.
- [24] Mante, B. R., Molenaar, A. A. A. and Groenendijk, J. (1995). Stresses and Strains in Pavements. Delft (NL), Technical University of Delft, Rapport n° 7-95-209-32M, mars 1995.
- [25] Morgenthaler, S. (1997). Introduction à la statistique. Méthodes mathématiques pour l'ingénieur. Lausanne, Ed. Presses polytechniques et universitaires romandes (PPUR).
- [26] NF\_P98-260-2 Essais relatifs aux chaussées - Mesure des caractéristiques rhéologiques des mélanges hydrocarbonés - Partie 2 : détermination du module complexe par flexion sinusoïdale. Norme française, AFNOR, 1992.
- [27] OCDE (1983). Effets des véhicules lourds de marchandises. Paris, Ed. OCDE, Rapport, décembre 1982.
- [28] OCDE (1985). Essais en vraie grandeur des superstructures routières. Paris, Ed. OCDE, Rapport, 1985.
- [29] OCDE (1991). Essai OCDE en vraie grandeur des superstructures routières. Paris, Ed. OCDE, Rapport, 1991.
- [30] Partanen, L. and Panu, S. (2001). Tyre Pressure on Trucks. Helsinki, Finnra, 27, 2001.
- [31] Perret, J. (2002). The Effect of Loading Conditions on Pavement Responses calculated using a Linear-Elastic model. 3rd International Symposium on 3D Finite Element for Pavement Analysis, Design and Research, Amsterdam, pp. 283-303.
- [32] Perret, J., Dumont, A.-G., Turtschy, J.-C. et Ould-Henia, M. (2001). Evaluation des performances de nouveaux matériaux de revêtement: 1ère partie: Enrobés à haut module, OFROU (Office fédéral des routes), 1000, décembre 2001.
- [33] Perret, J. (2003). Déformations des couches bitumineuses au passage d'une charge de trafic. Thèse de doctorat n°2786, Département de génie civil, EPFL, Lausanne.
- [34] Scarpas, A. (1998). CAPA 3D User's manual, parts I, II and III. Programme d'éléments finis. Faculty of Civil Engineering, Technical University of Delft, Delft (NL).

- [35] Schimmerling, P., Sisson, J.-C. and Zaïdi, A. (1998). *Pratique des plans d'expériences*. Paris, Lavoisier TEC&DOC.
- [36] SETRA-LCPC (1994). *Conception et dimensionnement des structures de chaussée - Guide technique*, Laboratoire central des ponts et chaussées - Service d'études techniques des routes et autoroutes, Ministère de l'équipement, des transports et du tourisme (F).
- [37] SN 640320 Dimensionnement - Trafic pondéral équivalent. Norme suisse, VSS, 2000.
- [38] SN 640324 Dimensionnement - Superstructure des routes. Norme suisse, VSS, 1997.
- [39] SN 640431 Revêtements en béton bitumineux - conception, exigences, exécution. Norme suisse, VSS, 1997.
- [40] SN 640435 Couches de roulement en enrobé macro rugueux - conception, exécution. Norme suisse, VSS, 1994.
- [41] SN 670120 Graves pour couches de fondation - Exigences de qualité. Norme suisse, VSS, 1999.
- [42] SN 670316 Sols, essais - pénétromètre CBR, essai in situ. Norme suisse, VSS, 1994.
- [43] SN 670317 Sols, essais - essai de plaque ME et Ev. Norme suisse, VSS, 1998.
- [44] SN 670319 Sols, essais - essai de plaque selon Westergaard. Norme suisse, VSS, 1992.
- [45] SN 670320 Sols, essais - essais CBR en laboratoire. Norme suisse, VSS, 1994.
- [46] Sweere, G. T. H. (1990). *Unbound granular bases for roads*. Thèse de doctorat, Faculty of Civil Engineering, Technical University of Delft, Delft.
- [47] Turtshy, J.-C. and Perret, J. (1999). *Swiss Contribution to COST 333 - Full-Scale Accelerated Loading Test (ALT) at the Halle-Fosse*, LAVOC-EPFL, Rapport, avril 1999.
- [48] Van Cauwelaert, F. (1995). *Stresses and displacements in multi-layered orthotropic systems - Theoretical background to the stress/strain calculation program used within the NOAH software*.
- [49] Viagroup (1998). *Mesures de modules et contraintes sur Champs 2, 3, 5 et 6, Bilan structurel avec le FWD*, LAVOC - EPFL, Rapport, février 1998.
- [50] Yap, P. (1989). *Truck Tire Types and Road Contact Pressures*. Second International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, Kelowna.

- [1] Angst C., "Oberbuchsitzen 20 Jahre Splittmastixasphalt in der Schweiz", Revue Routes et Trafic 1/2001
- [2] Arand W., "Behaviour of asphalt aggregate mixes at low temperatures", Proc. 4<sup>th</sup> International RILEM symposium on "Mechanical Tests for Bituminous Mixes Characterisation, Design and Quality Control", p. 68-84, Budapest 1990
- [3] Arand W., "Comportement des asphaltes à basses températures, développement et mise à l'épreuve d'une méthode d'essai", revue Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, n°407, 1984
- [4] Aschenbrener T., "L'ornièreur LCPC testé sur les chaussées du Colorado" Revue Générale des Routes et des Aérodrômes, n°729, mai 1995
- [5] Asphalt Institute, "Superpave Mix Design", Superpave Series No.2 (SP-02). Asphalt Institute, Lexington, KY, 2001.
- [6] Asphalt Institute, "Mix Design Methods", Manual Series No.2 (MS-02). Asphalt Institute, Lexington, KY, 1997.
- [7] Biczysko S.J., "Asphalt performance at low temperature", The journal of the Institution of Highways and Transportation and IHIE, N° 3 vol. 37 p.20-25, 1990
- [8] Bonaquist R.F., Christensen D.W., Stump W., "Simple performance tester for superpave mix design: first article development and evaluation", NCHRP report 513, Washington D.C., 2003
- [9] Bonnot J., "Généralité sur essais mécaniques pratiques de formulation et de contrôles des enrobés bitumineux", Symposium International RILEM, p. 133-170, Belgrade 1983
- [10] Brosseau Y., Hiernaux R., "Caractéristiques et méthodes d'essais fonctionnelles-étude des déformations permanentes des enrobés à chaud avec l'ornièreur LPC, fiabilité, sélectivité, pertinence de l'essai", Eurobitume Congress Strassbourg 1996
- [11] Brown Stephen F., Gibb M., Read John M., Scholtz Todd V., "Laboratory protocols for the design and evaluation of bituminous mixtures", Eurobitume Congress Strassbourg 1996
- [12] Centre de Recherches Routières, "Code de bonne pratique pour la formulation des enrobés bitumineux denses", Recommandations C.R.R. – R 61/87
- [13] Centre de Recherches Routières, "Code de bonne pratique pour la formulation des enrobés bitumineux denses", Recommandations C.R.R. – R 69/97
- [14] De La Roche C., "Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux – expérimentation et nouvelles perspectives d'analyse", thèse de docteur ingénieur, Ecole Centrale Paris, 1996
- [15] De La Roche C., Corté J.-F., Gramsammer J.-C., Odéon H., Tiret L., Carof G., "Etude de fatigue des enrobés bitumineux à l'aide du manège de fatigue", Revue Générale des Routes et des Aérodrômes, p 62 à 75, n°716 mars 1994
- [16] Di Benedetto H., "Nouvelle approche du comportement des enrobés bitumineux: résultats expérimentaux et formulation rhéologique", proceeding of the 4<sup>th</sup> International RILEM Symposium MTBM, Budapest, octobre 1990
- [17] Di Benedetto H., Soltani Ashayer A., "Fatigue Damage for bituminous", proceeding of the 5<sup>th</sup> international RILEM symposium BTBM, p. 263-270, Lyon, 1997
- [18] Di Benedetto H., De la Roche C., Francken L., & the RILEM 152PBM Technical Committee, "Fatigue of bituminous mixtures: Different approaches and RILEM interlaboratory tests", proceeding of the 5<sup>th</sup> international RILEM symposium BTBM, p. 15-28, Lyon, 1997
- [19] Dumont A.-G., "Réalisation des infrastructures de transport", Laboratoire des Voies de Circulation (LAVOC), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Suisse, édition mars 2000
- [20] Dumont A.-G., Turtzschy J.-C., Beauverd J., Buehler T., "Influence de la forme des granulats sur les caractéristiques d'un béton bitumineux, 2<sup>ème</sup> partie", Rapport OFROU 11/1998
- [21] Dumont A.-G., Turtzschy J.-C., Smond E., "Caractéristiques d'une formulation de référence pour les enrobés bitumineux", Rapport OFROU n°396. Février 1998

- [22] European Standards Working Group CEN TC 227/WG1, "Bituminous mixtures", Task Group TG2 "Test methods"
- [23] European Standards prEN 12697-24, "Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt", part.24 : Resistance to fatigue, september 2000
- [24] Francken L., "Module complexe des enrobés bitumineux", Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, Numéro Spécial V, pp. 181-198, décembre 1977.
- [25] Francken L., Partl M. & the RILEM 152PBM Technical Committee, "RILEM interlaboratory tests on stiffness properties of bituminous mixtures ", proceeding of the 5th international RILEM symposium BTBM, p. 9-14, Lyon, 1997
- [26] Francken L, Vanelstraete A., "PRADO: formulation des enrobés bitumineux", Centre de Recherches Routières, janvier 1997.
- [27] Jones G.M., Darter M.I., Littlefield G., "Thermal expansion-contraction of asphaltic concrete", Proceeding Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), volumen 37 p. 56-100, Atlanta Georgia, 1968
- [28] Hicks Gary R., Leahy R., Monismith Carl L, "*Asphalt update*", Civil Engineering Revue, Etats-Unis, April 1996
- [29] Junker, J.P., "Entwicklungen zur Bestimmung mechanischer Materialkennwerte an bituminösen Baustoffen, insbesondere an Asphalt, Thèse de doctorat, ETHZ - EMPA, 1987
- [30] Isacson U., Vinson T.S, Zeng H., "The influence of material factors on low temperature cracking of asphalt", Mechanical Test for Bituminous Mixes (MTBM), proceeding of the 5th. International RILEM Symposium, Lyon, mai 1997
- [31] Kallas B.F., "Low temperature mechanical properties of asphalt concrete", Asphalt Institute Research Report N° 82-3, College Park, Maryland, 1982
- [32] Mandat VSS 12/98, "Elaboration d'une méthode prédictive de l'orniérage des revêtements bitumineux au moyen de l'orniéreur LCPC", recherche en cours
- [33] Mengis M., "Contribution à l'interprétation des essais de fatigue par une approche thermo-mécanique ", DEA ENTPE, 1997
- [34] Molenaar, J.M.M., Verburg H.A., Westera G.E., "Characterisation of permanent deformation behaviour of asphalt mixtures", Proceedings of the Conference Strategic Highway Research (SHRP) and Traffic Safety on Two Continents", Prague, september 1995
- [35] Monismith Carl L & al., "Temperature induced stresses and deformations in asphalt concrete", Proceeding of the Association of Asphalt Paving Technologist (AAPT), vol. 34, 1965
- [36] Neifar M., "Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux: expérimentation et modélisation", thèse de doctorat, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (France), septembre 1997
- [37] Norme Suisse VSS SN 640 925a, "Relevé et évaluation de l'état des routes", avril 1997
- [38] Nunn M.E., Lawrence, D., Brown A., "Development of a practical test to assess the deformation resistance of asphalt", 2<sup>nd</sup> Eurobitume Congress Barcelona 2000
- [39] Perret J., Dumont A.-G., Turtshy J.-C., Ould-Henia M., "Evaluation des performances de nouveaux revêtement : 1<sup>ère</sup> partie : enrobés à haut module », Rapport OFROU n° 1000. décembre 2001.
- [40] Pucci T., "Approche prévisionnelle de la fissuration par sollicitation thermique des revêtements bitumineux", thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, octobre 2001
- [41] Proceedings of the Workshop, "Performance related test procedures for bituminous mixtures", Dublin 6-7 november 1997
- [42] SETRA-LCPC, "Catalogue des dégradations de chaussées"
- [43] SETRA-LCPC, Conception et Dimensionnement des Structures de Chaussées – Guide technique, décembre 1994
- [44] Soltani Ashayer A., "Comportement en fatigue des enrobés bitumineux", thèse de doctorat ENTPE-INSA, 1998

- [45] Technical Committee TC 152-PBM, "Performance of Bituminous Mixes", Working Group 3 "Mechanical Tests on Bituminous Mixes", A New Approach to Better Roads, Draft Report March 1994
- [46] Turtschy J-C., Odéon H., del Val M., "*Climatic effects*", COST 333 – WG4 final report, july 1997
- [47] Valkering C.P., Lançon D.J.L., Hilster E.de, Stocker D.A., "Rutting resistance of asphalt mixes containing non-conventional and polymer modified binders", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, p.590-609, 1990
- [48] Vinson Ted S, Janoo V.C., Haas Ralph C.G., "Low temperature and thermal fatigue cracking", Summary Report SR-OSU-A-003A-89-1, Strategic Highway Research Program contract A-033A, 1989
- [49] Vinson Ted S, Kanerva H.K., Zeng H, "Low temperature cracking: field validation of the Thermal Stress Restrained Specimen Test (TSRST)", Strategic Highway Research Program SHRP-A-401 contract A-033A, Washington DC 1994
- [50] Vinson Ted S, Zubeck H., "Prediction of low temperature cracking of asphalt concrete mixtures with thermal stress restrained specimen test", Transportation Research Board, 75th annual meeting, january 7-11, 1996, Washington D.C.
- [51] Vinson Ted S, Jackson Mike N., "Analysis of thermal fatigue distress of asphalt concrete pavements", Transportation Research Board, 75th annual meeting, january 7-11, 1996, Washington D.C.
- [52] Vonk W., Korenstra J., Jongeneel D. et Udrón J. "Amélioration des performances des enrobés par emploi de liants bitumineux modifiés aux SBS", Revue Générale des Routes et des Aéroports, n°733, oct 1995
- [53] WestTrack Forensic Team Consensus Report, "Superpave mixture design guide", Washington D.C., février 2001.
- [54] Younger K.D., Partl M.N., Fritz H.W., Gubler R., "Asphalt concrete shear testing with testing with the co-axial shear tester at EMPA", proceeding of the 5th international RILEM symposium BTBM, p. 189-195, Lyon, 1997
- [55] Zeng H. & al., "On low temperature cracking of asphalt pavements", thesis report, Departement of Infrastructure and Planning, Division of Highway Engineering Royal Institute of Technology, Stockholm, 1995

Rabaiotti C., Caprez M. (2006) "Mechanical response of asphalt-pavements under static and moving wheel-load" GeoCongress Atlanta 2006, invited presentation

Rossner H.P., et al. „Verhalten des Strassenoberbaus unter wiederholter Belastung“

(Rundlaufversuch Nr. 1), Schlussbericht zu Forschungsauftrag 13/77 und 34/80, Forschungsberichte des Eidg. Departementes des Innern, Nr. 50; Bern, März 1982

Jacot A. „Langzeitverhalten und Dimensionierung von Zementstabilisierungen“ (Rundlaufversuch Nr. 2), Schlussbericht zu Forschungsauftrag 8/83, Forschungsberichte des Eidg. Departementes des Innern, Nr. 113, Bern, Februar 1985

Scazziga I., et al., „Vergleich von Oberbauvarianten für Kantons- und Gemeindestrassen“ (Rundlaufversuch Nr. 3), Schlussbericht zu Forschungsauftrag 35/80 und 17/85, Bundesamt für Strassenbau, Bern, Nr. 316, August 1994

Horat M., et al., „Untersuchung des Verhaltens von Recycling- und teilweise gebrochenen Materialien für die fundationsschicht“ (Rundlaufversuch nr. 4) Schlussbericht zu Forschungsauftrag 7/85, Bundesamt für Strassenbau, Bern, Nr. 311, März 1994

Beligni M., et al., „Heiss- und Kaltmischfundationsschichten aus recyciertem Ausbauphosphat“ (Rundlaufversuch Nr. 5), Schlussbericht zu Forschungsauftrag 14/91, Bundesamt für Strassenbau, Bern, Nr. 351, August 1995

Oekzul O., et al., „Zementstabilisierte Fundationsschichten aus Asphaltgranulat und Kiessand unter dünnen bituminösen Deckschichten“ (Rundlaufversuch Nr. 6), Schlussbericht zu Forschungsauftrag 08/95, Bundesamt für Strassenbau, Bern, Nr. 451, Mai 1999

Several Authors: "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993" American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

ABAQUS "Theory and Users Manual" Version 6.4, Hibbit, Karlsson & Sorenson, Inc., Pawtucket, Rhode Island., 2003 Design

Marquardt D.W. "An algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters" Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, Volume 11, Issue 2 (Jun., 1963), 431-441.

SN 640 324a : Dimensionierung Strassenoberbau, VSS Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute"

Romanoschi S.A. and Metcalf J.B. (2003), "Errors in Pavement Layer Backcalculation due to Improper Modeling of the Layer Interface Condition" 82 Annual Meeting of the Transportation Research Board

Uzan J. (2004), "Linear and Nonlinear Backcalculation for Site 1 in Hanover" 83<sup>rd</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board

Madsen K., Nielsen H.B., Tingleff O., "Methods for Non-linear Least Squares Problems" Technical University of Denmark, 2004. Lectures notes

Hiptmair R., Jeltsch R., "Numerische Mathematik" Skript der Vorlesung an der ETHZ WS 05/06

**QUELLENVERZEICHNIS**

- [1 ] BÜHLMANN, F.; Beurteilung der Griffigkeit auf Fahrbahnen, Forschungsauftrag 20/76 des EDI, IS ETH-Mitteilung Nr. 53, 1983
- [2] VEREINIGUNG SCHWEIZ. STRASSENFACHLEUTE (VSS); SN 640 510b, Griffigkeit, Messverfahren, Februar 1985
- [3] VEREINIGUNG SCHWEIZ. STRASSENFACHLEUTE (VSS); SN 640 511 b, Griffigkeit, Bewertung, Februar 1984
- [4] PELLOLI, R.; Griffigkeitsmessungen mit dem Skiddometer - Weitere Ergebnisse, IS ETH-Mitteilung Nr. 41, 1979
- [5] LINDENMANN, HP.; BÜHLMANN, F., SPACEK, P.; Grundlagen zur Norm Sichtweiten SN 640 093a, Forschungsauftrag
- [6] FORSCHUNG STRASSEN BAU UND STRASSENVERKEHRSTECHNIK; Griffigkeitsschwankungen von Fahrbahndecken, BMV, Heft 720, 1996
- [7] FORSCHUNG STRASSENBAU UND STRASSENVERKEHRSTECHNIK; Vergleichsmessungen zwischen SRM und SCRIM, BMV, Heft 582, 1990
- [8] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR DAS STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN, Arbeitsausschuss 4.3, Richtlinie zur Bewertung der Strassengriffigkeit bei Nässe, Nov. 1998 (Entwurf)
- [9] LINDENMANN, HP.; ZUSTANDSERFASSUNG- UND BEWERTUNG DER FAHRBAHNEN DER NATIONALSTRASSEN (ZEB-NS), Konzeptstudie, ASTRA / IVT, März 1999
- [10] WAMBOLD J. C., et al International PIARC Experiment to compare and harmonize Texture and Skid Resistance measurements; PIARC Publication No. 10.04 T, Paris, 1995

- [1] Dumont A.-G, Schwery, B, Angst, Ch. Vergleichsstrecken mit polymermodifizierten Bindemitteln und Zusätze, Nr. 1035/ September 2002
- [2] Gubler, R. Unterhalt 2000; Forschungspaket FP2; Dauerhafte Komponenten
- [3] Perret J., Dumont A.-G Unterhalt 2000; Projet 3; Durabilité des enrobés; partie 1 charges d'essieu
- [4] Junot A., Dumon A.-G Unterhalt 2000; Projet 3; Durabilité des enrobés; partie 2 formulation A.-G
- [5] Caprez M. Unterhalt 2000; Forschungspaket 4: Dauerhafte Beläge;
- [6] Rossner H.P Verhalten des Strassenoberbaus unter wiederholter Belastung (Rundlaufversuch Scazziga I. Nr. 1); Schlussbericht der Forschungsaufträge 13/77 und 34/80; Forschungsberichte des EDI Nr. 50, Bern, März 1982
- [7] SN 640 520a Ebenheit, Prüfung der Geometrie; Zürich, März 1977
- [8] FGSV Technische Prüfvorschrift zum Verhalten von Asphalten bei tiefen Temperatur; Ausgabe 1994
- [9] Angst Ch. Der Bending-Beam-Rheometer, März 1995
- [10] Ablauftest Arbeitsanleitung zur Prüfung von Asphalt ALP A-StB; Teil 2 Prüfung des Bindemittelablauftestes; FGSV; Köln Juli 1999
- [11] Hugo, F. Executive Summary report on the Production of the Prototype Texas Mobile Load Simulator; Resarch Report 1978-2F, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, Texas, March 1996
- [12] Rund O.E. Evaluation of Rolling Density Meter (DOR); Asphalt Industrien Laboratorium, Høvik 1993
- [13] EN12697-22 Asphalt-Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 22: Spurbildungstest; Dezember 2003
- [14] TP A-StB Einaxialer Druckschwellversuch – Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalten bei Wärme
- [15] EN 12697-24 Asphalt-Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung; Juli 2004

- [16] EN12697-25 Asphalt-Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 25: Druckschwellversuch; April 2005
- [17] Graf B. Les enrobés à module élevé (EME) : quelques expériences romandes ; Strasse + Verkehr 10/2002
- [18] SHRP SHRP (Strategic Highway Research Program); Superpave Level 1 Mix Design; Superpave Series No. 2 (SP-2)
- [19] SN 640 431-1aNA Asphaltmischgut-Asphaltbeton, Mischgutanforderungen; prEN 13108-1: Januar 2002; Zürich 2004
- [20] SN 640 431-5 NA Asphalt-Splittmastixasphalt, Mischgutanforderungen; prEN 13108-5: Januar 2000; Zürich 2004
- [21] IMP Handbuch Bituminöser Strassenbau und Abdichtungen; Ausgabe 2005
- [22] Angst, Ch. Das SHRP-Programm, s+v, Juli 1991
- [23] EN 12697-26 Asphalt-Prüfverfahren für Heissasphalt -Teil 26: Steifigkeit; Juli 2004
- [24] Junker, J. P. Entwicklungen zur Bestimmung mechanischer Materialkennwerte an bituminösen Baustoffen, insbesondere an Asphalt, 1987/ DISS:ETHZ
- [25] Angst, Ch. Klimatische Grundlagen der Schweiz für SHRP-Bitumenklassifikation, Nr. 473 / August 2000
- [26] Schellenberg, K. Ansprache des Fliessverhaltens von Bitumen und polymermodifizierte Bitumen bei tiefen Temperaturen, Kältezugviskosität; FGSV – Heft 695, Bundesministerium für Verkehr 1995
- [27] EN 12697-12 Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt-Teil 12: Bestimmung der Wasserempfindlichkeit von Asphaltprobekörpern; Dezember 2003
- [28] Angst, Ch. „Die Beurteilung des Verformungswiderstandes bituminöser Schichten mittel Druckschwell-Versuch“, Strassen & Verkehr, 10/06
- [29] Anderegg, P., Brönnimann, R., Raab, C., Partl, M. Long-term health monitoring of pavement deformations on an expressway. Int. Measurement Conference IMEKO, Sept. 23-27, Celle, Germany, 2002