



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



Institut für Geotechnik

**Kalibrieren, Vergleichen und Harmonisieren der  
Griffigkeitsmessungen und der Oberflächenrauigkeits-  
messungen mit internationalen Institutionen (AIPCR-Ring-  
versuch 1992)**

**Calibrage, comparaison et harmonisation des mesures  
d'adhérence et de la texture des couches de roulement  
avec les institutions internationales**

**Correlation Comparison and Harmonization of skid  
resistance measurements**

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Institut für Geotechnik, IGT

Martin Horat, dipl. Ing. ETH (vormals ETHZ, IVT)  
Dr. Markus Caprez, dipl. Ing. ETH

Forschungsauftrag VSS 1992/005 (14/92) auf Antrag der Fachkommission 5  
der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS)

Zürich, Januar 2006



## Inhalt

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich .....	1
Inhalt.....	3
Zusammenfassung.....	7
Résumé .....	8
Summary .....	9
Sommario .....	10
1 Einleitung.....	11
1.1 Auftrag und Ziel .....	11
Figure 1: Stuttgarter Reibungsmesser des IVT an der ETH Zürich.....	12
1.2 Aufbau des Berichtes .....	12
2 Ausführliche Zusammenfassung .....	13
2.1 Griffigkeit .....	15
2.2 Textur.....	15
2.3 Wiederholbarkeit der Messungen .....	16
2.4 Werte harmonisieren .....	17
S = Schlupfgeschwindigkeit in km/h.....	17
3 Einführung .....	21
3.1 Reibungsmesser.....	21
3.1.1 Messgeräte mit blockiertem Messrad .....	21
3.1.2 Messung der Seitenkraft .....	22
3.1.3 Geräte mit konstantem Schlupf.....	22
3.1.4 Geräte mit variablem Schlupf.....	22
3.2 Texturmessgeräte.....	23
3.2.1 Textur Profilometer .....	23
3.2.2 Volumetrische Methode.....	23
3.2.3 Ausflussmesser .....	23
3.3 Die Notwendigkeit der Harmonisierung.....	23
3.4 Ziele .....	24
3.5 Nutzen des Experiments .....	24
4 PIARC-Ringversuch, Ablauf und Durchführung .....	26
4.1 Messstrecken .....	26
4.1.1 Kriterien für die Streckenwahl .....	26
4.1.2 Effektiv benutzte Strecken.....	27
28 in Belgien.....	27
4.2 Teilnehmende Geräte.....	29
4.3 Ablauf der Messungen .....	32
Figure 2: Schematische Skizze der Teststrecken .....	33
4.4 Versuchsprogramm .....	33

4.5	Ablauf der Versuche .....	34
4.6	Wiederholungsmessungen.....	34
4.7	Datenreport.....	34
5	Statistiken, Variationen und Wiederholbarkeit.....	35
5.1	Statistische Methoden .....	35
5.1.1	Formulierung der Ziele .....	35
5.1.2	Wiederholbarkeit der Messungen .....	35
5.1.3	Beziehung zwischen den Messwerten verschiedener Geräte .....	36
5.2	Variationen zwischen den Sektionen einer Strecke .....	38
5.3	Änderungen an den Streckeneigenschaften während oder aufgrund der Messungen .....	39
5.4	Variation zwischen zwei Durchgängen .....	41
5.5	Wiederholbarkeit.....	49
5.5.1	Standardabweichung der Geräte gegenüber Geschwindigkeit .....	49
5.5.2	Standardabweichung der Geräte gegenüber Reibungsklassen .....	52
5.6	Gültigkeit der Daten und Auswahl stichhaltiger Datensätze .....	56
6	Texturmessungen.....	57
6.1	Definitionen.....	57
Figure 3: Skizze der Texturbereiche gemäss ISO/CD 13473 .....		57
6.2	Texturmessmethoden und beim Experiment benutzte Geräte .....	60
6.2.1	Teilnehmende Geräte.....	60
6.2.2	Angegebene Messungen .....	63
Erläuterung: Faktoren gemäss der Gleichung.....		65
6.3	Anmerkungen zu den Strecken .....	65
6.4	Gemessene Texturdaten.....	66
6.4.1	Grunddaten für Mikro-, Makro- und Megatextur.....	66
6.4.2	Zufallsfehler .....	66
6.4.3	Texturspektren .....	67
6.5	Existierende oder geplante internationale Standardisierung .....	68
6.6	Korrelation zwischen der volumetrischen Messung der mittleren Texturtiefe (MTD) und anderen Texturmessungen .....	68
6.6.1	Korrelation mit MTD .....	68
6.6.2	Sensitivität gegenüber Megatextur und Unebenheit.....	71
6.6.3	Schlussfolgerungen.....	72
6.7	Korrelation zwischen Texturmessungen für alle Messungen und Geräte .....	73
Figure 4: Abhängigkeiten zwischen den Geräten.....		76
6.8	Zwischenkorrelationen in der Textur.....	77
6.9	Optimale Texturwellenlängen für eine Schätzung der mittleren Texturtiefe (MTD).....	78
6.9.1	Einführung .....	78
6.9.2	Korrelation zwischen (linearem) MTD und (logarithmischen) spektralen Terzbändern.....	78
6.9.3	Korrelation zwischen Log-konvertiertem MTD und (logarithmischen) spektralen Terzbändern.....	78

6.9.4	Beziehung zwischen MTD und Spektralpegeln für Lin-Log und Log-Log-Skalen .....	79
6.9.5	Korrelation zwischen Log-konvertiertem MTD und (logarithmischen) spektralen Breitbandpegeln .....	79
6.10	Ausflussmesser .....	80
7	Analyse der Reibungsmessungen.....	84
7.1	Gerätevergleich innerhalb der Gruppen.....	84
7.1.1	Vergleich der SCRIM-Geräte .....	84
	Für alle Wertepaare wurde die lineare Regression gemäss .....	85
7.1.2	Vergleich von ähnlichen Messausrüstungen .....	88
7.2	Vergleich der verschiedenen Gruppen.....	92
7.3	Vergleich von Geräten mit Messung der Reibungsspitze mit Texturmessungen .....	96
7.4	Zusammenfassung .....	100
7.5	Variabler Schlupf .....	102
8	Modelle zur Voraussage der Griffigkeit .....	103
8.1	Verhältnis Reibung-Schlupf und Geschwindigkeit .....	103
	F(S) ist die Reibung bei der Schlupfgeschwindigkeit S.....	103
8.2	Herleitung der Goldenen Werte.....	105
8.3	Das PIARC Modell.....	107
1.	Zuerst wird die Geschwindigkeitskonstante aus einer Texturmessung wie folgt berechnet: .....	107
2.	Der bei einer Schlupfgeschwindigkeit gemessene Reibungswert FRS wird zu einer 60 km/h Messung (FR60) konvertiert: .....	108
3.	Den geschätzte Wert (F60) des Goldenen Wertes (GF60) kann man dann wie folgt erhalten: .....	108
8.4	Vorgeschlagener internationaler Reibungsindex (IFI).....	109
8.5	Voraussage der Geschwindigkeitskonstante mit einer Texturmessung .....	109
8.5.1	Korrelationen der geschätzten Geschwindigkeitskonstante .....	109
8.5.2	Texturbandweite um GS vorauszusagen .....	111
8.6	Voraussage des Goldenen Werte (GF60) mit einer Reibungsmessung.....	112
8.7	Voraussage des Goldenen Wertes (GF60) mit einer "Mikrotextur-" und einer Makrotexturmessung.....	114
	Makrotextur mit MPD.....	114
	Makrotextur mit MTD .....	115
8.8	Voraussage des Goldenen Wertes (GF60) mit anderen Methoden .....	115
	Voraussage der Geschwindigkeitskonstante GS .....	116
	Voraussage von GF60 mittels Berechnung von F60.....	117
9	Harmonisierung und Standardisierung .....	118
9.1	Einzelne Geräte .....	118
	Figure 6: Flussdiagramm.....	118
9.1.1	Beispiel mit D3.....	120
	Wenn A2.MPD 2.05 mm beträgt, wird Sp gleich 198 km/h .....	120

---

9.1.2	Zwischen Gerätetypen .....	121
9.2	Der vorgeschlagene internationale Reibungsstandard .....	122
9.3	Kalibration von anderen Geräten .....	123
9.3.1	Anwendung von Reibungsmessern, die am Experiment teilnahmen .....	123
9.3.2	Unter Anwendung von A13 oder D8 .....	124
9.3.3	Unter Anwendung von Mikro- und Makrotextur .....	124
9.3.4	Geräte ohne Textur .....	124
9.4	Anwendung des PIARC-Modelles .....	124
10	Schlussfolgerungen und Empfehlungen .....	127
10.1	Schlussfolgerungen .....	127
10.2	Empfehlungen .....	129
10.2.1	Der vorgeschlagene internationale Reibungsindex (IFI) .....	129
10.2.2	Kalibration und Harmonisierung von anderen Geräten .....	130
10.2.3	Textur .....	130
10.2.4	Empfehlungen für weitergehende Forschungen .....	130
11	Literatur .....	132
12	Auswirkungen des Versuchs .....	134
12.1	Neudefinition der Mittleren Profiltiefe .....	134
12.2	Arbeitsgruppe der FEHRL .....	134
12.3	Weitergehende Forschung .....	136
13	Vergleichsmessungen des IVT .....	137
13.1	Schlussbetrachtungen .....	141
13.1.1	Anmerkungen .....	141
13.1.2	Schlusskommentar .....	146

## Zusammenfassung

Die Griffigkeitseigenschaften von Strassen und Flugpisten sind massgebende Faktoren für die Sicherheit. Es existieren sehr verschiedene Systeme und Methoden zur Messung der Griffigkeit und der Oberflächentextur. Die Resultate eines AIPCR/PIARC Gross-Versuchs bilden eine wertvolle Grundlage, um Materialspezifikationen für den Strassenbau standardisieren zu können. In der Vergangenheit wurden schon viele Versuche unternommen, Daten verschiedener Reibungsmesser zu korrelieren. Obwohl manchmal gute Korrelationen erhalten wurden - vor allem auf ähnlichen Oberflächentypen - wurden keine generellen Korrelationen formuliert. Es wurde erkannt, dass die Auswirkungen der Oberflächentextur berücksichtigt werden müssen, wenn man stark unterschiedliche Messmethoden wie blockierte Messräder, Schlupf oder Seitenkraftmesser (SCRIM) gegeneinander in Beziehung setzen will.

Am IVT der ETH Zürich wird der Skiddometer durch den Stuttgarter Reibungsmesser abgelöst. Im Bericht werden auch die Korrelationen zwischen diesen beiden Geräten, welche beide am internationalen AIPCR Experiment teilgenommen haben, untersucht.

Die Datenbank aus den Gross-Versuchen wurde verwendet, um einen internationalen Griffigkeitsindex bzw. Reibungsindex (International Friction Index = IFI) herzuleiten. Der IFI ist ein Index, der aus zwei Parametern besteht, die für die meisten Systeme neben der Reibungsmessung eine zusätzliche Texturmessung erfordert.

Der Auswahl der Strecken wurde besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Da man unter anderem Textur und Reibung in Beziehung setzen wollte, waren Strassen unter Verkehr mit breiten Bereichen an Textur- und Griffigkeitseigenschaften gesucht. Doch es waren nicht nur verschiedene Griffigkeits- und Texturstufen nötig, wichtig waren auch verschiedene Stufen von Abrieb und Polieren. Aus ähnlichen Gründen wollte man darum auch echt befahrene Strassen in zwei Klimazonen (nass und trocken) einbeziehen, die Offerten von Spanien und Belgien als Gastländer wurden deshalb akzeptiert.

Der Grossversuch ergab folgende Resultate:

- Beziehungen zwischen Reibungs- und Texturmessungen, die mit unterschiedlichen Geräten ermittelt wurden
- Quantifizieren des Verhältnisses zwischen standardisierten Messungen der Reibung und Textur
- Quantifizieren der Wiederholbarkeit und der Messfehler
- Entwickeln einer internationalen Reibungsskala, damit alle Geräte ihre Messdaten in dieser Skala angeben können.

## Résumé

Les propriétés antidérapantes des routes et des pistes d'aérodromes sont des facteurs déterminants pour la sécurité. Il existe beaucoup de systèmes et de méthodes pour mesurer la qualité antidérapante et la texture de la surface. Les résultats d'un essai AIPCR/PIARC en vraie grandeur fournissent une base précieuse pour pouvoir standardiser les spécifications des matériaux pour la construction des routes. Beaucoup d'essais ont déjà été exécutés dans le passé pour corrélérer les données de différentes méthodes de mesure du frottement. Malgré le fait que quelques fois l'on ait obtenu de bonnes corrélations - en particulier sur des types de surfaces semblables - aucune corrélation générale n'a été formulée. Il a été retenu que les effets de la texture de la surface doivent être considérés quand on veut mettre en relation des méthodes de mesure complètement différentes telles que roues bloquées, freinées (avec un coefficient de glissement contrôlé) ou force latérale (SCRIM).

À l'IVT de l'ETH de Zurich le „skiddometer“ est remplacé par l'appareil de mesure de friction de Stuttgart. Dans le rapport sont aussi étudiées les corrélations entre ces deux appareillages qui ont d'ailleurs été utilisés dans les essais internationaux AIPCR.

La banque de données des essais en vraie grandeur a été exploitée pour déduire un indice international de qualité antidérapante, respectivement un indice de frottement (International Friction Index = IFI). L'IFI est un indice, dépendant de deux paramètres, qui requiert, à côté de la mesure du frottement, une mesure supplémentaire de la texture pour la plupart des systèmes.

Le choix des tronçons a été l'objet d'une attention particulière. Puisque l'on voulait, entre autres, corrélérer la texture et le frottement, des routes sous trafic et avec une large palette de textures et de qualités antidérapantes ont été choisies. Par ailleurs il ne fallait pas seulement différentes textures et qualités antidérapantes, mais étaient aussi importants différents niveaux d'abrasion et de polissage. Pour les mêmes raisons, il y avait l'intérêt à vérifier des routes sous trafic en deux zones climatiques différentes (mouillée et sèche), c'est pourquoi les offres de l'Espagne et de la Belgique comme nations hôtes ont été acceptées.

L'essai en vraie grandeur a fourni les résultats suivants:

- Corrélations entre mesures de frottement et de texture, obtenues avec différents appareillages.
- Quantification de la relation entre mesures standardisées du frottement et de la texture.
- Quantification de la répétition et des erreurs de mesure,
- Développement d'une échelle internationale du frottement, afin de pouvoir inscrire sur cette échelle les résultats de tous les instruments de mesure.

## Summary

The skid resistance properties of roads and airport runways are decisive factors for safety. Greatly varying systems and methods for the measurement of skid resistance and surface texture exist. The results of an AIPCR/PIARC large-scale test form a meaningful basis to enable the standardisation of material specifications for roadway construction. In the past, many tests have been carried out in order to correlate data from different friction measurements. While good correlations were sometimes obtained, especially for similar types of surfaces, no general correlation was defined. It was recognized that the effects of different surface textures must be taken into consideration if greatly differing measurement methods such as the blocked wheels, variable slip or side force measure (SCRIM) are to be related to each other.

At the IVT at the Swiss Federal Institute of Technology in Zurich, the skid meter has been replaced by the Stuttgart friction measuring apparatus. In the report, the correlation between these two apparatus, both of which were used in the international AIPCR experiment, is investigated.

The database from the large-scale tests was used to derive an international skid, or friction, index. (International Friction Index = IFI). The IFI is an index based on two parameters which requires, for most systems, a texture measurement in addition to the friction measurement.

The choice of the test sections was given much attention. As various textures and frictions were to be related to each other, roads used by traffic with a wide range of texture and skid resistance properties were sought. Also, not only were various skid resistance and texture levels necessary, it was important to have various levels of abrasion and polish. On similar grounds, the inclusion of real travelled roads in two climatic zones (wet and dry) was desired, thus offers from the host countries Spain and Belgium were accepted.

The large-scale test provided the following results.

- Relationship between friction and texture measurements, which must be carried out with different apparatus.
- Quantification of the relation between standard friction and texture measurements.
- Quantification of repeatability and measurement errors.
- Development of an international friction scale so that data from all apparatus can be entered into this scale.

## Sommario

Le caratteristiche di aderenza di strade e piste aeroportuali sono fattori essenziali per la sicurezza. Esistono diversi sistemi e metodi per la misura dell'aderenza e della tessitura superficiale. I risultati di una prova a grandezza naturale AIPCR/PIARC rappresentano un valido fondamento per la standardizzazione delle caratteristiche richieste per i materiali stradali. Nel passato sono già state condotte numerose prove per la correlazione di dati provenienti da diverse apparecchiature per la misura dell'attrito. Anche se talora sono state ottenute buone correlazioni (soprattutto per tipi di superfici simili) non sono mai state formulate correlazioni di carattere generale. E' stato riconosciuto che gli effetti della tessitura superficiale devono essere presi in considerazione qualora si vogliano mettere a confronto diversi metodi di misura, come ruote di misura bloccate, misuratori di scivolamento o di forze laterali.

All'istituto IVT dell'ETH di Zurigo lo Skid tester e' stato sostituito con il misuratore di attrito "Stuttgarter Reibungsmesser". Nel rapporto sono studiati anche i valori di correlazione tra queste due apparecchiature, le quali hanno preso parte all'esperimento internazionale AIPCR.

La banca dati proveniente dalle prove a grandezza naturale e' stata utilizzata per ottenere un indice di aderenza internazionale (indice di attrito: International Friction Index = IFI). L'IFI e' un indice che consiste di due parametri, i quali per la maggior parte dei sistemi di misura richiedono oltre alle misure di attrito anche un'ulteriore misura della tessitura.

Particolare attenzione e' stata dedicata alla scelta delle piste di prova. Sono state selezionate strade sottoposte a traffico con un ampio spettro di tessiture e aderenze, in quanto si sono voluti mettere in relazione la tessitura superficiale e l'attrito. Oltre ai diversi gradi di tessitura e aderenza, una notevole importanza hanno anche rivestito l'usura e la levigatura. Per simili motivi si è anche voluto relazionare strade sottoposte a grandi livelli di traffico in due zone climatiche differenti, per questo sono state accettate le offerte di Spagna e Belgio come paesi ospitanti.

La prova a grandezza naturale ha fornito i seguenti risultati:

- Valori di correlazione tra misure di attrito e tessitura, ottenute con apparecchiature diverse.
- Quantificazione del rapporto tra misure standardizzate dell'attrito e della tessitura.
- Quantificazione della ripetibilità e dell'errore di misura.
- Sviluppo di una scala di attrito internazionale, in modo che tutte le apparecchiature possano essere classificate in accordo con questa scala.

# 1 Einleitung

## 1.1 Auftrag und Ziel

Messeinrichtungen und Messmethoden für die Griffigkeit, die Textur und die Oberflächenrauigkeit von Strassen und Flugpisten variieren sehr stark von Land zu Land. Aber auch die Anforderungen an die Griffigkeit sind sehr unterschiedlich. Aus diesem Grund wurde von der AIPCR (Association Internationale Permanente des Congrès de la Route) im Herbst 1992 ein internationaler Ringversuch organisiert ("International experiment to compare and harmonize skid resistance and texture measurement").

Der Versuch sollte vor allem auch Hinweise auf die Realisation eines konsistenten Managements der Strassenerhaltung (PMS: Pavement Management Systems) geben. Um Anforderungen an Strassenbaumaterialien normieren zu können, ist es nötig, Messmethoden zu harmonisieren. Anhand des Versuchs sollten Vorschläge für ASTM-Normen, sowie CEN-Normen oder ISO-Normen erarbeitet werden.

Um den Zusammenhang verschiedener Messsysteme und Messbedingungen zu untersuchen und herauszufinden wie diese mit den zu untersuchenden Textureigenschaften zusammenhängen, sollten verschiedene Arbeiten durchgeführt werden, so etwa:

- Abhängigkeiten zwischen normierten Griffigkeitsmessmethoden mit verschiedenen Messsystemen unter spezifischen Bedingungen quantifizieren, um so den Datenvergleich und die Harmonisierung von technischen Informationen zu erleichtern. Dazu wird es notwendig sein, Modelle zu entwickeln, welche die Textur mit einbeziehen.
- Entwickeln und Evaluieren von Abhängigkeiten zwischen Griffigkeit und Textur, gemessen mit verschiedenen Messmethoden und Geräten unter verschiedenen Testbedingungen, einschliesslich Oberflächenrauigkeit, Geschwindigkeit, Schlupfwinkel, Versuchsreifen, Klima und Materialien.
- Messfehler und Reproduzierbarkeit der Messungen für die verschiedenen Messmethoden zu quantifizieren. Messhäufigkeit (sampling rate) und Messlänge der verschiedenen Messmethoden, um genügende Genauigkeit zu erhalten, untersuchen.
- Ermitteln der Eignung von Messmethoden und Messsystemen für die Brauchbarkeit der Datenerhebung bei einzelnen Projekten sowie für ganze Strassennetze.

Im Hinblick auf eine nötige Revision der schweizerischen Normen über Griffigkeit sollte ein Grossversuch auch wertvolle Grundlagen liefern.

Im Jahre 1992 organisierte die AIPCR einen Grossversuch in Belgien und Spanien mit dem Ziel die verschiedenen Arten von Griffigkeits- und Oberflächenrauigkeitsmessungen zu kalibrieren, Vergleichen und Harmonisieren. Um die schweizerischen Messmethoden und Systeme an dem Grossversuch kalibrieren zu können, wurde eine Teilnahme als wichtig erachtet.

Aus diesem Grunde erhielt das IVT der ETH Zürich den folgenden Forschungsauftrag (Auszug):

Das Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau, ETH, 8093 Zürich wird beauftragt im Hinblick auf die Revision der Normen die Griffigkeitsmessungen und die Oberflächenrauheitsmessungen zu kalibrieren, zu vergleichen und zu harmonisieren. Zu diesem Zweck wird sich das IVT am Grossversuch der AIPCR in Belgien und Spanien beteiligen, wo die verschiedenen Messsysteme und Messmethoden von Griffigkeit und Oberflächenrauigkeit von Strassen untersucht und die Resultate verglichen werden sollen.

Griffigkeitsmessungen wurden vom IVT an der ETH Zürich bis Mitte der neunziger Jahre mit dem Skiddometer und der Kombination von Pendel- und Ausflussmessungen durchgeführt. Mitte 1992 erhielt das IVT ein neues Fahrzeug zur Messung der Griffigkeit (SRM, Stuttgarter Reibungsmesser):



Figure 1: Stuttgarter Reibungsmesser des IVT an der ETH Zürich

## 1.2 Aufbau des Berichtes

Der Bericht besteht aus zwei Hauptteilen:

Der erste Teil enthält eine gekürzte Übersetzung des Schlussberichtes der PIARC. In einem zweiten Teil werden dann einige weitergehende Untersuchungen des IVT diskutiert und der aktuelle Stand der Arbeiten im Rahmen von FEHRL wird vorgestellt. Die Schlussbetrachtungen befassen sich unter anderem mit den Geräten des IVT, dazugehörigen Anmerkungen zu einigen Kapiteln, Folgerungen aus der Sicht des IVT und Vorschlägen für weitere Forschungen.

## 2 Ausführliche Zusammenfassung

Die Griffigkeitseigenschaften von Strassen und Flugpisten spielen eine wichtige Rolle in Sicherheitsfragen des Strassenverkehrs. Strassen und Pistenoberflächen müssen für die darauf fahrenden Fahr- und Flugzeuge die benötigten Griffigkeits- und Reibungsverhältnisse garantieren. Systeme und Methoden zur Messung der Griffigkeit und der Oberflächentextur unterscheiden sich stark von Land zu Land. Das AIPCR/PIARC Experiment hatte zum Ziel Vergleichsmöglichkeiten für die verschiedenen Methoden zu schaffen. Die Resultate dieses Versuchs können eine wertvolle Grundlage liefern, um Konsistenz im Management der Strassenerhaltung quer über Landesgrenzen hinweg zu erzielen. Ausserdem ist es nötig, Messmethoden zu harmonisieren, damit Materialspezifikationen für den Strassenbau standardisiert werden können. In der Vergangenheit wurden schon viele Versuche unternommen, Daten verschiedener Reibungsmesser zu korrelieren. Und obwohl manchmal gute Korrelationen erhalten wurden - vor allem auf ähnlichen Oberflächentypen - wurden keine generellen Korrelationen formuliert. Es wurde erkannt, dass die Auswirkungen der Oberflächentextur berücksichtigt werden müssen, wenn man so unterschiedliche Messmethoden wie blockierte Messräder, Schlupf oder Seitenkraftmesser (SCRIM) gegeneinander in Beziehung setzen will. In dieser Studie wurden die Reibungsdaten mit Modellen analysiert, die Textureigenschaften ebenfalls mit einbeziehen.

Das Hauptziel des Versuches war die Harmonisierung der vielen verschiedenen Reibungsmessmethoden, die heute in verschiedenen Ländern existieren. Dazu war das Erreichen der folgenden Nebenziele nötig:

- Entwickeln und Ermitteln von Beziehungen zwischen Reibungs- und Texturmessungen, die mit unterschiedlichen Geräten unter verschiedenen physikalischen Testbedingungen ermittelt wurden. Zu diesen Testbedingungen gehören Textur, Geschwindigkeit, Schlupfwinkel, Messreifen, Klima und Materialien.
- Quantifizierung des Verhältnisses zwischen standardisierten Messungen der Reibung und Textur, welche unter spezifizierten Bedingungen gemessen wurden. Damit soll der Austausch und die Harmonisierung von technischen Daten ermöglicht werden.
- Quantifizierung der Wiederholbarkeit und der Messfehler, die mit den verschiedenen Geräten verbunden sind. Ermitteln der benötigten Aufnahmen, die mit den einzelnen Geräten nötig sind, um eine akzeptable Genauigkeit zu erreichen.
- Entwicklung einer internationalen Reibungsskala, damit alle Geräte ihre Messdaten in dieser Skala angeben können. Zusätzlich soll auch ermittelt werden, wie gut jedes System befähigt ist, die Messwerte in dieser Skala auszudrücken.

Um die Reibungs- und Texturmessungen unterschiedlicher Geräte in Relation zu setzen benötigte man von jedem Gerät einen grossen Datensatz. Es wurde darum beschlossen, dass alle Geräte ihre Reibungs- und Texturmessungen gleichzeitig auf einer grossen Anzahl von Oberflächen mit einer breiten Streuung von Textur- und Griffigkeitseigenschaften durchführen sollten. Dazu wurden Strassen unter Verkehr in Spanien und Belgien ausgewählt, da spezielle Teststrecken oft zu wenige verschiedene Oberflächen und weniger Variablen aufweisen als Strassen unter normalem Verkehr.

In einem ersten Schritt wurde die Datenbasis genutzt, um einfache Korrelationen zwischen allen Reibungsmessern zu berechnen. Zusätzlich wurden die verschiedenen Parameter der

Texturmesser mit der mittleren Texturtiefe, wie sie mit der volumetrischen Fleckmethode (Sandfleck) ermittelt wurden, verglichen.

Die Wiederholungsgenauigkeit für jeden Reibungsmesser wurde bezüglich Geschwindigkeit und Griffigkeitsstufe analysiert. Die Resultate waren in den meisten Fällen recht gut.

Zuletzt wurde die Datenbank verwendet, um einen internationalen Griffigkeitsindex bzw. Reibungsindex (International Friction Index = IFI) herzuleiten, der von jedem System, das am Experiment teilnahm, unter Anwendung seiner herkömmlichen Messmethode vorausgesagt werden kann. Der IFI ist ein Index, der aus zwei Parametern besteht, die für die meisten Systeme neben der Reibungsmessung eine zusätzliche Texturmessung erfordert.

Weitere Untersuchungen, die sich etwa mit der Methode von Horne für Reifenvergleiche und mit weiteren Beziehungen zwischen Texturparametern befassten, wurden durchgeführt, sind aber im eigentlichen Bericht nicht enthalten (siehe Anhang Original).

Der Auswahl der Strecken wurde besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Da man unter anderem Textur und Reibung in Beziehung setzen wollte, waren Strassen unter Verkehr mit breiten Bereichen an Textur- und Griffigkeitseigenschaften gesucht. Doch es waren nicht nur verschiedene Griffigkeits- und Texturstufen nötig, wichtig waren auch verschiedene Stufen von Abrieb und Polieren. Aus ähnlichen Gründen wollte man darum auch echt befahrene Strassen in zwei Klimazonen (nass und trocken) einbeziehen, die Offerten von Spanien und Belgien als Gastländer wurden deshalb akzeptiert.

Der Grossversuch, sog. Ringversuch fand im September und Oktober 1992 statt. Insgesamt wurden 54 Strecken ausgewählt und miteinbezogen:

- Davon lagen 28 Versuchsstrecken in Belgien, 2 auf einem Flughafen, 4 auf einer Rennstrecke und 18 auf öffentlichen Strassen.
- Die anderen 26 Strecken lagen in Spanien (8 auf Flughäfen, 18 auf öffentlichen Strassen).

Die Messungen auf einer Strecke wurden möglichst schnell durchgeführt, so dass Temperaturunterschiede oder andere mögliche Änderungen im Laufe eines Tages möglichst minimiert werden konnten. Insgesamt ergaben sich 51 verschiedene Messungen, die von 16 an den Ringversuchen teilnehmenden Ländern durchgeführt wurden.

Es war Sache der Teilnehmer, ihre Geräte in einem repräsentativen Zustand zu halten. Wie auch immer, Geräte, die in der gleichen Art und Weise und im gleichen Zustand wie beim Versuch eingesetzt werden, können benutzt werden, um Geräte zu kalibrieren, die nicht am Versuch teilnahmen, so dass auch diese den IFI voraussagen können.

Jeder Reibungsmesser machte Messungen bei drei Geschwindigkeiten: 30, 60 und 90 km/h. Benutzte das Gerät für seine normalen Routinemessungen eine andere Geschwindigkeit, so ersetzte diese Standardgeschwindigkeit die Messung der am nächsten liegenden Versuchsgeschwindigkeit. In wenigen Fällen, wo Geräte 90 km/h nicht erreichen konnten, wurde die Geschwindigkeit auf 80 km/h gesenkt.

Die Texturmessungen wurden auf trockener Oberfläche durchgeführt, bevor Wasser aufgetragen wurde. Pendelmessungen als Ersatz für eine Mikrotexturmessung wurden beigezogen um abzuklären, ob sich statistisch relevante Änderungen durch den eigentlichen Versuchsvorgang ergaben.

Alle Daten wurden in eine Datenbank eingegeben, deren Files unter anderem folgende Grössen enthalten:

- Gerätebeschrieb
- Streckeneigenschaften
- Wetter, Klima
- Werte der Textur- und Griffigkeitsmessungen.

Alle Teilnehmer konnten ihre eigenen Daten einsehen und allfällige Korrekturen anbringen. Die Datenbank ist bei PIARC als Diskette erhältlich.

## 2.1 Griffigkeit

In einem ersten Versuch, die Messungen und Resultate der einzelnen Geräte in Beziehung zu bringen waren lineare Korrelationen zwischen jedem Gerät und allen anderen Geräten, unabhängig vom Messsystem, dem Messreifen und der Messmethode.

Gesamthaft gesehen resultierten daraus ganz ordentliche Korrelationen. Die Korrelationskoeffizienten R für diese einfache Auswertung „Gerät zu Gerät Regressionen“ sind für die teilnehmenden Reibungsmesser in der folgenden Tabelle ersichtlich:

Messsystem	Seitenkraft	Konstanter Schlupf	Blockiertes Messrad	Pendel
Seitenkraft	0.863	0.819	0.795	0.665
konstanter Schlupf	0.819	0.834	0.783	0.732
Blockiertes Messrad	0.795	0.783	0.843	0.670
Pendel	0.665	0.732	0.670	0.830

*Tabelle 1: Korrelationen zwischen den einzelnen Griffigkeits-Messverfahren*

## 2.2 Textur

Die Parameter der Makrotextur können als drei Typen klassifiziert werden:

- MPD (Mittlere Profiltiefe), benutzt Profile, um die mittlere Texturtiefe vorauszusagen.
- RMS, das einfache quadratische Mittel des Texturprofils.
- Ausflusszeit, bestimmt mit einem Ausflussmesser.

Zwei Ausflussmesser waren am Versuch beteiligt und die tiefen Korrelationen in der untenstehenden Tabelle stammen von dem Gerät, das keine kleineren Intervalle als Sekunden zuließ. Lineare Korrelationen aller Parameter aus den Texturmessungen mit der mittleren Texturtiefe aus der volumetrischen Fleckmethode (Sandfleck mit Glaskugeln) wurden berechnet. Der Wertebereich der Korrelationskoeffizienten findet sich in der unteren Tabelle. Einige Geräte lieferten mehr als einen Texturparameter, in diesem Fall wurde nur der beste Parameter für jeden Typ berücksichtigt.

Texturparameter	Anzahl Geräte	Korrelationskoeffizienten
MPD	5	0.940-0.966
RMS	10	0.854-0.953
Ausflusszeit	2	0.880-0.940

Tabelle 2: Korrelationen zwischen den einzelnen Textur-Messverfahren

### 2.3 Wiederholbarkeit der Messungen

Die Wiederholbarkeit der Messungen konnte überprüft werden, weil praktisch alle Geräte bei jeder Geschwindigkeit zwei Durchgänge absolvierten. Der Absolutwert der Differenz zwischen dem ersten und dem zweiten Durchgang wurde bestimmt und die Standardabweichung dieser Werte lieferte ein Mass für die Wiederholbarkeit. Diese wurde für jede Geschwindigkeit und für drei Reibungsklassen gemacht. Die Mittelwerte dieser Resultate für die drei Arten von Messgeräten sind in der folgenden Tabelle wiedergegeben:

	Seitenkraft	Konstanter Schlupf	Blockiertes Messrad
Langsame Geschwindigkeit	0.034	0.033	0.028
Mittlere Geschwindigkeit	0.029	0.032	0.024
Hohe Geschwindigkeit	0.028	0.031	0.027
Tiefe Griffigkeit	0.027	0.023	0.015
Mittlere Griffigkeit	0.031	0.031	0.023
Hohe Griffigkeit	0.028	0.026	0.029

Tabelle 3: Standardabweichung der Differenzen als Mass für die Wiederholbarkeit

## 2.4 Werte harmonisieren

Da es drei Grundtypen von Reibungsmessern gibt, wurde herausgefunden, dass ein Parameter der Makrotextur nötig ist, um die Resultate zu harmonisieren. Eine Griffigkeitsskala muss deshalb zwei Angaben enthalten: eine, die sich auf eine Messung der Makrotextur bezieht und eine, die sich auf eine Reibungsmessung bezieht. Das Ziel war nun, dass alle Systeme auf irgendeiner Oberfläche die gleichen Werte für diese Angaben voraussagen.

Um so eine Skala zu entwickeln sind in einem ersten Schritt wahre Werte als Ziel nötig. Da es keinen wahren Wert für die Griffigkeit gibt, wurden die von den Geräten über einen breiten Bereich von Schlupfgeschwindigkeiten gemachten Messungen zusammengesetzt, um eine Korrelation zwischen Messgeschwindigkeit (Schlupfgeschwindigkeit) und Reibungswert für jede Strecke zu erhalten. Dazu wurde eine Reibungs-Geschwindigkeitskurve für jede Strecke entwickelt.

Diese Kurven sind die „Goldenen Kurven“, welche die wahren Werte für die weitere Analyse ausmachen. Die Goldenen Kurven können mit zwei Zahlen charakterisiert werden; GF60 und GS in der folgenden Beziehung:

$$GF(S) = GF60 * \exp[(60 - S)/GS] \quad \text{Gl. 1}$$

wobei:

S = Schlupfgeschwindigkeit in km/h

GF(S) = „Wahres“ Reibungs/Geschwindigkeits-Verhältnis für eine Oberfläche

GF60 = Goldener Reibungswert

GS = Goldener Geschwindigkeitswert in km/h

Es wurde festgestellt, dass der „goldene Geschwindigkeitswert“ GS mit der Makrotextur in Beziehung steht und mit den teilnehmenden Texturmessgeräten sehr gut vorausgesagt werden konnte. Tatsächlich brauchte es lediglich eine lineare Regression, um die Texturmessungen an einen vorausgesagten Wert ( $S_p$ ) des Goldenen Geschwindigkeitswertes anzupassen. Der vorausgesagte Wert wird wie folgt berechnet:

$$S_p = a + b * T \quad \text{Gl. 2}$$

Wobei  $T_x$  der von einem Makrotexturmessgerät produzierte Texturparameter ist.

Die gemittelten Korrelationskoeffizienten der Regression sind in der folgenden Tabelle für alle drei Typen von Texturparametern aufgeführt. Es ist bemerkenswert, dass die besten Korrelationen mit der mittleren Profiltiefe (MPD) bestehen, die ja auch die beste Korrelation mit der mittleren Texturtiefe gemäss der volumetrischen Fleckmethode (MTD) hat. Die absolute mittlere Differenz ist ein direktes Mass für den Fehler in der Voraussage von GS. Der Wertebereich von GS reicht von 42 km/h bis 334 km/h.

Texturparameter	Anzahl Geräte	Korrelationskoeffizient	Absoluter mittlerer Fehler
MPD	5	0.928	18.1
RMS	10	0.849	22.0
MTD	1	0.930	18.0
Ausflusszeit	1	0.877	15.5

*Tabelle 4: Gemittelte Korrelationskoeffizienten der Regression*

Die Werte a und b in Gleichung 2 wurden für alle Parameter aller Geräte ermittelt. Im Ganzen waren es elf Geräte, die Texturprofilmessungen durchführten, wobei ein Gerät aufgrund massiver betrieblicher Probleme nicht weiter berücksichtigt wurde. Von den zehn Geräten, die Makrotexturprofilmessungen durchführten hatten sieben für diese Voraussagen einen Korrelationskoeffizienten zwischen 0.90 und 0.95. Die übrigen drei Geräte hatten Korrelationskoeffizienten zwischen 0.79 und 0.81. Etliche Geräte lieferten mehrere Texturparameter, wobei sich die hier aufgeführten Korrelationen jeweils auf den besten Parameter beziehen. Die Systeme, die eine mittlere Profiltiefe (MPD), die von ISO normiert wird, berechneten lieferten die besten Korrelationen und wurden für die weiteren Analysen als Texturparameter benutzt.

Die Reibungsmesser haben je nach System und Fahrgeschwindigkeit (V) unterschiedliche Schlupfgeschwindigkeiten (S):

- S = Fahrzeuggeschwindigkeit (V) für Messungen bei blockiertem Messrad
- S = V \* Prozent Schlupf für Messungen mit konstantem Schlupf
- S = V \* sin (x) für Messungen mit Seitenkraft, wobei x der Winkel des schrägen Messrades ist.

Der erste Schritt, um einen Griffigkeitswert FRS bei irgendeiner Schlupfgeschwindigkeit S zur Voraussage des Goldenen Reibungswertes GF60 zu benutzen, besteht darin, den Wert an die Schlupfgeschwindigkeit 60 km/h anzupassen. Dazu braucht man den Geschwindigkeitswert, der aufgrund der Texturmessung vorausgesagt wird und zwar anhand der folgenden Beziehung:

$$FR60 = FRS * \exp[(S-60)/ Sp]$$

Gl. 3

Wobei:

FR60 ist der angepasste Reibungswert.

FRS ist die Reibungsmessung des Gerätes.

S ist die Schlupfgeschwindigkeit.

Der letzte Schritt der Harmonisierung umfasst die Kalibrierung des System mittels Regression des angepassten Messwertes zum Goldenen Reibungswert:

$$F60 = A + B * FR60 + C * Tx \quad \text{Gl. 4}$$

Die obigen Formeln können auch kombiniert werden und F60 kann aufgrund einer Griffigkeits- (FRS) und einer Texturmessung (Tx) folgendermassen ausgedrückt werden:

$$F60 = A + B * FRS * \exp[-(60-S)/(a + b * Tx)] + C * Tx \quad \text{Gl. 5}$$

A, B und C sind Kalibrationskonstanten für jedes Gerät, wobei C für viele Geräte praktisch den Wert 0 aufweist.

F60 ist eine Voraussage des Goldenen Reibungswertes (GF60) und  $S_p$  ist eine Voraussage für den Goldenen Geschwindigkeitswert (GS). Die Werte von F60 und  $S_p$  machen den Internationalen Reibungswert aus (IFI) und sind eine Voraussage des Goldenen Internationalen Reibungswertes (GIFI).

Indem die mittlere Profiltiefe (MPD) als Texturmessungen verwendet wurde, wurden die Werte A, B (und C für Geräte mit gerillten oder gemusterten Messreifen) für alle teilnehmenden Geräte ermittelt. Das Mittel der absoluten Werte der zwischen dem vorausgesagten F60 und des Goldenen Reibungswertes GF60 wurden berechnet und die Resultate wurden als gemittelte Werte aller Gerätetypen zusammengefasst. Die gemittelte absolute Differenz ist ein direktes Mass für den Fehler bei der Voraussage von GF60, wenn F60 mit einer spezifischen Gerätepaarung (Textur und Reibung) ermittelt wird. Um die Effizienz des PIARC Modells zu demonstrieren, kann man den Fehler, mit dem ein Gerät den Goldenen Wert unter Anwendung seiner normalen Schlupfgeschwindigkeit voraussagt, mit dem Fehler vergleichen, der entsteht, wenn man F60 unter Anwendung des PIARC Modells mit  $S_p$  berechnet. Diese Fehler sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

		Seitenkraft	blockiertes Messrad	konstanter Schlupf	Pendel
Absoluter Fehler	vorher	0.065	0.076	0.065	0.086
	nachher	0.028	0.032	0.030	0.037
Korrelationskoeffizient	vorher	0.81	0.81	0.78	0.65
	nachher	0.94	0.92	0.93	0.89

Tabelle 5: Veränderung der Fehler vorher - nachher

Zusammengefasst konnte gezeigt werden, dass der IFI mit einem akzeptablen Fehler (typischerweise zwischen  $\pm 0.03$  des Reibungswertes) angegeben werden kann, wenn man eine Messung der mittleren Profiltiefe und die Messung eines der teilnehmenden Reibungsmessers benutzt.

Mit dem IFI existiert damit nun eine universelle Skala für die Reibungskoeffizienten (IFI), die bei allen Messungen auf Strassen und Flugpisten angegeben werden sollte. Die beiden Zahlen aus denen sich der IFI zusammensetzt sind  $F_{60}$  und  $S_p$ , die auf einer Reibungsmessung in Kombination mit einer Texturmessung beruhen. Wenn diese Zahlen bei allen Anwendungen (Unfälle, Abnahmen, Unterhalt etc.) angegeben würden, könnten Resultate überall, wo der IFI benutzt wird, verglichen und verwendet werden.

Es wurde ebenso gezeigt, dass Entscheidungsträger Minimalanforderung für  $F_{60}$  und  $S_p$  festlegen können ( $F_{60}^*$  und  $S_p^*$ ). Diese können dann für benutzt werden, um Eingriffsstrategien für eine spezifische Gerätekombination festzulegen. Die Eingriffswerte können natürlich auch für verschiedene Strassenklassen unterschiedlich festgelegt werden.

Die vier Hauptziele des Experiments konnten erreicht werden. Teilweise so erfolgreich, dass sich einige zusätzliche direkte und indirekte Nutzen ergaben:

- Strassen- und Flughafenverwaltungen können einen universellen Standard übernehmen, ohne ihre gegenwärtigen Kontrollmethoden, ihre Erfahrung und Bewertungshintergrund und historischen Daten ersetzen zu müssen.
- Werte, die Eingriffe und Massnahmen erfordern, sind vergleichbar.
- Materiallieferanten können mit harmonisierten Spezifikationen auch andere Länder beliefern.
- Vertragspartner, die in anderen Ländern arbeiten wollen, können lokale Kontrollmethoden adaptieren.
- Gerätehersteller können einen grösseren Markt beliefern.
- Praktiker und Forscher können ein vertieftes Wissen über Griffigkeitsphänomene und Textureffekte gewinnen.
- Strassen- und Flughafenbenutzer können Berichte aus verschiedenen Ländern mit derselben Skala bekommen, was zu einer verbesserten Sicherheit beitragen kann.

## 3 Einführung

Die Reibungsverhältnisse auf Strassen und Flugpisten spielen eine wichtige Rolle für die Strassen- und Flugplatzsicherheit. Zu den Begriffen ist dabei anzumerken, dass Reibung und Griffigkeit in diesem Bericht abwechslungsweise gebraucht werden. Strassen- und Flugpistenoberflächen müssen also eine genügende Griffigkeit für die darauf fahrenden Fahr- und Flugzeuge bereitstellen. Es existiert heute ein breites Spektrum an Systemen und Methoden, mit denen die Griffigkeit und die Oberflächentextur gemessen werden. Diese Methoden variieren teilweise stark von Land zu Land. Aus diesem Grund plante das PIARC-Komitee über Oberflächeneigenschaften (TC1) dieses Experiment, um Mittel und Wege zu finden, mit denen Messungen aus der ganzen Welt verglichen werden können. Im Gegensatz zu vielen früheren Versuchen, sollte in diesem Falle aber nicht nur verglichen, sondern auch harmonisiert werden. Mit Harmonisierung ist gemeint, dass Mittel zur Verfügung gestellt werden, die es allen Geräten erlauben, einen gemeinsamen Wert anzugeben. Die Resultate dieses Experimentes sind deshalb sehr wertvoll für die Realisation eines konsistenten Strassenmanagements über Landesgrenzen hinweg. Im Weiteren müssen die existierenden Messmethoden harmonisiert werden, damit Materialanforderungen standardisiert werden können.

Es gibt heute vier Grundtypen von Messgeräten für massstabsgetreue Reibungsmessungen: Blockiertes Messrad, konstanter Schlupf, Seitenkraft und variabler Schlupf. Zusätzlich bestimmen einige Systeme die Reibungsspitze und andere variieren den Schlupf um im Bereich der Reibungsspitze zu arbeiten.

In ähnlicher Weise gibt es drei Grundtypen zur Messung der Makrotextur: Profilographen, volumetrische Methoden und Ausflussmessungen. Eigentliche Mikrotexturmessgeräte existieren keine. Wie auch immer, Reibungsmesser mit einer tiefen Geschwindigkeit - wie etwa das Pendel - gelten als Ersatz für die Mikrotexturmessung.

### 3.1 Reibungsmesser

#### 3.1.1 Messgeräte mit blockiertem Messrad

In den USA benützen alle 50 Staaten Messdaten, die mit blockiertem Messrad ermittelt wurden. Schweden, Frankreich, Deutschland, Griechenland, Taiwan, Schweiz, Japan, Kuwait und Polen benützen mindestens teilweise ebenfalls Messsysteme mit blockiertem Messrad.

Systeme mit blockiertem Messrad messen mit 100% Schlupf. Die relative Geschwindigkeit zwischen Gummi und Fahrbahnoberfläche entspricht der Fahrzeuggeschwindigkeit. Das Messrad wird gebremst und, nachdem das Rad vollständig blockiert ist, wird die Kraft gemessen und über eine Sekunde gemittelt. Da die Kraftmessung kontinuierlich erfolgt, können die Geräte normalerweise die Reibungsspitze bestimmen. Eine Variation davon ist der variable Schlupf, bei dem die Reibung als Funktion des Schlupfes aufgezeichnet wird, vom frei rollendem Rad (0% Schlupf) bis zum blockierten Rad (100% Schlupf). Die Messgeräte mit blockiertem Messrad sind normalerweise mit einem Bewässerungssystem ausgerüstet, da bei nasser Oberfläche gemessen wird; der Wasserfilm wird in den meisten Fällen auf eine Dicke von 0.5 mm eingestellt.

Eine weitere Variation der oben beschriebenen Messarten wird von der Fahrzeug- und der Reifenindustrie bevorzugt. Hierbei wird die Reibungsspitze bei feuchter und bei trockener Fahrbahn gemessen, wobei die Bremsen unmittelbar nach Erreichen der Spitze losgelassen werden. Diese Prozedur wiederholt sich etwa einmal pro Sekunde und gewinnt dadurch eine erhöhte Anzahl Samples. Der Test heisst CHIRP, so genannt aufgrund des entstehenden Geräusches.

### 3.1.2 Messung der Seitenkraft

Seitenkraftsysteme halten das Messrad in einer Ebene und in einem Winkel zur Bewegungsrichtung, ansonsten läuft das Rad frei. Die Seitenkraft oder die Winkelkraft, senkrecht zur Rotationsebene, wird gemessen. Der in Britannien entworfene SCRIM ist das gebräuchlichste dieser Geräte. Das Messrad des SCRIM befindet sich in der Regel in einem  $20^\circ$  Winkel und das Gerät verfügt über ein eigenes Bewässerungssystem mit einer Nennwassertiefe von 1 mm. Der ebenfalls in England entworfene MuMeter hat zwei Testräder, die mit einem Winkel von  $7.5^\circ$  schräg nach aussen laufen. Der MuMeter wurde für Flugpisten entwickelt und ist nicht für Strassen geeignet, da die Fahrspuren der Testräder nicht mit Fahrspuren auf Autostrassen übereinstimmen. In Belgien wird der Odilograph für die Abnahme neuer Deckschichten benutzt, während der SCRIM für Routineinspektionen verwendet wird. Der Odilograph hat kein eigenes Bewässerungssystem und folgt einem Lastwagen, der das Wasser auf die Strassenoberfläche aufbringt. In Belgien werden Geräte mit  $15^\circ$  und  $20^\circ$  Winkeln benutzt. Seitenkraftsysteme werden unter anderem in Belgien, Dänemark, Deutschland, Frankreich, Italien und in England benutzt. Aber auch Flughäfen brauchen Seitenkraftgeräte. Die relative Geschwindigkeit zwischen dem Gummi und der Fahrbahnoberfläche dieser Geräte liegt im Bereich von  $V \cdot \sin\alpha$  (wobei  $\alpha$  der Winkel zur Fahrriechtung ist) und ist deshalb eine Messung mit tiefer Geschwindigkeit bezüglich des Schlupfes, obwohl die Fahrzeuggeschwindigkeit hoch ist. Dieses System mit tiefer Schlupfgeschwindigkeit ist in erster Linie empfindlich auf Mikrotextur. Darum werden diese Messungen oft gemeinsam mit einer Makrotexturmessung durchgeführt. Die SCRIM's sind deshalb oft mit einem Laserbalken zur Makrotexturmessung ausgerüstet.

### 3.1.3 Geräte mit konstantem Schlupf

Der Vorteil einer Schlupfmessung besteht in der Möglichkeit, die Reibung über die ganze Messstrecke kontinuierlich aufzuzeichnen, sofern ein kleines Schlupfverhältnis gewählt wird. Aufgrund des Reifenverschleisses ist dieses Vorgehen mit blockiertem Messrad nicht möglich. Die Geräte mit konstantem Schlupf werden normalerweise mit einem Schlupf zwischen 10% und 20 % betrieben. Damit messen sie die Reibung wie die Seitenkraftgeräte bei tiefer Schlupfgeschwindigkeit, da sich die Rollgeschwindigkeit auf  $v \cdot \text{Schlupf-\%} / 100$  beläuft. Der Saab Friction Tester und der Runway Friction Tester wurden vornehmlich für Flughäfen entwickelt. Sie werden von Piloten kritisiert, da sie nicht bei der Reibungsspitze messen und tatsächlich können sie bei schnee- oder eisbedeckten Pisten sehr weit von der Spitze entfernt sein. Bei der Benutzung auf Autostrassen sind sie normalerweise von einer Makrotexturmessung begleitet. Geräte mit konstantem Schlupf werden unter anderem in Österreich, Japan, Holland, Norwegen, Schottland, Schweden und in der Schweiz, aber auch auf Flughäfen, verwendet.

### 3.1.4 Geräte mit variablem Schlupf

Der Norsemeter ist eines der wenigen Geräte, das so konstruiert ist, dass es bei jedem beliebigen Schlupf oder mit einer vorbestimmten Abfolge von Schlupfeinstellungen messen

kann oder auch die Maximalreibung mit einem Kontrollsystem suchen kann. Der Stuttgarter Reibungsmesser ist ebenfalls befähigt, die Spitze mit seiner ABS-Ausrüstung zu finden. Die Reibung-Schlupfkurve zu kennen kann für verschiedene Zwecke nützlich sein, speziell etwa auf Flugpisten. Die Kurve enthält ein Maximum an Informationen über die Reibungseigenschaften eines Reifen/Oberflächen-Paares.

## **3.2 Texturmessgeräte**

### **3.2.1 Textur Profilometer**

Es gibt grundsätzlich drei Typen von Profilometern, die heute gebraucht werden. Alle drei Typen produzieren ein digitales Profil der Makrotextur. Die Aufnahme erfolgt dabei entweder mit einem Laser, mit Licht oder einem Abtaststift. Das gebräuchlichste ist der Laser, von stationären Systemen bis zu Systemen, die bis 72 km/h schnell fahren. Die meisten SCRIM's sind mit einem Laserprofilographen ausgerüstet, aber auch andere Geräte benutzen Laserbalken für Makrotexturmessungen.

### **3.2.2 Volumetrische Methode**

Bei der volumetrischen Methode wird ein bekanntes Volumen eines streubaren Materials auf der Strassenoberfläche kreisförmig ausgestreut. Der Durchmesser des Kreises ergibt die Fläche, durch die das Volumen geteilt wird. So erhält man die mittlere Texturtiefe (MTD = Mean Texture Depth). Diese Methode ist als Sandfleckmethode bekannt, obwohl heute der Gebrauch von Glaskörnern anstelle von Sand empfohlen wird. Auf Flugpisten wurden auch schon Kitt und ähnliche Materialien verwendet.

### **3.2.3 Ausflussmesser**

Bei der Ausflussmessung wird ein in seinen Abmessungen bekannter Zylinder mit einer Gummiabdichtung auf die Strassenoberfläche gestellt. Der Zylinder wird mit Wasser gefüllt und es wird die Zeit in Sekunden gemessen bis eine bekannte Wassermenge ausgeflossen ist. Die Zeit wird mit einer Stoppuhr oder mittels am Zylinder befestigten Elektroden erfasst. Die Ausflusszeit ist umgekehrt proportional zur Textur, bei einer perfekt glatten Oberfläche wäre die Ausflusszeit demnach unendlich.

## **3.3 Die Notwendigkeit der Harmonisierung**

Korrelationen zwischen Reibungsmessgeräten wurden schon öfters ermittelt. Obwohl vor allem bei ähnlichen Vergleichsoberflächen recht gute Korrelationen gefunden wurden, fehlt bis heute eine generelle Korrelation. Der vorliegende Bericht vermittelt Verfahren, mit denen die mit unterschiedlichen standardisierten Methoden durchgeführten Reibungs- und Texturmessungen in Beziehung gebracht werden können. Um die unterschiedlichen Reibungsmessmethoden in Beziehung zu setzen, sind Angaben zur Oberflächentextur nötig [1, 2]. Die in diesem Bericht zur Datenanalyse benutzten Modelle beinhalten Charakteristiken der Oberflächentextur und indem ein spezielles Modell entwickelt wurde, konnte eine Harmonisierung gefunden werden. Damit können mit jedem Gerät Griffigkeitsangaben gemacht

werden, die in relativer Relation zu einer gemeinsamen Skala stehen. Der Name dieser gemeinsamen Skala ist IFI (International Friction Index = Internationaler Reibungsindex).

### **3.4 Ziele**

Es war das Ziel dieses Experiments, die unterschiedlichen Reibungsmessmethoden verschiedener Länder zu harmonisieren. Um dies zu erreichen, wurden folgende Zielvorstellungen als nötig erachtet:

- Entwickeln und Ermitteln von Beziehungen zwischen Reibungs- und Texturmessungen, die mit unterschiedlichen Geräten unter verschiedenen physikalischen Testbedingungen ermittelt wurden. Zu diesen Testbedingungen gehören Textur, Geschwindigkeit, Schlupfwinkel, Messreifen, Klima und Materialien.
- Quantifizieren des Verhältnisses zwischen standardisierten Messungen der Reibung und Textur, welche unter spezifizierten Bedingungen gemessen wurden. Damit soll der Austausch und die Harmonisierung von technischen Daten ermöglicht werden.
- Quantifizieren der Wiederholbarkeit und der Messfehler, die mit den verschiedenen Geräten verbunden sind. Ermitteln der benötigten Anzahl Aufnahmen, die mit den einzelnen Geräten nötig sind, um eine akzeptable Genauigkeit und Wiederholbarkeit zu erreichen.
- Entwickeln einer internationalen Reibungsskala, damit alle Geräte ihre Messdaten in dieser Skala angeben können. Zusätzlich soll auch ermittelt werden, wie gut jedes System befähigt ist, die Messwerte in dieser Skala auszudrücken.

Ursprünglich war das vierte Ziel, die Eignung der Methoden für Projekte und das Management von Netzwerken zu evaluieren. Dieses Ziel wurde aber vom Komitee geändert, da dies Sache der Entscheidungsträger in den Strassenverwaltungen sei.

### **3.5 Nutzen des Experiments**

Die technischen und ökonomischen Vorteile, die das Experiment vorsah, sind je nach unterschiedlichen Interessen verschieden für Gerätehersteller, Strassen- und Flughafenverwaltungen, sowie für Strassen- und Flughafenbenutzer. Zusammengefasst bedeutet dies:

- Strassen und Flughafenverwaltungen könnten einen internationalen Standard übernehmen, ohne ihre gegenwärtigen Kontrollmethoden, ihre eigenen Erfahrungen und historischen Daten aufzugeben
- Grenzwerte für Eingriffe werden austauschbar
- Materiallieferanten können ihren Markt auf andere Länder erweitern, wenn standardisierte Spezifikationen vorhanden sind
- Auftragnehmer, die ihr Arbeitsgebiet ausweiten wollen, werden befähigt, sich an Spezifikationen anzupassen, die auf lokal benutzten Kontrollmethoden basieren
- Gerätehersteller können ihren Markt erweitern

- Praktiker und Forscher könnten ein besseres Wissen über Griffigkeitsphänomene und Textureffekte gewinnen
- Strassen- und Flughafenbenutzer könnten in verschiedenen Ländern Angaben über Griffigkeitsverhältnisse in derselben Skala bekommen, was der Verbesserung der Sicherheit dienlich sein könnte.

## 4 PIARC-Ringversuch, Ablauf und Durchführung

Das Experiment wurde nach dem Strassenweltkongress in Brüssel 1988 vom PIARC-Komitee über Oberflächeneigenschaften in Angriff genommen. Eine Koordinationsgruppe nahm die Vorbereitungsarbeiten 1988 bis 1989 vor. Als Gastländer wurden Belgien und Spanien ausgewählt, die Teststrecken wurden 1990 begutachtet. Am Weltstrassenkongress in Marrakesch 1991 wurde das Experiment angekündigt und die Einladungen zur Teilnahme wurden ausgeteilt, das eigentliche Experiment fand im September und Oktober 1992 statt.

### 4.1 Messstrecken

#### 4.1.1 Kriterien für die Streckenwahl

Der Auswahl der Messstrecken wurde besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Ursprünglich wurden Strecken in Testzentren, beispielsweise auf dem LCPC-Gelände in Nantes, in Erwägung gezogen. Solche Strecken eignen sich zwar zur Kalibration von Geräten, haben aber oft einen Mangel an Variablen, die sich auf echt befahrenen Strassen finden. Vor allem das Ziel, Relationen zwischen Textur und Reibung zu finden, machte es nötig, echt befahrene Strassen auszuwählen, die grosse Bereiche von Textur- und Reibungswerten abdecken, wobei gerade auch der Einfluss von Abrieb und Polieren besonders wichtig ist. Ausserdem verfügen Testzentren nicht über eine genügend grosse Anzahl an Strassenoberflächen, die für eine akzeptable statistische Signifikanz benötigt werden.

Anhand dieser Fakten entschied sich das Komitee, Strassen unter echtem Verkehr zu benutzen und zwar in zwei verschiedenen Ländern, ein Land mit eher feuchtem Klima, ein anderes mit eher trockenem Klima. Belgien und Spanien boten sich als Gastgeber an. Dabei sollte bemerkt werden, dass die zahlreichen ausgewählten Abschnitte nach Oberflächeneigenschaften ausgesucht wurden, die für das Experiment benötigt wurden und keineswegs repräsentativ für die Strassenzustände in den beiden Ländern sind.

Die beiden Gastländer machten eine Vorauswahl von je 32 Orten. Eine ursprüngliche Auswahl wurde visuell unter Berücksichtigung der folgenden Anforderungen durchgeführt:

1. Es sollte eine genügende Vielfalt an Oberflächen vorhanden sein, die potentiell alle Kombinationen an hohen und tiefen Werten der folgenden Grössen beinhalten sollte:
  - Mikrotextrur
  - Makrotextrur
  - Megatextrur
  - Polieren und Abrieb

Die Strecken sollten eine 2\*2\*2 Matrix mit zwei Grössenordnungen (fein und grob) für jeden Texturbereich, angereichert mit einem mittleren Bereich für Makrotextrur, Oberflächen mit gemischter Makrotextrur und den entsprechenden Mehrfachbesetzungen zur Absicherung erfüllen.

2. Weitere Anforderungen waren:
  - Mindestens 150 m Länge.
  - Gerade Strecke mit einem Maximalgefälle von  $\pm 2\%$ .
  - Homogen bzgl. Textur, keine Zwischenabschnitte und keine grösseren Schäden wie Risse, Schlaglöcher etc..
  - Einige Strecken sollten einen Unterabschnitt haben, der eine unterschiedliche Megatextur, aber ähnliche Makro- und Mikrotextur aufweist.  
Es sollten Wendeplätze in der Nähe beider Enden vorhanden sein, so dass Wiederholungsmessungen gut möglich sind.
  - Eine Parkfläche oder ein Abstellplatz für alle Geräte sollte in der Nähe sein.
  - Wasser für die Geräte sollte beziehbar sein oder das Wasser muss mit Lastwagen gebracht werden.
  - Dreiviertel der Strecken sollten Asphaltbetonbeläge haben, ein Viertel Betonbeläge.
3. Die Messungen müssen bei maximaler Sicherheit durchgeführt werden können. Das erfordert entweder wenig Verkehr oder eine Kontrolle des Verkehrs.
4. Die Identifikation potentieller Strecken beinhaltete:
  - Dokumentation der Strecken Ende September 1990.
  - Photos: Übersicht und Nahaufnahmen.
5. Auf jeder Strecke wurden folgende Prüfversuche durchgeführt:
  - Messung mit einem SCRIM (60 km/h, 0.5 mm Wasserfilm)
  - Pendelmessung
  - Sandfleck mit Glaskörnern statt Sand
  - Mittleres Profil (in Belgien)Alle Texturprofile und -spektren wurden gemessen (vom schwedischen Institut VTI).

Im Oktober 1990 wurden die Strecken vom Komitee besichtigt.

Die meisten Ziele zur Streckenwahl konnten erfüllt werden, ausser der Tatsache, dass es nicht möglich war, Strecken mit gleichen Makro- und Mikro-, aber unterschiedlicher Megatextur zu finden. Dieses Ziel erwies sich als unpraktisch und wurde fallengelassen. Einige Strecken hatten unterschiedliche Megatexturen, aber das Ziel, eine gewisse Bandbreite zu haben, wurde fallengelassen. Jede vorgefundene Megatextur wurde letztendlich akzeptiert.

#### 4.1.2 Effektiv benutzte Strecken

Verschiedene Faktoren bestimmten die Endauswahl der Teststrecken. In einigen Fällen waren neue Deckbeläge aufgebracht worden, in anderen Fällen war die Reisedistanz zu gross. Einige der vorgeschlagenen Strecken mit hohen Pendelwerten wurden durch Strecken mit tiefen Werten ersetzt. Es war wünschenswert, mehr Strecken mit tiefen Werten zu haben, um die Sensitivität der Geräte vermehrt auf tiefe Werte zu prüfen, da Sicherheitsfragen vor allem in diesen tiefen Bereichen zur Geltung kommen. Insgesamt waren es letztendlich 54 Strecken:

28 in Belgien

2 auf dem Flughafen in Beauvechain

4 auf der Rennstrecke in Zolder

22 auf normal befahrenen Strassen

26 in Spanien

- 1 auf dem Flughafen von Alicante
- 18 auf normal befahrenen Strassen
- 4 auf der Moron Air Basis
- 3 auf der Rota Air Base

Die Strecken lassen sich somit folgendermassen zusammenfassen:

Asphaltbeton	29
Oberflächenbehandlungen	12
Zementbeton	9
Resinous Slurry	1
Offenporiger Asphalt	3

Texturtiefen	0.4 bis 3.0 mm
Reibungswerte (Pendel)	0.35 bis 0.75

## 4.2 Teilnehmende Geräte

In den folgenden Tabellen findet sich eine Zusammenfassung der teilnehmenden Reibungs- und Texturmessgeräte. Darin finden sich die Abkürzungen, die Messart(en) und die Messgeschwindigkeiten.

In der nachstehenden Tabelle sind die teilnehmenden Reibungsmesser aufgeführt:

Bezeichnung	Name	Typ	Reifenart/	Schlupf	Geschw.
			Rillen	%	km/h
A12	Rosan	Gleiter	glatt	100	10
A13	DF Tester	Gleiter	glatt	100	0-80
A14	British Pendulum (US)	Gleiter	glatt	100	10
B1-ABS	Stutt. Reibungsmesser (CH)	optimaler Schlupf	längs-P	opt.	30,60,90
B1-LKD	Stutt. Reibungsmesser (CH)	blockiert	längs-P	100	30,60,90
B1-SLP	Stutt. Reibungsmesser (CH)	konstanter Schlupf	längs-P	20	30,60,90
B2-LKD	Skiddometer BV-8 (CH)	blockiert	längs-P	100	30,60,90
B2-SLP	Skiddometer BV-8 (CH)	konstanter Schlupf	längs-P	20	30,60,90
B3	Skiddometer BV-11 (S)	konstanter Schlupf	profiliert	20	30,60,90
B4E-SLP	Norsemeter OSCAR (N)	konstanter Schlupf	glatt-A	20	30,60,90
B4E-SWP	Norsemeter OSCAR (N)	variabler Schlupf	glatt-A	0-90	30,60,90
B5-ABS	Stutt. Reibungsmesser (A)	optimaler Schlupf	längs-P	opt.	30,60,90
B5-LKD	Stutt. Reibungsmesser (A)	blockiert	längs-P	100	30,60,90
B5-SLP	Stutt. Reibungsmesser (A)	konstanter Schlupf	längs-P	20	30,60,90
B6-501	ASTM E-274 Trailer (US)	blockiert	längs-A	100	65
B6-524	ASTM E-274 Trailer (US)	blockiert	glatt-A	100	30,65,90
B6-CHP	ASTM E-274 Trailer (US)	Trockenspitze	profiliert	Spitze	65
B6-ULT	ASTM E-274 Trailer (US)	blockiert trocken	glatt-A	100	10
B7	British Pendulum (CH)	Gleiter	glatt	100	10
B10E	MuMeter (E)	Seitenkraft	profiliert	13 (7.5°)	80
C1	Skid Resistance Tester (P)	blockiert	profiliert	100	30,60,90
C3B	Flemish SCRIM (B)	Seitenkraft	glatt	34 (20°)	30,60,90

C3E	CEDEX SCRIM (E)	Seitenkraft	glatt	34 (20°)	30,60,90
C4	KOMATSU Skid Tester (J)	variabler Schlupf	glatt-A	10-30	30,50,60
C5	DWW Trailer (NL)	konstanter Schlupf	glatt-P	86	30,50,90
C6E	MOPT SCRIM (E)	Seitenkraft	glatt	34 (20°)	30,60,90
C8	Stradograph (DK)	Seitenkraft	glatt-P	21 (12°)	30,60,90
C9	Waloon Odoliograph (B)	Seitenkraft	glatt-P	26 (15°)	30,50,90
C10	CRR Odoliograph	Seitenkraft	glatt-P	34 (20°)	30,50,90
D1E	SCRIM (D)	Seitenkraft	glatt	34 20°	40,60,90
D2	GEOCISIA SCRIM (E)	Seitenkraft	glatt	34 (20°)	30,60,80
D3	SCRIM (F)	Seitenkraft	glatt	34 (20°)	30,60,80
D4	SUMMS (I)	Seitenkraft	glatt	34 (20°)	30,60,80
D5	SCRIMTEX (UK)	Seitenkraft	glatt	34 (20°)	30,50,90
D6	LCPC Trailer (F)	blockiert	glatt-P	100	40,60,90
D7B	PETRA (D)	variabler Schlupf	profiliert	0-100	30,60,90
D8	GRIPTESTER (UK)	konstanter Schlupf	glatt	14.5	5,30,65,90

längs-P= PIARC-Reifen mit Längsrillen

glatt-P= PIARC-Reifen profillos

längs-A= ASTM-Reifen mit Längsrillen (E-501)

glatt-A= ASTM-Reifen profillos (E-524)

profiliert= Reifen mit verschiedenen Profilen

*Tabelle 6: Teilnehmende Reibungsmesser*

In der nachstehenden Tabelle sind die teilnehmenden Texturmessgeräte aufgeführt:

Bezeichnung	Name	Messart*	Geschwindigkeit km/h
A1	FHWA Texture Van (US)	RMS	30
A2	VTI Mobile Profilometer (S)	RMS,ETD,TDMA,MPD	36
A3B	ARAN (CAN)	MPD,RMS	30,60,80
A3E	AEPO RST (E)	Makro-/Megatextur	30
A4	CRR Mobile Profilometer (B)	MPD,RMS	30,36,72
A5	CRR Stationary Profilometer (B)	MPD,RMS	0
A8	ASTM E-965 Sandpatch (US)	MTD	0
A12	ROSAN (US)	MTD (berechnet)	5
B8	Outflow Meter (CH)	Ausflusszeit	0
B11E	Outflow Meter (US)	Ausflusszeit	0
D2	GEOCISA SCRIM (E)	MTD (berechnet)	60
D3	SCRIM (F)	RC,RA,RQ	60
D4	SUMMS (I)	MTD (berechnet)	50
D5	SCRIMTEX (UK)	MTD (berechnet)	50

\* siehe Kapitel 4

*Tabelle 7: Teilnehmende Texturmessgeräte*

Ursprünglich war vorgesehen, dass jedes Land nur mit einem Gerät teilnehmen würde. Da aber einige Länder mehrere Gerätetypen benutzen, nahmen sie verschiedentlich auch mit mehreren Geräten teil. Wie auch immer, Geräte, die am Experiment teilnahmen können benutzt werden, um andere Geräte zu kalibrieren.

Es war wichtig, dass alle wichtigen Typen von Textur- und Reibungsmessgeräten vertreten waren, und möglichst alle Typen sollten auf allen Strecken messen.

Zum Zweck des Experiments wurden die Geräte wie folgt kategorisiert:

Reibung:

- Seitenkraft
- Variabler Schlupf
- Konstanter Schlupf
- Blockiertes Messrad

Textur:

- Stationär
- Mobile Messungen im Fussgängertempo
- Mobile Messungen mit hoher Geschwindigkeit

### **4.3 Ablauf der Messungen**

Die Messgruppen versammelten sich auf der Rennstrecke in Zolder, Belgien. Dort wurden drei Tage verbracht, um den Messablauf zu organisieren, die Funktionstüchtigkeit der Geräte zu überprüfen und den Zeitbedarf der einzelnen Geräte festzulegen. Die Geräte wurden in Gruppen eingeteilt und die Reihenfolge der Messungen wurde festgelegt. Es war geplant, in jedem der beiden Länder über zwanzig Strecken zu messen. Mindestens zwei Strecken wurden pro Tag vollständig gemessen. Dafür wurden die Geräte in zwei Hälften aufgeteilt, die am Vormittag jeweils auf einer Strecke Messungen durchführten. Am Nachmittag wurde dann gewechselt. Die jeweiligen Wechsel und Messungen wurden so schnell wie möglich durchgeführt, um grosse Temperatur- und andere Änderungen, die im Laufe des Tages auftreten könnten, zu minimieren. Idealerweise hätten alle Geräte die Messungen auf einer Strecke in der gleichen Tageshälfte beenden sollen. Aufgrund der grossen Anzahl war das nicht praktikabel. Aus diesem Grund wurde auch auf allen Strecken in Belgien vor und nach den Messungen eine wiederholte Pendelmessung (BPT oder SRT) durchgeführt, um so herauszufinden, ob sich durch die Messungen allfällige Änderungen in der Mikrotextur ergaben. Gleichzeitig wurden auch die lokalen klimatischen Bedingungen während der Testperiode dokumentiert.

Jeder Reibungsmesser führte, wenn möglich, Messungen bei 30, 60 und 90 km/h durch. Die Geschwindigkeit, die am nächsten bei der normalen Messgeschwindigkeit lag, wurde durch diese ersetzt. Jeder Test sollte viermal wiederholt werden und zusätzliche Durchläufe wurden gemacht, wenn eines der individuellen Resultate um mehr als die zweifache Standardabweichung vom Mittel abwich. Um dies zu erreichen, wurde auf jeder Strecke bei jeder Geschwindigkeit zweimal gemessen, wobei die Strecken in zwei Sektionen (A und B) unterteilt waren. Texturmessungen wurden vor den Reibungsmessungen durchgeführt, das heisst bevor Wasser aufgetragen wurde.

Die Reihenfolge der Reibungsmesser erfolgte gemäss steigendem Wasserbedarf für jedes Gerät. So konnte die Trocknungszeit zwischen den Tests minimiert werden. Jedes Gerät kehrte dann zum Start zurück, indem es durch das selber aufgebrauchte Wasser fuhr. Die half zusätzlich die Trocknungszeiten zu minimieren.

Die zu messende Linie war immer eine der beiden befahrenen Fahrspuren. Generell war es die rechte Fahrspur; dort wo das für die Geräte mit dem Messrad auf der linken Seite aus Platzgründen nicht möglich war, wurde die linke Fahrspur ausgewählt.

Die Testspur wurde jeweils mit Farbpunkten im Abstand von 25 cm von der Spurmitte markiert. Daran konnten sich die Fahrzeuge orientieren, so dass die Messräder oder Sensoren die Messspur mit einer Toleranz von 50 cm einhalten konnten. Der Einfluss all-fälliger Reibungs- oder Texturunterschiede im Strassenquerschnitt sollten so möglichst reduziert werden. Diese 50 cm ergaben sich aus der Mindesttoleranz, die einige der grösseren Geräte einhalten konnten. Jedenfalls war die Unsicherheit bezüglich der Position im Querschnitt nicht grösser als in der normalen Messpraxis, in den meisten Fällen war sie sogar besser oder mindestens gleich. Unsicherheit muss in der Tat als eine wesentliche Fehlerkomponente für ein Messgerät oder eine Testmethode in Betracht gezogen werden.

Die Strecken wurden gemäss nachfolgender Skizze gestaltet. Die Markierungen sollten sicherstellen, dass Messungen am gleichen Ort stattfanden. Kontinuierliche Messungen wurden vom Anfang bis zum Ende aufgezeichnet.

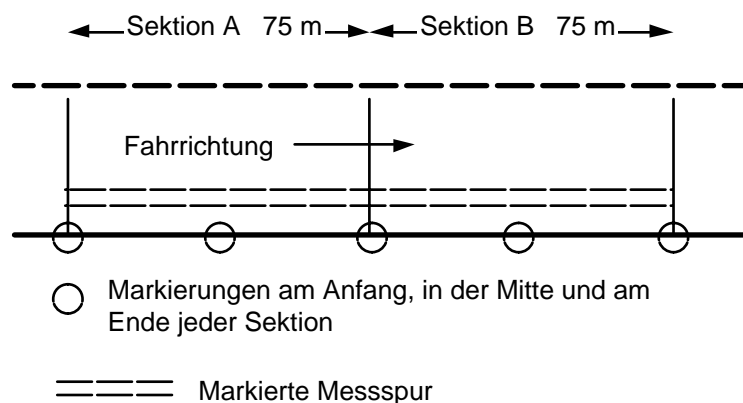


Figure 2: Schematische Skizze der Teststrecken

Diskontinuierliche Messungen wurden mindestens am Anfang und in der Mitte, meistens aber an verschiedenen Stellen beider Sektionen aufgenommen. Zusätzlich wurde die Messspur mit gestrichelten Linien markiert.

#### 4.4 Versuchsprogramm

Die eigentlichen Messungen fanden an den folgenden Daten statt:

12.9.92 bis 2.10 92	Messungen in Belgien
11.10.92 bis 30.10 92	Messungen in Spanien

## **4.5 Ablauf der Versuche**

Ursprünglich wurde von zwei Gruppen ausgegangen. Das grosse Interesse und die grosse Anzahl von Messgeräten erforderte aber die Bildung von vier Gruppen (A, B, C und D).

In Belgien wurden die Pendelmessungen so organisiert, dass ein Pendel am Anfang und ein Pendel nach Abschluss der Reibungsmessungen eingesetzt wurde. In Spanien wurden die Pendelmessungen unmittelbar hintereinander durchgeführt, damit eine Korrelation zwischen den beiden Pendeln erarbeitet werden konnte.

Die Gruppen führten die Versuche in Belgien, in Spanien und auf Wallops in unterschiedlicher Reihenfolge durch. Der Ablauf innerhalb der einzelnen Gruppen blieb jedoch immer derselbe (gemäss Kap. 2.3).

In Belgien war der Ablauf wie folgt: Gruppe A und C machten ihre Messungen am Vormittag auf zwei verschiedenen Strecken und wechselten sich am Nachmittag ab. Ebenso waren die Gruppen B und D auf zwei anderen Strecken im Einsatz. Am nächsten Tag waren A und C auf den Strecken tätig, die B und D am Vortag gemessen hatten und umgekehrt.

In Spanien war der Ablauf wie folgt: A und B führten ihre Messungen am Vormittag auf der gleichen Strecke durch, zuerst Gruppe A, dann Gruppe B. C und D führten ihre Messungen in ähnlicher Weise auf einer anderen Strecke durch. Am Nachmittag wurde dann jeweils auf die Strecke der anderen beiden Gruppen gewechselt. Diese Änderung im Ablauf war nötig, weil es in Spanien nicht möglich war wie in Belgien, jeweils vier Strecken gleichzeitig für zwei Tage für den Verkehr zu sperren.

In Moron führte Gruppe A ihre Messungen am Abend durch, während B, C und D am nächsten Tag ihre Messungen durchführten. Sobald Gruppe B fertig war, wechselte sie zur nächsten Strecke, dann kam Gruppe C an die Reihe und wechselte dann ebenfalls, während Gruppe D ihre Messungen in Angriff nahm. In Rota waren zuerst die Gruppen A und B im Einsatz, A rechts der Mitte der Flugpiste, B links der Mitte. Nach Abschluss wechselten sie zur nächsten Strecke, während C auf der rechten Seite und D auf der linken Seite fortfuhren.

## **4.6 Wiederholungsmessungen**

Die Versuchsdurchführung war so angelegt, dass bei den Reibungsmessgeräten vier Wiederholungsmessungen bei drei Geschwindigkeiten vorhanden waren. Die Strecken waren in zwei Sektionen A und B aufgeteilt, um pro Durchlauf zwei gemittelte Messwerte zu erhalten. Mit dem zweiten Durchlauf ergaben sich somit vier Werte. Jeder Abschnitt A und B wurde daraufhin geprüft, ob sie als gleich eingestuft werden können. Strecken, bei denen die beiden Abschnitte nicht als statistisch gleich behandelt werden konnten, wurden eliminiert, bevor die Wiederholbarkeitsanalyse durchgeführt wurde.

## **4.7 Datenreport**

Die Messergebnisse aller Geräte wurden einer gemeinsamen Datenbank zugeführt. Dort finden sich neben den Messungen jedes Gerätes weitere Angaben (wie Klima, Strecke etc.) abgespeichert. Jeder Teilnehmer erhielt die eigenen Testergebnisse auf Diskette mit zusätzlichen Angaben wie etwa Wetterverhältnisse, spezielle Kommentare etc.

## 5 Statistiken, Variationen und Wiederholbarkeit

Das Experiment resultierte in einer grossen Datenmenge, die in einer Datenbank organisiert wurde. Die Gültigkeit dieser Daten wurde durch statistische Methoden, die in diesem Kapitel beschrieben sind, überprüft. Zusätzlich benötigten die vielen Beziehungen, die entwickelt und ausgewertet wurden, um die Ziele dieses Forschungsprojektes zu erreichen, eine statistische Grundlage für beide diese Vorgänge. Diese statistischen Verfahren und einige der Resultate sind in diesem Kapitel aufgeführt.

### 5.1 Statistische Methoden

#### 5.1.1 Formulierung der Ziele

Das Experiment wurde unter anderem mit der Absicht konzipiert, die Wiederholbarkeit von Reibungs- und Texturmessungen für jedes teilnehmende Gerät zu ermitteln. Zusätzlich sollte eine Datenbank geschaffen werden, die es erlaubt, die Beziehungen zwischen den verschiedenen Geräten zu entwickeln und auszuwerten. Diese beiden Hauptziele und die dazu passenden statistischen Methoden werden in den folgenden Abschnitten dargelegt.

#### 5.1.2 Wiederholbarkeit der Messungen

Jeder Teilnehmer in diesem Versuch war angewiesen, wiederholte Messungen für jeden Streckenabschnitt durchzuführen. Wo immer möglich, wurde dies auch so gehandhabt. Die Zusammenarbeit in dieser Hinsicht klappte hervorragend und als Resultat erlaubt nun die Datenbank eine genaue Ermittlung der Wiederholungsgenauigkeit der Messgeräte. Das Konzept des Versuches gründete auf dem Bedarf nach einem breiten Bereich an Werten für die Faktoren, welche die Messgenauigkeit beeinflussen könnten.

Es gibt zwei gemeinhin benutzte Arten, die Variabilität der Messungen eines Gerätes zu ermitteln. Die erste ist die Standardabweichung, SD (= Standard Deviation) oder  $\sigma$  (die wahre, aber normalerweise unbekannte Standardabweichung). Im vorliegenden Fall wird eine kombinierte Schätzung der empirischen Standardabweichung (SD) ermittelt. Die Standardabweichung bei verschiedenen Bedingungen, z. B. unterschiedliche Geschwindigkeiten oder Reibungsklassen, ist von besonderem Interesse und die passenden, kombinierten Ergebnisse für die geschätzte Standardabweichung unter diesen Bedingungen wurde für jedes Gerät ermittelt.

Ein zweites Mass für die Variabilität ist der Variationskoeffizient (CV). Er wird normalerweise in Prozenten ausgedrückt, d.h. die Standardabweichung mal 100 geteilt durch den Mittelwert. Das ist aus zwei Gründen hilfreich. Erstens ist der Variationskoeffizient dimensionslos und für eine Beurteilung kann unabhängig der Umstände davon ausgegangen werden, dass ein Variationskoeffizient kleiner als 10% zu erhoffen ist. Die Tatsache, dass die Grösse dimensionslos ist, bedeutet, dass die für die Messungen gewählte Einheit keinen Einfluss auf den CV hat. Ein anderer Grund, den CV als Mass für die Variabilität beizuziehen, ergibt sich, wenn die Standardabweichung einer Messung proportional zu den Messwerten ist, was oft der Fall ist.

Tabellen mit den empirischen Standardabweichungen und den Grenzen der 95% Vertrauensintervalle finden sich im Abschnitt 3.5.

Ein Vertrauensintervall ist ein gutes Mittel, um die Unsicherheit einer Schätzung eines unbekanntes Parameters darzustellen. Beispielsweise ist es vernünftig, anzunehmen, dass die gemessenen Reibungswerte eines Gerätes auf einer Strecke eine normale Zufallsvariable ( $X$ ) darstellen und dass:

$$X = \mu + z$$

Gl. 6

wobei  $z$  (Fehlerzufallsvariable) ein Mittel von 0 hat und eine Standardabweichung. Und  $\mu$  ist die wahre, aber unbekanntes Reibung der interessierenden Strecke.  $z$  und  $\mu$  sind die interessierenden unbekanntes Parameter, die mit einem Punkt, einem Vertrauensintervall oder beidem geschätzt werden können. In der Praxis ist vor allem die Schätzung von  $\mu$  von Interesse, im vorliegenden Experiment interessieren beide und es ist  $z$ , das geschätzt wird und in den Tabellen bei verschiedenen Bedingungen angegeben ist.

Die Definition des 95% Vertrauensintervalles lautet wie folgt:

Zu sagen, dass ein gegebenes Intervall ein 95%-Vertrauensintervall für einen unbekanntes Parameter ist, bedeutet, dass auf diese Weise ermittelte Intervalle den wahren Wert des unbekanntes Parameters zu 95% enthalten.

Darum wird auch von einem Vertrauensintervall und nicht von einem Wahrscheinlichkeitsintervall gesprochen. Für die praktische Anwendung mag es aber auch als Wahrscheinlichkeitsintervall für den interessierenden Parameter betrachtet werden.

### 5.1.3 Beziehung zwischen den Messwerten verschiedener Geräte

Die Geräte aus all den verschiedenen Ländern wurden mit der Absicht zusammengebracht, dass sie die Nassreibung und die Textur einer Strecke unter näherungsweise denselben Bedingungen und zum praktisch gleichen Zeitpunkt messen sollten. Fragen bezüglich der möglichen Änderungen der Oberfläche durch die Messungen selber, wurden in verschiedenen Analysen berücksichtigt. Die beobachteten Unterschiede zwischen dem ersten und dem zweiten Durchlauf eines Gerätes können Informationen in dieser Hinsicht beinhalten. Die Analyse dieser Unterschiede wurde an der Technischen Universität in Berlin durchgeführt und ist im Kapitel 3.4 dargestellt.

Die Versuche auf einer Strecke waren im Allgemeinen innerhalb von zwei Tagen abgeschlossen. In Belgien wurden jeweils die allererste und die allerletzte Messung auf einer Strecke von einem der beiden Pendel durchgeführt. Die beobachteten Differenzen zwischen diesen beiden Messungen enthalten Informationen über mögliche Veränderungen, die durch den Test verursacht worden sein könnten. Die Analyse dieser Messungen befindet sich im Kapitel 5.3, Änderungen an den Streckeneigenschaften während oder aufgrund der Messungen.

Alle Strecken wurden daraufhin geprüft, ob die beobachteten Unterschiede der Messungen von Sektion A und Sektion B innerhalb des Bereiches lagen, der erwartet werden konnte, wenn die Sektionen in Wahrheit gleich waren. Wann immer die beobachteten Differenzen - Textur oder Reibung - ausserhalb dieses Bereiches lagen, sollten die Sektionen als unterschiedlich betrachtet werden. Die Resultate dieser Analyse finden sich im Kapitel 5.2, Variationen zwischen den Sektionen einer Strecke.

### 5.1.3.1 Reibung

Nachdem gezeigt werden konnte, dass der Zeitpunkt eines einzelnen Durchlaufes keine signifikanten Unterschiede hervorrief, war die lineare Korrelation mit jeweils zwei Vergleichsdaten eines der ersten Dinge, die zur Analyse der Daten beigezogen wurde. Diese Korrelation misst die Güte der Übereinstimmung, wenn den Datenpaaren eine lineare Beziehung bzw. eine gerade Linie zugeordnet wird. Ein Wert um 1 würde somit anzeigen, dass dieses Modell einer geraden Linie sehr gut zu den Daten passt und der Messwert eines Gerätes könnte dann sehr genau den Messwert eines anderen Messgerätes voraussagen. Ein tiefer Wert bedeutet, dass eine Gerade keine gute Korrelation ergibt. Ein Blick auf den Graphen ermöglicht dann allenfalls eine Beurteilung, ob eine andere Funktion eine bessere Übereinstimmung ergibt oder ob die Daten eine breite Streuung, eine diffuse Punktwolke, aufweisen. Eine breite Streuung im Graphen bedeutet, dass ein Messwert nicht aus einem anderen Messwert ermittelt werden kann ohne zusätzliche Informationen. Wenn also beispielsweise die Daten eines SCRIM und die Daten eines Gerätes mit blockiertem Messrad eine breite Streuung aufweisen, könnte das bedeuten, dass eine dieser Reibungsmessungen zusätzliche Texturinformationen benötigt, damit die andere Reibungsmessung vorausgesagt werden kann.

Die Korrelationen der Nassreibungsgeräte variierten von sehr tiefen bis zu sehr hohen Korrelationen. Es wäre zu erwarten gewesen, dass die typengleichen Geräte, z.B. die SCRIM's, untereinander sehr hohe Korrelationen aufweisen würden. Die 33 Reibungsgeräte produzierten 528 Datenpaare mit den entsprechenden Korrelationen. Das bedeutet eine grosse Datenmenge, die in Betracht gezogen werden muss. Wenn aber die Korrelation eines Paares hoch ist und auf einer genügend grossen Datenmenge beruht, dann bedeutet das, dass ein einfaches lineares Modell genügt, um die Messungen zueinander in Beziehung zu setzen.

Wenn die Korrelation zweier Nassreibungsgeräte tief ist (um die 0.7 oder weniger), dann wird das einfache lineare Modell nicht genügen, um die beiden Geräte zu kalibrieren. Wie erwähnt empfiehlt es sich in einem solchen Fall, den Graphen zu betrachten, um allenfalls zu sehen, ob zwischen den beiden Messungen möglicherweise eine nichtlineare Beziehung existiert. Dann wären nichtlineare Modelle zu überprüfen. Deutet der Graph auf eine breite Streuung, dann muss in Betracht gezogen werden, dass allenfalls weitere Informationen nötig sind, um die Messungen der beiden Geräte in Beziehung zu setzen. Die Möglichkeiten sind fast unbegrenzt, aber nur Dinge, die vom Ingenieurstandpunkt aus als vernünftig zu betrachten sind, sollten untersucht werden. Beispielsweise erscheint es vernünftig, Texturmessungen, welche die meisten SCRIM's ohnehin liefern, in einem Modell beizuziehen, um den Gerätevergleich mit einem Reibungsmesser mit blockiertem Messrad durchzuführen.

Die Modellierung der Messungen eines Gerätes zu den Messungen eines anderen Gerätes ist eine statistische Kalibration dieser Geräte. Wenn aber ein akzeptierter „Goldener Standard“ existiert, dann ist eine angepasste Gleichung, mit der die Messungen irgendeines Gerätes in Messgrössen des Goldenen Standards umgerechnet werden können, eine Kalibration des Gerätes zum Goldenen Standard. Innerhalb des vorliegenden Projektes sind verschiedene statistische Kalibrationen von Interesse, aus denen die Harmonisierung der

Messgeräte resultiert. Anstatt ein einzelnes Gerät zum Goldenen Standard zu erklären, konnte eine zusammengesetzte Messung entwickelt und als Goldener Standard betrachtet werden, zu dem dann alle der Messungen kalibriert wurden.

### **5.1.3.2 Textur**

Als erster Ansatz zur Kalibration der Texturmessgeräte wäre es gut, die Beziehung der Messungen der einzelnen Geräte zur mittleren Texturtiefe (MTD = Mean Texture Depth), wie sie mit der volumetrischen (Sand-) Fleckmethode gemessen wird, in Betracht zu ziehen. Wenn die Messungen jedes Texturmessgerätes mit einer linearen Gleichung in Beziehung zur Fleckmethode gebracht werden könnte, würde das zu einer Standardisierung oder Kalibration der Geräte führen. Sehr hohe Korrelationen zwischen der volumetrischen Fleckmethode und den anderen Texturmessgeräten würden darauf hinweisen, dass dies ein sinnvoller Ansatz wäre. Dies würde dann auch ein ausgezeichnetes Mittel darstellen, um in Zukunft andere Geräte, die am Experiment nicht teilnahmen, zu kalibrieren. Falls dies nicht zutrifft, muss eine andere Messung oder eine Gruppe von Messungen als Standard in Betracht gezogen werden.

Die Frage nach den Beziehungen der einzelnen Texturmessgeräte untereinander kann am besten anhand der Daten aus dem Experiment untersucht werden. Die hohen Korrelationen zwischen den Geräten deuten darauf hin, dass ein lineares Modell sehr gut zu den Texturdaten aus dem Experiment passt. Diese linearen Gleichungen finden sich in den Kapiteln 6 und 8.

## **5.2 Variationen zwischen den Sektionen einer Strecke**

Alle Strecken wurden daraufhin geprüft, ob die Sektionen A und B statistisch gleich waren. Sowohl Reibung wie auch Textur wurden daraufhin überprüft. Der standardisierte Unterschied - dieser entspricht einem Test auf Normal- oder T-Verteilung - zwischen den Sektionen wurde überprüft.

Die Texturmessungen deuteten darauf hin, dass die Sektionen von 10 Strecken als unterschiedlich zu betrachten sind.

In ähnlicher Weise wurden T-Tests für die Reibung durchgeführt und ergaben für 6 Strecken unterschiedliche Sektionen.

Zwei Strecken fielen bei beiden Verfahren durch.

Wie auch immer, alle Strecken, die einem der Verfahren nicht standhielten, wurden behandelt, als seien sie verschieden, wenn Wiederholungen durchgeführt wurden, ansonsten wurden A und B für alle Analysen getrennt behandelt.

### **5.3 Änderungen an den Streckeneigenschaften während oder aufgrund der Messungen**

Es gab Bedenken, dass die Reibungsmessungen die Oberflächen der Strecken polieren könnten und dass deshalb die Streckeneigenschaften während dem Experiment geändert würden. Um diesen Sachverhalt abzuklären, wurde eine zweiteilige Studie durchgeführt.

Zwei Pendel wurden für diese Studie beigezogen: Der SRT- Pendel aus der Schweiz (B7) und ein BPT- Pendel aus den USA (A14). Die beiden Geräte hatten ein identisches Design, waren aber mit unterschiedlichen Gummigleitkörpern ausgerüstet. Das amerikanische Modell hatte Gleitkörper aus ASTM - Gummi, die schweizerischen Gleitkörper bestanden aus Naturgummi. Aus diesem Grunde ergaben sich unterschiedliche Messwerte, aber die Ergebnisse hatten eine gute Korrelation. Die Pendel wurden benutzt, um einen allfälligen Effekt festzustellen, weil sie vor allem sensitiv bzgl. Mikrotextrur sind: Ein allfälliger Effekt durch das Experiment würde sich mit hoher Wahrscheinlichkeit in einer Änderung der Mikrotextrur äussern.

Das Testprogramm in Belgien sah vor, dass ein Pendel die allererste Messung auf einer Strecke durchführte und das andere Pendel die allerletzte. Die Messstellen des ersten Gerätes wurden an allen zehn Messpunkten am Strassenrand markiert, so dass das andere Gerät am Schluss mehr oder weniger an den gleichen Stellen seine Messungen durchführte. In jeder Sektion einer Strecke wurden fünf Messungen durchgeführt, die dann gemittelt wurden, so dass für jede Sektion der Strecken ein Anfangs- und ein Endwert vorlagen. Zusammengenommen ergaben sich 18 Strecken, für deren Sektionen Anfangs- und Endwerte vorlagen, so dass sich 35 Datenpaare ergaben (Ein Pendel verpasste eine Sektion).

Da die Anfangs- und Endwerte mit unterschiedlichen Geräten und unterschiedlichen Gummigleitkörpern ermittelt wurden, wurde ein Versuch unternommen unter Beizug einiger Kalibrationsplatten eine Korrelation beider Geräte zu ermitteln. Da zuwenig solche Platten vorlagen, wurde entschieden, dass eine ausgedehntere Studie nötig war, um eine adäquate Kalibration zu finden. Da der Messplan in Spanien nicht notwendigerweise eine Anfangs- und Endmessung mit beiden Pendeln vorsah, wurde entschieden, die Pendelmessungen in Spanien soweit möglich zur gleichen Zeit an derselben Stelle durchzuführen. Nachdem eines der Pendel seine Messung beendet hatte, wurde in der Mitte des Messpunktes ein Stein platziert, so dass das zweite Gerät seine Messung am gleichen Punkt zentrieren konnte. Zusammengenommen waren es 19 Strecken, die 37 Datenpaare lieferten. Auch in Spanien verpasste eines der Geräte eine Sektion.

Um die Anfangs- und Endmessungen zu vergleichen, müssen alle Werte auf das gleiche Gerät verweisen. Aus den Daten in Spanien ergab sich die folgende Regressionsgleichung:

$$BPN (B7) = 7.23 + 0.716 * BPN (A14)$$

Gl. 7

Der Korrelationskoeffizient (R) betrug 0.83. Die obige Gleichung wurde benutzt, um den BPN - Wert für jede Messung mit dem amerikanischen Gerät abzuschätzen. Der daraus folgende mittlere Unterschied zwischen Anfangs- und Endmessung betrug -0.64, was auf eine leichte Tendenz zum Polieren der Oberfläche hinweist. Die empirische Standardabweichung des Mittels beläuft sich auf 1.20 und die T-Statistik ergab einen Wert von 0.533. Der resultierende P-Wert aus der Nullhypothese beläuft sich auf 0.595. Das deutet darauf hin, dass die beobachtete Änderung keine statistische Signifikanz aufweist.

In der nachstehenden Tabelle sind die Daten der Pendelmessungen in Belgien wiedergegeben.

Strecke / Sektion	Gerät 1	Gerät 2	Differenz
1A	A14	B7	2.4
2A	A14	B7	-7.7
2B	A14	B7	-8.9
4A	B7	A14	-0.8
4B	B7	A14	-1.6
6A	A14	B7	-2.9
6B	A14	B7	-5.2
8A	B7	A14	-4.6
8B	B7	A14	-1.9
9A	B7	A14	7.7
9B	B7	A14	11.8
10A	A14	B7	-12.4
10B	A14	B7	-10.9
11A	B7	A14	-1.8
11B	B7	A14	-5.6
12A	A14	B7	10.0
12B	A14	B7	5.2
13A	B7	A14	5.8
13B	B7	A14	8.5
15A	A14	B7	-0.5
15B	A14	B7	-9.6
17A	B7	A14	10.9
17B	B7	A14	12.2
18A	A14	B7	-5.6
18B	A14	B7	-8.9
19A	B7	A14	-14.8
19B	B7	A14	2.7
21A	A14	B7	-3.3

21B	A14	B7	2.8
32A	A14	B7	-0.1
32B	A14	B7	-4.3
40A	A14	B7	4.2
40B	A14	B7	-2.2
42A	B7	A14	3.0
42B	B7	A14	2.5

Tabelle 8: Pendelraten der Strecken in Belgien

## 5.4 Variation zwischen zwei Durchgängen

Eine statistische Analyse der Variationen zwischen verschiedenen Durchläufen wurde von Professor Huschek an der Technischen Universität in Berlin durchgeführt. Er berichtet:

- 1. Die Unterschiede zwischen dem ersten und dem zweiten Durchlauf wurden für Spanien und Belgien getrennt und dann auch kombiniert überprüft. Der T-Test wurde angewandt und für die Geräte, die mehrere Durchläufe durchführten, wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen dem ersten und dem zweiten Durchlauf festgestellt (95% Vertrauenswahrscheinlichkeit).
- 2. Aufgrund der Differenzen zwischen den Durchläufen wurde auch nachgeprüft, ob Ausreisser vorhanden sind. Die meisten Geräte hatten keine, einige einen oder zwei.

Diese Analyse zeigte, dass zwischen den Durchläufen keine signifikanten Unterschiede bestanden und darum auch das vorhandene Wasser auf den Sektionen keinen Einfluss hatte. Die nachstehenden Tabellen enthalten die Variationen zwischen den Durchgängen.

Tiefe Geschwindigkeit							
Gerät	Land	n	dx	SD	Idxl	OL	SIGN
B1-ABS		0					
B1-LKD	Belgien	24	-0.0008	0.0217	0.0158	0	NO
	Spanien	16	-0.0053	0.0281	0.0209	0	NO
	Beide	40	-0.0026	0.0242	0.0179	0	NO
B1-SLP	Belgien	24	-0.0063	0.0431	0.0338	0	NO
	Spanien	22	-0.0159	0.0332	0.0282	0	NO
	Beide	46	-0.0109	0.0386	0.0311	0	NO
B2-LKD		0				0	

B2-SLP		0				0	
B3	Belgien	31	0.0102	0.0480	0.0445	1	NO
	Spanien	32	0.0064	0.0300	0.0248	0	NO
	Beide	63	0.0082	0.0395	0.0345	1	NO
B4E-SLP	Spanien	0				0	
B4E-SWP	Belgien	0				0	
B5-ABS		0					
B5-LKD	Belgien	29	-0.0010	0.0364	0.0279	0	NO
	Spanien	27	0.0094	0.0259	0.0202	0	NO
	Beide	56	0.0040	0.0319	0.0242	0	NO
B5-SLP	Belgien	30	-0.0065	0.0354	0.0268	0	NO
	Spanien	28	-0.0171	0.0352	0.0307	0	NO
	Beide	58	-0.0116	0.0354	0.0287	0	NO
B6-501	Belgien	0					
	Spanien	0					
	Beide	0					
B6-524	Belgien	32	0.0119	0.0231	0.0220	1	NO
	Spanien	32	0.0171	0.0291	0.0339	2	NO
	Beide	64	0.0146	0.0388	0.0279	2	NO
B6-CHP		0					
B6-ULT		0					
B10E		0					
C1	Belgien	28	0.0060	0.0220	0.0164	0	NO
	Spanien	32	0.0071	0.0204	0.0151	0	NO
	Beide	60	0.0066	0.0210	0.0157	0	NO
C3B	Belgien	29	0.0114	0.0210	0.0166	0	NO
C4	Belgien	26	0.0248	0.0324	0.0340	0	NO
	Spanien	31	-0.0018	0.0271	0.0263	1	NO
	Beide	57	0.0105	0.0323	0.0298	1	NO
C5	Belgien	33	-0.0020	0.0290	0.0215	0	NO
	Spanien	30	0.0109	0.0234	0.0197	0	NO
	Beide	63	0.0042	0.0271	0.0206	0	NO

C6E	Spanien	21	0.0049	0.0477	0.0369	0	NO
C8	Belgien	33	-0.0044	0.0414	0.0338	0	NO
	Spanien	32	-0.0023	0.0428	0.0437	2	NO
	Beide	65	-0.0034	0.0417	0.0387	2	NO
C9	Belgien	33	-0.0006	0.0441	0.0315	0	NO
	Spanien	25	-0.0056	0.0355	0.0300	0	NO
	Beide	58	-0.0028	0.0403	0.0309	0	NO
C10	Belgien	33	0.0015	0.0339	0.0276	0	NO
	Spanien	31	-0.0016	0.0361	0.0284	0	NO
	Beide	64	0.0000	0.0347	0.0280	0	NO
D1E	Spanien	23	0.0046	0.0332	0.0245	0	NO
D2	Belgien	28	0.0059	0.0253	0.0234	1	NO
	Spanien	25	0.0080	0.0301	0.0287	1	NO
	Beide	53	0.0043	0.0331	0.0259	2	NO
D3	Belgien	33	-0.0002	0.0278	0.0205	0	NO
	Spanien	25	0.0122	0.0364	0.0282	0	NO
	Beide	58	0.0052	0.0321	0.0238	0	NO
D4	Belgien	33	-0.0019	0.0156	0.0117	0	NO
	Spanien	32	0.0119	0.0180	0.0164	0	NO
	Beide	65	0.0049	0.0181	0.0140	0	NO
D5	Belgien	32	0.0054	0.0469	0.0325	0	NO
	Spanien	32	-0.0081	0.0370	0.0267	0	NO
	Beide	64	-0.0014	0.0425	0.0296	0	NO
D6	Belgien	33	-0.0029	0.0238	0.0165	0	NO
	Spanien	25	0.0018	0.0254	0.0170	0	NO
	Beide	58	-0.0009	0.0244	0.0167	0	NO
D8	Belgien	30	0.0068	0.0255	0.0202	0	NO
	Spanien	32	0.0102	0.0196	0.0201	1	NO
	Beide	62	0.0085	0.0226	0.0201	1	NO

Tabelle 9: Variationen zwischen den Durchgängen bei tiefer Geschwindigkeit





D3	Belgien	33	0.0031	0.0195	0.0220	2	NO
	Spanien	25	0.0076	0.0201	0.0164	0	NO
	Beide	58	0.0051	0.0197	0.0196	2	NO
D4	Belgien	34	0.0033	0.0155	0.0122	0	NO
	Spanien	32	0.0055	0.0178	0.0127	0	NO
	Beide	66	0.0044	0.0166	0.0124	0	NO
D5	Belgien	33	0.0040	0.0337	0.0267	0	NO
	Spanien	32	-0.0010	0.0310	0.0229	0	NO
	Beide	65	0.0032	0.0349	0.0248	0	NO
D6	Belgien	33	0.0018	0.0283	0.0194	0	NO
	Spanien	25	-0.0002	0.0202	0.0146	0	NO
	Beide	58	0.0009	0.0249	0.0173	0	NO
D8	Belgien	31	-0.0058	0.0188	0.0142	0	NO
	Spanien	32	0.0139	0.0291	0.0279	1	NO
	Beide	63	0.0063	0.0317	0.0212	1	NO

Tabelle 10: Variationen zwischen den Durchgängen bei mittlerer Geschwindigkeit

Hohe Geschwindigkeit.							
Gerät	Land	n	dx	SD	Idxl	OL	SIGN
B1-ABS							
B1-LKD	Belgien	22	0.0023	0.0468	0.0359	0	NO
	Spanien	17	-0.0059	0.0298	0.0274	1	NO
	Beide	39	-0.0012	0.0403	0.0322	0	NO
B1-SLP	Belgien	22	0.0133	0.0303	0.0323	1	NO
	Spanien	21	-0.0029	0.0159	0.0221	2	NO
	Beide	43	0.0056	0.0342	0.0273	1	NO
B2-LKD							
B2-SLP							
B3	Belgien	31	0.0024	0.0314	0.0253	0	NO
	Spanien	31	0.0047	0.0279	0.0182	0	NO
	Beide	62	0.0035	0.0295	0.0218	0	NO

B4E-SLP	Spanien	0				0	NO
B4E-SWP	Belgien	24	0.0194	0.0568	0.0438	0	NO
B5-ABS		0					
B5-LKD	Belgien	29	0.0043	0.0211	0.0248	2	NO
	Spanien	28	-0.0082	0.0247	0.0186	0	NO
	Beide	57	-0.0021	0.0236	0.0218	2	NO
B5-SLP	Belgien	30	-0.0013	0.0247	0.0170	0	NO
	Spanien	28	0.0082	0.0288	0.0225	0	NO
	Beide	58	0.0033	0.0269	0.0197	0	NO
B6-501	Belgien	0					
	Spanien	0					
	Beide	0					
B6-524	Belgien	32	0.0036	0.0277	0.0212	0	NO
	Spanien	31	0.0064	0.0228	0.0162	0	NO
	Beide	63	0.0050	0.0252	0.0188	0	NO
B6-CHP		0					
B6-ULT		0					
B10E		0					
C1	Belgien	27	0.0059	0.0233	0.0176	0	NO
	Spanien	30	0.0026	0.0159	0.0133	0	NO
	Beide	57	0.0042	0.0196	0.0154	0	NO
C3B	Belgien	28	0.0046	0.0157	0.0125	0	NO
C4	Belgien	0					
	Spanien	0					
	Beide	0					
C5	Belgien	33	0.0031	0.0273	0.0179	0	NO
	Spanien	29	-0.0039	0.0175	0.0142	0	NO
	Beide	62	-0.0002	0.0233	0.0162	0	NO
C6E	Spanien	20	0.0029	0.0327	0.0269	0	NO
C8	Belgien	34	0.0112	0.0262	0.0215	0	NO
	Spanien	31	0.0118	0.0283	0.0231	0	NO
	Beide	65	0.0115	0.0270	0.0222	0	NO

C9	Belgien	34	0.0112	0.0262	0.0215	0	NO
	Spanien	31	0.0118	0.0283	0.0231	0	NO
	Beide	65	0.0115	0.0270	0.0222	0	NO
C10	Belgien	33	0.0412	0.0862	0.0527	0	NO
	Spanien	30	0.0170	0.0618	0.0463	0	NO
	Beide	63	0.0297	0.0760	0.0497	0	NO
D1E	Spanien	22	0.0064	0.0161	0.0120	0	NO
D2	Belgien	28	0.0120	0.0163	0.0211	1	NO
	Spanien	21	0.0080	0.0171	0.0142	0	NO
	Beide	49	0.0122	0.0224	0.0181	1	NO
D3	Belgien	33	0.0094	0.0227	0.0197	0	NO
	Spanien	24	0.0022	0.0233	0.0225	1	NO
	Beide	57	0.0064	0.0230	0.0209	0	NO
D4	Belgien	29	0.0027	0.0214	0.0154	0	NO
	Spanien	28	0.0070	0.0147	0.0141	1	NO
	Beide	57	0.0048	0.0184	0.0148	0	NO
D5	Belgien	28	0.0065	0.0242	0.0185	0	NO
	Spanien	31	0.0095	0.0309	0.0255	0	NO
	Beide	59	0.0081	0.0277	0.0222	0	NO
D6	Belgien	33	-0.0014	0.0257	0.0190	0	NO
	Spanien	25	-0.0034	0.0256	0.0194	0	NO
	Beide	58	-0.0022	0.0255	0.0192	0	NO
D8	Belgien	28	0.0048	0.0209	0.0141	0	NO
	Spanien	30	0.0087	0.0166	0.0213	2	NO
	Beide	58	0.0067	0.0188	0.0178	4	NO

*Tabelle 11: Variationen zwischen den Durchgängen bei hoher Geschwindigkeit*

n Anzahl Resultate (0 bedeutet keine oder weniger als zehn Werte)

dx Mittlere Abweichung zwischen dem ersten und zweiten Durchgang

Idxl Absolutwerte

SD Standardabweichung der dx Werte

OL Anzahl Ausreisser

SIGN Es besteht eine signifikante Differenz zwischen dem ersten und zweiten Durchgang.

## **5.5 Wiederholbarkeit**

Die Wiederholbarkeit wurde aufgrund der Daten der einzelnen Sektionen und Durchläufe für jedes Reibungsmessgerät überprüft. Diese Tests wurden für verschiedene Reibungsklassen und die verschiedenen Geschwindigkeiten durchgeführt. Als Mass wurde die Standardabweichung mit dem 95% Vertrauensintervall benutzt. Die Daten finden sich in den folgenden Tabellen. Geräte mit einem grossen Intervall hatten oft eine ungenügende Datenmenge, so dass der Grund in erster Linie dort zu suchen ist.

### **5.5.1 Standardabweichung der Geräte gegenüber Geschwindigkeit**

Die Standardabweichung der mit den Reibungsmessgeräten gemessenen Reibung bei den verschiedenen Geschwindigkeiten findet sich in der folgenden Tabelle. Daraus ist ersichtlich, dass es kein generelles Verhaltensmuster bezüglich dem Einfluss der Geschwindigkeit gibt. Einige Geräte sind besser bei tiefen Geschwindigkeiten, einige bei hohen und bei anderen lässt sich überhaupt kein Trend ausmachen. Wie schon früher erwähnt, bewegen sich die meisten Standardabweichungen in einem vernünftigen Rahmen.

Diese Werte für die Standardabweichungen basieren in den meisten Fällen auf einer grossen Anzahl Wiederholungsmessungen (Sektionen, mehrere Durchläufe). Sie bilden die beste Grundlage, um die Wiederholbarkeit der Messungen der einzelnen teilnehmenden Geräte festzustellen. Die Anzahl Werte ist ebenfalls in den Tabellen angegeben und ist in den meisten Fällen genügend gross.

In der nachstehenden Tabelle sind die Standardabweichungen und die 95% Vertrauensintervalle gegenüber Geschwindigkeit enthalten.

Gerät	Geschwindigkeit km/h	Standard- abweichung	Anzahl Werte	Vertrauensintervall (95%)	
				untere Grenze	obere Grenze
B1LKD	30	0.018439	55	0.015545	0.022666
	60	0.0194	55	0.016356	0.023848
	90	0.029077	55	0.024514	0.035743
B1SLP	30	0.028716	63	0.02446	0.034779
	60	0.026024	62	0.022141	0.031571
	90	0.027592	58	0.023358	0.033716
B2LKD	30	0.021679	10	0.015147	0.038045
	60	0.050643	10	0.035385	0.088875
	90	0.012318	21	0.009477	0.017603
B2SLP	30	0.02	2	0.010413	0.125695
	60	0.007454	3	0.004223	0.027793
	90	0.001838	14	0.001346	0.002899
B3	30	0.035369	100	0.031073	0.041054
	60	0.0201	100	0.017659	0.023331
	90	0.021783	98	0.019114	0.025326
B4ESLP	60	0.031037	20	0.023745	0.04482
	90	0.04879	1	0.021768	1.556898
B5LKD	30	0.02466	86	0.021462	0.028988
	60	0.017879	89	0.015594	0.020954
	90	0.022735	86	0.019786	0.026725
B5SLP	30	0.029515	90	0.025762	0.034559
	60	0.026404	88	0.023013	0.030976
	90	0.023685	87	0.020628	0.027813
B6501LKD	65	0.044046	90	0.038445	0.051573
B6524LKD	30	0.036312	90	0.031694	0.042517
	65	0.030686	88	0.026745	0.035999
	90	0.026639	86	0.023184	0.031314

C1	30	0.018189	90	0.015876	0.021297
	60	0.016989	91	0.014839	0.019874
	90	0.015821	84	0.013748	0.018636
C1PEAK	30	5.68624	3	3.221195	3.221195
	60	4.30116	2	2.239431	2.239431
C3B	30	0.015429	46	0.012821	0.019379
	60	0.018351	50	0.015354	0.022812
	90	0.011677	33	0.009418	0.01537
C3E	30	0.021665	31	0.017369	0.028803
	60	0.029169	31	0.023385	0.03878
	90	0.019438	22	0.015033	0.027512
C4	30	0.028198	92	0.024646	0.032955
	60	0.02379	94	0.020821	0.027754
C5	30	0.020209	98	0.017733	0.023496
	50	0.02136	100	0.018766	0.024793
	90	0.016723	96	0.014655	0.019475
C6E	30	0.039969	33	0.032238	0.05261
	60	0.022309	30	0.017827	0.02982
	90	0.025749	24	0.020106	0.035821
C8	30	0.036593	104	0.032224	0.042343
	60	0.025368	102	0.022313	0.029399
	90	0.031007	97	0.02719	0.03608
C9	30	0.029686	88	0.025874	0.034826
	60	0.035653	88	0.031075	0.041826
	90	0.043339	85	0.037694	0.050997
C10	30	0.027523	100	0.02418	0.031947
	60	0.032629	92	0.028519	0.038134
	90	0.055165	98	0.048405	0.064136
D1E	30	0.02444	34	0.019769	0.032021
	60	0.021574	36	0.017544	0.028024
	90	0.014214	31	0.011395	0.018897
D2	30	0.020214	7	0.013365	0.04114

	60	0.017487	113	0.015474	0.020107
	90	0.018315	97	0.016061	0.021312
D3	30	0.025805	88	0.022491	0.030273
	60	0.022972	92	0.020078	0.026848
	90	0.019365	82	0.016801	0.02286
D4	30	0.014262	101	0.012537	0.016541
	60	0.0147	105	0.012952	0.016997
	90	0.022641	84	0.019674	0.026669
D5	30	0.031638	94	0.02769	0.036909
	50	0.03062	99	0.026885	0.03557
	90	0.020636	82	0.017904	0.02436
D6	30	0.017854	88	0.015561	0.020945
	60	0.017468	88	0.015225	0.020493
	90	0.019336	88	0.016853	0.022684
D7BPEAK	30	0.14459	8	0.097664	0.277002
	60	0.09815	3	0.055601	0.365957
	90		0		
D8	30	0.0279	102	0.024541	0.032333
	65	0.034313	102	0.030181	0.039766
	90	0.026964	94	0.023599	0.031457

*Tabelle 12: Standardabweichung und 95% Vertrauensintervalle vs Geschwindigkeit*

### 5.5.2 Standardabweichung der Geräte gegenüber Reibungsklassen

Die Standardabweichungen der von den Reibungsmessgeräten gemessenen Reibungswerte finden sich in der folgenden Tabelle - aufgeteilt nach Reibungsklassen. Es wurden drei Klassen geschaffen: tief, mittel, hoch (der mittlere Datensatz aufgeteilt in Drittel). Die Klassen der SCRIM's wurden nach dem Gerät D5 ausgerichtet. Sektionen wurden als "tief" eingestuft, wenn der Messwert von D5 weniger als 0.56 betrug, und als "hoch", wenn der von D5 gemessene Wert über 0.67 lag, Sektionen mit Werten zwischen 0.56 und 0.67 wurden als "mittel" klassifiziert.

Die anderen Gruppen waren die Geräte mit blockiertem und gerilltem Messrad, blockiertem und glattem Messrad, sowie die Geräte mit Schlupfmessungen. Die Referenzgeräte mit den entsprechenden Grenzwerten wurden wie folgt festgelegt:

Blockiertes und gerilltes Messrad:			
Gerät	tief	mittel	hoch
B6-501	tiefer als 0.40	0.40 bis 0.50	höher als 0.50

Blockiertes und glattes Messrad:			
Gerät	tief	mittel	hoch
B6-524	tiefer als 0.31	0.31 bis 0.50	höher als 0.50

Schlupf:			
Gerät	tief	mittel	hoch
-	-	-	-

Die Werte zeigen, dass in fast allen Fällen die Standardabweichungen in vernünftigen Grössenordnungen lagen. Diese gute Wiederholungsgenauigkeit für fast alle Geräte macht es möglich, die Geräte zu kalibrieren.

In der nachstehenden Tabelle sind die Standardabweichungen und 95% Vertrauensintervalle gegenüber Reibungsklassen

Gerät	Stufe	Standard- abweichung	Anzahl Werte	Vertrauensintervall (95%)	
				untere Grenze	obere Grenze
B1LKD	tief	0.019802	57	0.016741	0.024244
	mittel	0.022505	54	0.018946	0.027723
	hoch	0.025892	54	0.021798	0.031895
B1SLP	tief	0.013435	6	0.008657	0.029585
	mittel	0.025043	23	0.019464	0.035129
	hoch	0.019976	154	0.017973	0.022487
B2LKD	tief	0	4	0	0
	mittel	0.02341	17	0.017567	0.035095
	hoch	0.26426	20	0.202175	0.38161

B2SLP	tief	0	6	0	0
	mittel	0.006562	11	0.004648	0.011141
	hoch	0	2	0	0
B3SLP	tief	0.02977	91	0.026002	0.034825
	mittel	0.026992	105	0.023783	0.03121
	hoch	0.023189	102	0.020397	0.026874
B4ESLP	tief	0.033267	5	0.020766	0.081591
	mittel	0.019959	4	0.011958	0.057353
	hoch	0.034785	12	0.024944	0.057421
B5LKD	tief	0.016791	72	0.01444	0.020064
	mittel	0.023038	91	0.020122	0.02695
	hoch	0.024032	98	0.021087	0.02794
B5SLP	tief	0.024348	79	0.021072	0.02884
	mittel	0.031855	102	0.028019	0.036917
	hoch	0.021171	84	0.018397	0.024938
B6501	tief	0.011765	26	0.009265	0.016123
	mittel	0.014919	32	0.011998	0.019733
	hoch	0.061848	32	0.049737	0.081806
B6524	tief	0.019336	111	0.017093	0.022263
	mittel	0.041635	97	0.03651	0.048446
	hoch	0.027143	56	0.022916	0.033298
C1	tief	0.010061	73	0.008661	0.012006
	mittel	0.019562	85	0.017012	0.023019
	hoch	0.01824	107	0.016089	0.02106
C10	tief	0.044461	74	0.038308	0.052986
	mittel	0.02815	117	0.024959	0.032284
	hoch	0.045577	99	0.040017	0.052946
C3B	tief	0.015049	32	0.012102	0.019905
	mittel	0.015105	64	0.012881	0.018264
	hoch	0.018788	33	0.015154	0.02473
C3E	tief	0.02626	28	0.020839	0.035515
	mittel	0.029044	24	0.022678	0.040405

	hoch	0.019176	12	0.013751	0.031655
C4	tief	0.025759	62	0.021916	0.03125
	mittel	0.026844	66	0.022943	0.032355
	hoch	0.021746	58	0.018409	0.026573
C5	tief	0.012864	91	0.011236	0.015048
	mittel	0.017601	109	0.015543	0.020293
	hoch	0.026025	94	0.022777	0.030361
C6E	tief	0.034594	42	0.028524	0.043969
	mittel	0.029639	32	0.023835	0.039203
	hoch	0.017537	13	0.012714	0.028253
C8	tief	0.028745	79	0.024877	0.034048
	mittel	0.033206	118	0.029456	0.038059
	hoch	0.030868	106	0.027213	0.035665
C9	tief	0.026774	80	0.023191	0.031677
	mittel	0.038851	113	0.034379	0.044671
	hoch	0.042379	68	0.036299	0.050925
D1E	tief	0.015829	43	0.013078	0.020056
	mittel	0.024266	38	0.019831	0.031273
	hoch	0.022384	20	0.017125	0.032324
D2	tief	0.020746	79	0.017955	0.024573
	mittel	0.033298	114	0.02948	0.038261
	hoch	0.022168	105	0.019532	0.025632
D3	tief	0.023848	80	0.020657	0.028215
	mittel	0.02615	111	0.023116	0.030108
	hoch	0.014728	71	0.012654	0.017622
D4	tief	0.011475	80	0.009939	0.013576
	mittel	0.020678	113	0.018298	0.023776
	hoch	0.015586	97	0.013668	0.018136
D5	tief	0.020294	80	0.017578	0.02401
	mittel	0.029775	113	0.026348	0.034236
	hoch	0.03283	82	0.028483	0.038755
D6	tief	0.011885	114	0.010522	0.013656

D8	mittel	0.017732	111	0.015675	0.020416
	hoch	0.017831	39	0.014606	0.022896
	tief	0.024167	87	0.021048	0.028379
	mittel	0.030042	111	0.026557	0.034589
	hoch	0.033431	94	0.029259	0.039001

*Tabelle 13: Standardabweichungen und 95% Vertrauensintervalle gegenüber Reibungsklassen*

## **5.6 Gültigkeit der Daten und Auswahl stichhaltiger Datensätze**

Alle Strecken wurden auf Anomalien hin begutachtet und Strecken, die weniger als die Hälfte von Textur- oder Reibungsdaten aufwiesen, wurden für die statistische Analyse nicht verwendet. Zwei Strecken wurden so eliminiert und eine Strecke erwies sich als Ausreisser beim Vergleich der Textur- und Reibungsmessungen und wurde deshalb auch nicht verwendet. Diese Strecke war zu künstlich und aufgrund der grossen Datenmenge konnte ohne Probleme auf sie verzichtet werden.

Vier Strecken, auf denen die Texturmessgeräte Schwierigkeiten und viele Ausfälle hatten wurden ebenfalls nicht für alle Analysen benutzt. Ein Teil dieser Strecken bestanden aus porösem Asphalt, der von etlichen Texturmessgeräten nicht zufrieden stellend erfasst werden konnte. Eine andere Strecke war zu nass und auf einer Strecke verhinderten grosse Betonfugen vernünftige Messungen mit einigen der Texturmessgeräte.

## 6 Texturmessungen

Dieses Kapitel behandelt die Texturmessungen im Hinblick auf die Methoden, die Geräte und die erhaltenen Resultate.

Die Resultate konzentrieren sich auf Vergleiche zwischen den Texturmessgeräten, Korrelationen zwischen Texturmessungen und was das für die Standardisierung von Texturmessungen bedeutet. Die Wechselwirkungen zwischen Reibung und Textur, d.h. die Frage, ob Texturwerte Unterschiede unter den Reibungsmessgeräten und bei Messungen bei verschiedenen Geschwindigkeiten erklären können, wird später behandelt.

Zusätzlich zum Vergleich und Test von Texturmessausrüstungen, war man bei diesem Experiment im Hinblick auf die Standardisierung und die Harmonisierung bestrebt, Texturmessungen als Ergänzung zu den Reibungsmessungen mit einzubeziehen. Man ging davon aus, dass damit nicht nur der Einfluss der Geschwindigkeit auf die Reibung beschrieben werden könne, sondern dass auch die Diskrepanzen zwischen verschiedenen Geräten und verschiedenen Methoden erklärt werden und damit harmonisiert werden könnten. Dieser Ansatz wird im Kapitel 6 entwickelt.

### 6.1 Definitionen

Anlässlich des PIARC Weltkongresses von 1987 wurden drei Texturbereiche für Strassenoberflächen definiert [12]: Mikrotextr, Makrotextr und Megatextr. Die folgenden Definitionen stammen aus einem ISO-Entwurf [13], wie sie im Anschluss an den Weltkongress entwickelt wurden:

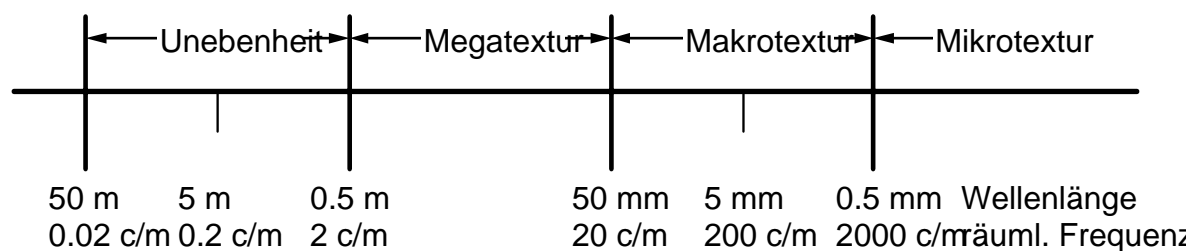


Figure 3: Skizze der Texturbereiche gemäss ISO/CD 13473

- Textur:** Amplitude und Wellenlänge: Das Profil der Oberfläche wird durch ihre Verschiebung entlang der Oberfläche (Distanz) und die Verschiebung vertikal zur Oberfläche (Amplitude) beschrieben. Die Distanz schliesst jeden Winkel in Bezug auf die Fahrriichtung mit ein. Die Texturwellenlänge wird durch die (Minimal-) Distanz zwischen periodisch wiederholten Teilen der Kurve entlang der Oberflächenebene definiert.
- Makrotextur:** Die Belagsmakrotextur ist die Abweichung einer Belagsoberfläche von einer idealen ebenen Oberfläche mit den charakteristischen Dimensionen von 0.5 - 50 mm längs der Oberfläche (entsprechend Texturwellenlängen mit Terzbändern einschliesslich des Bereichs 0.5 - 50 mm der Zentralwellenlängen). Die Amplituden zwischen zwei Spitzen können (normalerweise) im Bereich von 0.01 - 20 mm variieren. Diese Art von Textur ist die Textur, die Wellenlängen in der Grössenordnung von Reifennoppen in der Reifen/Fahrbahn Übergangszone aufweist.
- Mikrotextur:** Die Belagsmikrotextur ist die Abweichung einer Belagsoberfläche von einer idealen ebenen Oberfläche mit den charakteristischen Dimensionen entlang der Oberfläche im Bereich von weniger als 0.5 mm längs der Oberfläche (entsprechend Texturwellenlängen mit Terzbändern mit nicht mehr als 0.4 mm der Zentralwellenlängen). Die Amplituden zwischen zwei Spitzen können normalerweise im Bereich von 0.001 - 0.5 mm variieren. Diese Art von Textur macht die Oberfläche mehr oder weniger rau, ist aber normalerweise nicht von Auge sichtbar.
- Megatextur:** Die Belagsmegatextur ist die Abweichung einer Belagsoberfläche von einer idealen ebenen Oberfläche mit den charakteristischen Dimensionen von 50 - 500 mm längs der Oberfläche (entsprechend Texturwellenlängen mit Terzbändern einschliesslich dem Bereich von 63 - 500 mm der Zentralwellenlängen). Die Amplituden zwischen zwei Spitzen können normalerweise im Bereich von 0.11 - 50 mm variieren. Dieser Texturtyp hat Wellenlängen in der Grössenordnung der Reifen/Fahrbahn Übergangszone (oft durch Schlaglöcher oder Wellblechverformungen verursacht).
- Unebenheit:** Die Unebenheit ist die Abweichung einer Belagsoberfläche von einer idealen ebenen Oberfläche mit den charakteristischen Dimensionen von mehr als 0.5 m längs der Oberfläche (entsprechend Texturwellenlängen über 0.5 m).
- Texturtiefe:** Im dreidimensionalen Fall bedeutet Texturtiefe (TD=Texture Depth) die mittlere Distanz - innerhalb eines bestimmten Oberflächenbereiches in der Grössenordnung der Reifen/Fahrbahn Grenzfläche - zwischen der Oberfläche und einer Ebene durch die drei höchsten Teilchen, die "wohl platziert" innerhalb dieses Oberflächenbereiches sein sollen.

Die volumetrische Fleckmethode:	Die so genannte Sandfleckmethode wurde auf der ganzen Welt jahrelang verwendet um die Oberflächentextur zu messen. Sie benötigt eine vorgegebene Menge Sand, die auf der Strassenoberfläche ausgebreitet wird. Der Sand wird verteilt, um einen kreisförmigen Fleck zu formen, dessen Durchmesser gemessen wird. Durch Dividieren der Sandmenge durch die Fläche wird ein Wert erhalten, der die mittlere Tiefe der Sandschicht darstellt, daher der Ausdruck "Mittlere Texturtiefe". In den letzten Jahren wurden anstelle von Sand oft Glaskörner verwendet. Der Ausdruck Sandfleck wurde daher fallengelassen. Da es sich um eine volumetrische Methode handelt, bei der Material zu einem Fleck verteilt wird, ist der angemessene Ausdruck Volumetrische Fleckmethode. Diese Methode ist in ISO 10844 und ASTM E-065 beschrieben und basiert auf der Verwendung von Glaskörnern.
Mittlere Texturtiefe:	Bei Anwendung der Volumetrischen Fleckmethode ist die "Ebene", die durch das Verteilen der Fasern mit einem Gummi erhalten wird, keine eigentliche Ebene, eher eine gewellte, schwer definierbare Oberfläche. Die mit der volumetrischen Fleckmethode erhaltene Texturtiefe wird deshalb Mittlere Texturtiefe (MTD = Mean Texture Depth) genannt.
Mittlere Profiltiefe:	Im zweidimensionalen Falle, d.h. wenn eine Profilkurve studiert wird, bedeutet die Mittlere Profiltiefe (MPD=Mean Profile Depth) die mittlere Differenz - innerhalb einer gewissen Quer- oder Längsdistanz in der Grössenordnung der Reifen/Fahrbahn Grenzfläche - zwischen dem Profil und einer Linie durch die Spitze des höchsten Teilchens innerhalb des betrachteten Profilausschnittes (100 mm Basislänge gemäss (ISO/CD 13473).
Geschätzte Texturtiefe:	Wenn die mittlere Profiltiefe zur Schätzung der mittleren Texturtiefe anhand einer Umrechnungsformel benutzt wird, dann wird hier von der Geschätzten Texturtiefe (ETD = Estimated Texture Depth) gesprochen.

## 6.2 Texturmessmethoden und beim Experiment benutzte Geräte

### 6.2.1 Teilnehmende Geräte

Nur die Geräte, die in der folgenden und in der Tabelle 7: Teilnehmende Texturmessgeräte, aufgeführt sind, interessieren in diesem Kapitel. Die Liste enthält alle wichtigen Methoden und Systeme, die heute existieren und für Feldmessungen gebraucht werden können. Eine erwähnenswerte Ausnahme ist der ursprünglich in England entwickelte Mini Texture Meter. Da aber das Gerät D5 eine Hochgeschwindigkeitsversion dieses Gerätes darstellt, war das Prinzip vertreten. Neue Systeme werden zurzeit auch in Deutschland entwickelt, die allerdings ähnlich den Laserprofilometern sind, so dass alle heute wichtigen Systeme am Experiment vertreten waren. Die meisten Profilometer konnten sowohl die Makro- wie auch die Megatextur messen. Die volumetrische Fleckmethode und die Ausflussmessungen ergänzten die Makrotexturmessungen. In Spanien wurde die Unebenheit von einem Gerät erfasst (A3E). Die Mikrotextur hingegen konnte nur indirekt erfasst werden, d.h. mit den Pendeln, von denen angenommen wird, dass sie vor allem sensitiv gegenüber der Mikrotextur sind. Sie werden daher als Ersatz für Mikrotexturmessungen angesehen. Da die Pendel aber eine Reibung messen, werden sie in Kapitel 3.1 Reibungsmesser, behandelt. Tabelle 15: Vergleich der Mess- und Datenverarbeitungsparameter der teilnehmenden Profilometer, fasst die Mess- und Datenverarbeitungsparameter der elektro-optischen Profilometer zusammen, so wie sie sich aus einer Umfrage bei den Konstrukteuren und/oder Besitzern ergaben. Die Tabelle zeigt die grossen Unterschiede zwischen den Geräten, obwohl sie alle auf opto-elektronischen Messverfahren beruhen.

In nachstehender Tabelle sind die Texturmessgeräte mit den insgesamt gemessenen Längen und Flächen pro Strecke aufgeführt.

Texturmessgeräte mit Flächenangabe, der pro Strecke gemessenen Fläche

Bez.	Name	Land	Typ	Länge/ Fläche pro Strecke	Bemerkungen
A1	FHWA	USA	Profilometersystem	4m	Misst Texturtiefe mit (Kurve des Seitenprofils)
	Texturmessung		Lichtabschnitte		mit einem Videosystem, mobil
A2	VTI mobiler Laser	S	Profilometersystem	8m	Misst Längsprofilkurve und Spektrum,
	Profilometer		Laserfleck, linearer Sensor		mobil
A3B	ARAN	NL	Profilometersystem	150m	Misst Texturtiefe, mobil
	(nur in Belgien)		Laserfleck, linearer Sensor		Teil eines grösseren Systems

A3E	RST (nur in Spanien)	E	Profilometersystem  Laserfleck, linearer Sensor	150m	Misst Texturtiefe und IRI in beiden Radspuren,  mobil, Teil eines grösseren Systems
A4	CRR mobiler Laser	B	Profilometersystem  Laserfleck, linearer Sensor	53m	Misst Längenprofilkurve und Spektrum,  mobil
A5	CRR statischer Laser	B	Profilometersystem  Laserfleck, linearer Sensor	4m	Misst Längenprofilkurve und Spektrum,  mobil
A8	Volumetrische Fleck- methode	USA	"Sandfleck" mit Glaskugeln	0.16m2	Misst nur mittlere Texturtiefe, manuelle  Methode, gemäss ASTM und ISO
A12	ROSAN	USA	Profilometersystem  Laserfleck, linearer Sensor	32m	Misst Texturtiefe bei Gehgeschwindigkeit,  beinhaltet auch Gleitreibungsmessung
A14	Pendel	USA	Gummigleitkörper wischt über nasse Oberfläche	0.08m2	Misst Reibung bei 10km/h als Ersatz für  Mikrotextur, stationär
B7	Pendel	CH	Gummigleitkörper wischt über nasse Oberfläche	0.08m2	Misst Reibung bei 10km/h als Ersatz für  Mikrotextur, stationär
B8	Ausflussmesser	CH	Ausflusszeit für 1dm3 Wasser	0.08m2	Misst Oberflächendrainage, stationär
B11E	Ausflussmesser	USA	Ausflusszeit für 1dm3 Wasser	0.08m2	Misst Oberflächendrainage, stationär
D2	SCRIM	E	Profilometersystem  Laserfleck	150m	Misst Texturtiefe, mobil, Teile eines grösseren  Systems, das Seitenkraft misst
D3	SCRIM	F	Profilometersystem  Laserfleck	58m	Misst Texturtiefe, mobil, Teile eines grösseren  Systems, das Seitenkraft misst
D4	SCRIM-SUMMS	I	Profilometersystem  Laserfleck	140m	Misst Texturtiefe, mobil, Teile eines grösseren  Systems, das Seitenkraft misst

D5	SCRIMTEX	UK	Profilometersystem Laserfleck	140m	Misst Texturtiefe, mobil, Teile eines grösseren Systems, das Seitenkraft misst
----	----------	----	----------------------------------	------	--

*Tabelle 14: Texturmessgeräte mit den insgesamt gemessenen Längen und Flächen pro Strecke*

In nachstehender Tabelle ist ein Vergleich der Mess- und Datenverarbeitungsparameter der teilnehmenden Profilometer enthalten. (Die Tabelle basiert auf Angaben der Konstrukteure/Besitzer, so dass die Autoren eine gewisse Vorsicht beim Verwenden dieser Daten empfehlen)

Parameter	Einheit	A2	A5	A4	A4	A4	A3B	D3	D4/D5	A1	A3E
Messgeschwindigkeit	m/s	10	0	5	10	20	8-22	17	14	8	6-16
Sampling Rate	kHz	16		5	5	5	62.5	16	4	k.A.	32
Sampling Intervall	mm	0.6	1	1	2	4	0.4	1	3.5	0.14	0.8
Sample Länge	mm	140	555	2220	4440	8880	400	104	300	100	1000
Wiederholungsintervall	m	10	[18]	14	28	56	0.4	0.25	0.3	8	1
Cal. baselength	mm	70	138	138	138	138	50	104	300	100	1000
Highpass filtering	Bem.	1)	1)	1)	1)	1)	?	–	2)	?	3)
Mittel (pro Strecke)	Anz.	2*7	2*4	2*6	2*3	3	>100	2*7	2*7	2*10	2*75
Horizontale Auflösung	mm	1	1	1	1	1	0.5	0.5	?	0.14	0.8
Vertikale Auflösung	mm	0.02	0.016	0.016	0.016	0.016		0.03	0.4	0.08	0.032
Min. Wellenlänge	mm	2	2	2	8	8	0.8	2	7	0.5	2
Max. Wellenlänge	mm	>500	555	2000	2000	2000	400	4000	4000	>400	>500
Winkel	°	30	30	30	30	30		30	30	45	30
Max. Ausfallrate	%	<10	<10	<10	<10	<10		<10	0	<10	<10

*Tabelle 15: Vergleich der Mess- und Datenverarbeitungsparameter der teilnehmenden Profilometer*

Erklärungen: Die Anzahl der Mittel pro Strecke ist typischerweise 2x. Das bedeutet, dass pro Strecke zwei Sektionen mit x Messungen pro Sektion vorhanden sind, wobei jede Messung die angegebene "Sample Länge" abdeckt. Jede "Sample Länge" mag in mehrere "Baselengths" (Basislänge für die Berechnung) unterteilt sein.

1): Regressionslinie durch die Profilkurve wird subtrahiert; entfernt "slop" und lange Wellenlängen.

2): Eine angepasste Linie bestehend aus einer Funktion zweiten polynomischen Grades wird subtrahiert; entfernt lange Wellenlängen.

3): Das Profil wird durch drei Bandpass-Filter gefiltert: 2-10, 10-100 und 100-500 mm Wellenlängen.

## 6.2.2 Angegebene Messungen

Jedes der Geräte in Tabelle 14: Texturmessgeräte mit den insgesamt gemessenen Längen und Flächen pro Strecke, machte eine oder mehrere Arten von Messungen und einige gaben mehrere Messgrößen für jede Strecke an, die auf verschiedenen Arten der Signalverarbeitung basierten. Die Geräte A2, A4 und A5 gaben neben den aus den Profilkurven berechneten Werten zusätzlich Spektralebenen an. A2 zum Beispiel gab pro Strecke 42 Werte, einschliesslich von Daten aus der Spektralanalyse an. Ohne die Spektraldaten wurden von allen Geräten im Ganzen 34 verschiedene Messungen angegeben. Sie werden im Folgenden kurz beschrieben:

A1-RMS:	RMS (Root Mean Square) ist das quadratische Mittel des Profils in mm, basierend auf einer Sample-Länge von 4 Zoll
A2-ETD, RMS, TDMA, MPD:	Mit drei verschiedenen Algorithmen werden die Profil-Samples verarbeitet, der MPD wird erst im Nachhinein ermittelt.
RMS	RMS (Root Mean Square) ist das quadratische Mittel in mm, basierend auf 7 Samples zu 140 mm, aufgenommen im Abstand von 5 - 10 Metern.
ETD	ETD (Estimated Texture Depth) beschreibt die geschätzte Texturtiefe in mm, basierend auf 7 Samples zu 140 mm, aufgenommen im Abstand von 5 - 10 Metern.
TDMA	TDMA (Texture Depth of Macrotecture) umschreibt die Texturtiefe der Makrotextur und basiert auf einer kontinuierlichen Aufnahme einer ganzen Sektion.
MPD	MPD (Mean Profile Depth) beschreibt die mittlere Profiltiefe und basiert auf zwei Hälften eines 140 mm langen Samples. Da die MPD-Werte zu einem späteren Zeitpunkt ermittelt werden, werden sie in diesem Kapitel generell nicht berücksichtigt.
A3B-TX1, TX2:	TX1 entspricht dem RMS, d.h. dem quadratischen Mittel des Profils in mm
TX2	TX2 ähnelt dem ETD (geschätzte Texturtiefe) und dem MPD (mittlere Profiltiefe)
TX1, TX2	TX1 und TX2 wurden bei drei Geschwindigkeiten gemessen (30 km/h, 60 km/h und 89 km/h). Wie die folgende Tabelle 9 zeigt, ist der Einfluss der Geschwindigkeit relativ gering. Für die folgenden Analysen wurden die Werte deshalb über die drei Geschwindigkeiten gemittelt.
A3E-MEGA1, MEGA2,	MEGA, ROUGH, FINE sind gefilterte quadratische Mittel (RMS) in mm. Die Filter sind so angelegt, dass sie die Komponenten der Megatextur

ROUGH1, ROUGH2, FINE1, FINE2; IRI1, IRI2:	(Wellenlängen zwischen 100 und 500 mm), der "groben" Makrotextur (Wellenlängen zwischen 10 und 100 mm) und der feinen Makrotextur (Wellenlängen unter 10 mm) separieren. IRI ist der internationale Ebenheitsindex (International Roughness Index), der auf Wellenlängen über 0.5 m anspricht. 1 und 2 beziehen sich auf die linke und die rechte Fahrspur.
A4-RMS1, RMS2, RMS4, MPD1, MPD2, MPD4:	RMS entspricht dem quadratischen Mittel des Profils in mm. MPD (Mean Profile Depth) ist die mittlere Profiltiefe in mm und bezeichnet die Differenz zwischen der Profilspitze und der mittleren Höhe des Profils. RMS und MPD werden aufgrund von 138 mm langen Profilsamples berechnet und werden über die jeweils vorhandene Anzahl Samples gemittelt. Das Gerät machte Messungen bei drei Geschwindigkeiten (18, 36 und 72 km/h), die mit einem Sampleintervall von 1, 2 und 4 mm korrespondieren, darum auch die Indices.
A5-RMS, MPD:	Entspricht A4, ausser, dass das Sampleintervall 1 mm beträgt.
A8-MTD:	MTD (Mean Textur Depth) ist die mittlere Texturtiefe in mm, gemessen gemäss der ASTM Norm E-965 und dem Anhang A von ISO 10844. Die Messung entspricht einer volumetrischen Fleckmethode, wobei Glas-körner als Streumaterial benutzt werden (siehe auch Kapitel 4.1.8 für weitere Informationen).
A12-MTD:	RMS (quadratisches Mittel) des Profils in mm. Das Gerät funktionierte auf den meisten Strecken nicht.
B8-OUTFL:	Ausflusszeit in Sekunden, soll die Entwässerungseigenschaften repräsentieren. Die Ausflusszeit wurde mit einer Stoppuhr gemessen und zur nächsten Sekunde gerundet.
B11-OUTFL:	Ausflusszeit in Sekunden, soll die Entwässerungseigenschaften repräsentieren. Die Ausflusszeit wurde mit einem elektronischen Timer gemessen, Genauigkeit 1/10 Sekunde.
D2-MTD:	Profilmessung mit Laser und auf einem SCRIM installiert. "MTD" in diesem Falle soll ähnlich dem D4-SMTD und dem D5-SMTD sein, das heisst dem quadratischen Mittel (RMS) des Profils in mm.
D3-RA, HSC, RQ:	Profilmesssystem, das auf einem SCRIM installiert ist und auf der Lasertechnik beruht. RA ist die mittlere Amplitude des Profilsignals. HSC ist eine lineare Transformation des RA, um die Sandfleckttexturtiefe anzunähern. RQ ist die Wurzel des Signals im Quadrat geteilt durch die Sample-Länge (entspricht nicht genau dem quadratischen Mittel RMS).
D4-SMTD, CSMTD:	Profilmesssystem, das auf einem SCRIM installiert ist und auf der Lasertechnik beruht. SMTD (Sensor Measured Texture Depth in mm) entspricht dem quadratischen Mittel (RMS) des Profils. CSMTD entspricht einer korrigierten Angabe des SMTD, Gründe für die Korrektur wurden keine angegeben.

D5-SMTD:	Profilmesssystem, das auf einem SCRIM installiert ist und auf der Lasertechnik beruht. SMTD (Sensor Measured Texture Depth in mm) entspricht dem quadratischen Mittel (RMS) des Profils.
----------	--

Tabelle 16: Beschreibung der verschiedenen Geräte

TX1	30 km/h	60 km/h	80 km/h	TX2	30 km/h	60 km/h	80 km/h
30 km/h		A=1.032 B=-0.030 R=0.985 S=0.063	A=1.016 B=-0.021 R=0.975 S=0.080	30 km/h		A=1.001 B=-0.061 R=0.984 S=0.101	A=0.967 B=-0.054 R=0.978 S=0.121
60 km/h	A=0.940 B=-0.050 R=0.985 S=0.060		A=0.974 B=-0.017 R=0.980 S=0.069	60 km/h	A=0.967 B=-0.102 R=0.984 S=0.100		A=0.964 B=-0.10 R=0.992 S=0.073
80 km/h	A=0.936 B=-0.056 R=0.975 S=0.077	A=0.985 B=-0.013 R=0.980 S=0.070		80 km/h	A=0.988 B=0.115 R=0.978 S=0.122	A=10.20 B=0.013 R=0.992 S=0.075	

Tabelle 17: Korrelationen zwischen den Texturmessungen von A3B, gemessen bei drei unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Die Werte basieren auf 19 Strecken in Belgien, wobei die Messungen über die ganze Strecke gemittelt wurden.

Erläuterung: Faktoren gemäss der Gleichung

$$Y = A * X + B$$

Gl. 8

Wobei:

R= Korrelationskoeffizient,

S= Residuelle Standardabweichung

### 6.3 Anmerkungen zu den Strecken

Nicht alle Texturmessgeräte führten Messungen auf allen Strecken durch. Das heisst, die Vergleiche beruhten nicht immer auf identischen Datensätzen. Ausser dort, wo die Effekte dieser Tatsache als irrelevant beurteilt wurden, wird dieser Tatsache in den folgenden Datenzusammenstellungen Rechnung getragen. Obwohl die jeweiligen Sektionen einzeln gemessen wurden, sind in den Kapiteln 6.4, und folgende die gemittelten Werte über die ganze Strecke betrachtet worden. Die Analysen in den Kapitel 7.1 und folgende basieren

demgegenüber auf den einzelnen Sektionen, wobei die Strecken in Moron und Rota nicht berücksichtigt wurden, da dort etliche der Geräte nicht teilnahmen. Die Resultate sind durch diese scheinbare Inkonsistenz nicht signifikant beeinflusst.

Fünf Strecken wurden für die Texturanalysen weggelassen. Wie in Kapitel 5.6 erwähnt, hatte das verschiedene Gründe.

## 6.4 Gemessene Texturdaten

### 6.4.1 Grunddaten für Mikro-, Makro- und Megatextur

Als Referenzmethode, welche für die Analyse nötig war, wurde die Volumetrische Fleckmethode verwendet, wie sie mit dem Gerät A8 gemessen wurde. Der Grund liegt nicht darin, dass die Autoren glauben, dies sei die beste Methode, sondern weil sie seit langem an vielen Orten verwendet wird und überall etabliert ist. Zwei andere Makrotexturwerte, ETD (geschätzte Texturtiefe) und RMS (quadratisches Mittel) wurden mit dem Gerät A2 erfasst. Diese Wahl ist durch die Tatsache motiviert, dass ETD und RMS zwei wichtige und prinzipiell unterschiedliche Alternativen zur MTD (mittlere Texturtiefe), wenn sie mit Profilmethoden gemessen wird, darstellen. Wie auch immer, von ETD und RMS gibt es verschiedene Varianten, gemessen von mehreren Geräten. Die einzige Messung, welche die Megatextur repräsentiert, wie sie in Kapitel 6.1 definiert wurde, war der LMe (Level of Megatexture=Niveau der Megatextur), gemessen mit A2. Dabei handelt es sich um eine logarithmische Grösse, die aus den Spektralbändern im Megatexturbereich berechnet wird und in dB angegeben wird (relativ zu einer Referenz von 1 Mikrometer RMS). Für Spanien sind auch IRI-Werte erhältlich, welche die Unebenheit repräsentieren. Direkte Mikrotexturmessungen wurden keine gemacht, da keine passende Methode existiert.

### 6.4.2 Zufallsfehler

Eine Untersuchung der Zufallsfehler der in Kapitel 6.4.1 präsentierten Messungen gibt einen interessanten Vergleich des Potentials zur Maximierung der Präzision von Makrotexturmessungen. Nachstehende Tabelle zeigt diese Daten.

Messung	MTD	ETD	RMS	LMe	BPN
Standardabweichung für eine einzelne Messung (ein Sample oder ein Fleck)	11%	50%	50%	n.v.	6%
Standardabweichung für den Mittelwert eines Durchganges	n.v.	19%	19%	0.3 dB (~3%)	n.v.
Standardabweichung für den Mittelwert des ganzen Datensatzes für eine Strecke in diesem Experiment	5%	9%	9%	0.15dB (~2%)	2%

Tabelle 18: Zufallsfehler beim Experiment, ausgedrückt als relative Standardabweichungen der Messung

Die Zahlen für ETD, RMS und LMe gelten für A2. Die MTD-Werte für eine Strecke beruhen auf acht Flecken. Die ETD und RMS Messungen einer Strecke basieren auf 56 Samples oder Profilen (4 Durchgänge auf zwei Sektionen mit 7 Messungen pro Sektion). Die Gesamtdistanz, während der ETD und RMS gemessen wurden, betrug näherungsweise 8 m (2 m für jeden Durchlauf à 150 m). Trotzdem sind die ETD Zufallsfehler doppelt so gross wie die Zufallsfehler der MTD. Um diese Zufallsfehler auszugleichen wären mit A2 viermal mehr Durchläufe als die tatsächlich absolvierten nötig. Somit würden näherungsweise 30 Samples (140 mm lang) für einen „Sandfleck“ benötigt. Überraschend ist das nicht unbedingt, es illustriert den Unterschied zwischen einem zweidimensionalen Profil und einer dreidimensionalen Oberfläche. Wollte man vernünftig einen Fleck von, sagen wir, 150\*150 mm in drei Dimensionen messen, dann müsste man vermutlich mindestens 30 äquidistante und parallele Profile messen. Die LMe wurde über die ganze Streckendistanz gemessen. Das macht vier Durchgänge zu 150 m für jede Strecke, das heisst, die LMe basiert auf einer Profillänge von total 600 m, im Vergleich zu 8 m beim ETD und RMS. Das erklärt, warum der LMe eine so tiefe Standardabweichung aufweist. Umgewandelt in eine lineare Skala, entsprechen 0.15 dB etwas weniger als 2%. Da der TDMA-Wert (Texturtiefe der Makrotextur) auf derselben Länge wie der LMe basiert, gibt es dem TDMA einen beträchtlichen Vorteil in Bezug auf Zufallsfehler. Das könnte erklären, warum der TDMA in Tabelle 20 in Kapitel 6.6.1 so gut abschneidet. Es ist zu beachten, dass der MTD in idealer seitlicher Position gemessen wurde, während die anderen Messungen auch eine laterale Variation der Textur mit einbeziehen.

Tabelle 14: Texturmessgeräte mit den insgesamt gemessenen Längen und Flächen pro Strecke, zeigt die Totaldistanz oder -fläche, die pro Strecke von den Makrotexturmessgeräten tatsächlich gemessen wurden. Es ist offensichtlich, dass grosse Differenzen bestehen, welche die Zufallsfehler in grossem Masse beeinflussen dürften. Die von A2 gemessenen MTD- und RMS-Werte deckten selbst bei vier Durchläufen nur rund 5% der Streckenlänge ab. Nach dem Experiment wurde das Gerät A2 verbessert, so dass es in einem Durchgang rund 90% der Gesamtlänge misst, der Zufallsfehler sollte jetzt vergleichbar sein zu den LMe-Messungen. Folglich besteht also noch einiges Potential für die Verbesserung solcher Messungen.

Die Tatsache, dass die Zufallsfehler der ETD- und RMS-Messungen in diesem Experiment signifikant höher scheinen als beim MTD, sollte eigentlich darauf hinweisen, dass der MTD das grössere Potential hat, Effekte der Textur auf die Reibung zu erklären. Dem ist allerdings nicht so. Das wird in anderen Kapiteln dieses Berichts deutlich, es ist sogar eher das Gegenteil der Fall. Daraus folgt, dass irgendeine systematische Eigenheit des ETD existiert, die nicht nur den grösseren Zufallsfehler kompensiert, sondern auch eine bessere Umschreibung der Reibung ermöglicht.

### 6.4.3 Texturspektren

Wenn eine Profilkurve mit einer mathematischen Fourier-Transformation oder mit einem passenden Filterprozess analysiert wird, um damit die Amplituden ihrer spektralen Komponenten (Wellenlängen) zu ermitteln, so erhält man ein Texturspektrum. Die Geräte A2, A4 und A5 lieferten solche Texturspektren in Oktavbändern. A2 lieferte zusätzlich Texturspektren in einer Terzband-Auflösung. Texturspektren werden in Kapitel 6.9 verwendet.

## **6.5 Existierende oder geplante internationale Standardisierung**

Zurzeit gibt es nur einen internationalen Standard für Texturmessungen. Im Anhang zu ISO 10844 wird das Vorgehen für die Messung der Mittleren Texturtiefe (MTD) mit der volumetrischen Fleckmethode beschrieben. Dieses Vorgehen basiert auf der Norm der ASTM, die von der Sandfleckmethode, wie sie ursprünglich in England spezifiziert wurde, abgeleitet ist. Die in diesem Experiment angewandte Methode entspricht sowohl den Anforderungen von ASTM und von ISO.

Da die volumetrische Methode unpraktisch langsam ist und das Absperren des Fahrstreifens erfordert, wurde mit der Erarbeitung einer Norm begonnen, die auf Profilmessungen basieren sollte und eine Alternative zur mittleren Texturtiefe (MTD) darstellen sollte. Diese neue Norm beruht auf der mittleren Profiltiefe (MPD) und der geschätzten Texturtiefe (ETD), wie sie in Kapitel 6.1 beschreiben wurden. Vier Mitglieder der entsprechenden Arbeitsgruppe ISO/TC/SC1/WG39 sind auch an Bericht [4] beteiligt. Gleichzeitig wird auch an der europäischen Normierung (CEN) für MTD, MPD und ETD gearbeitet. Es ist zu erwarten, dass ISO und CEN in diesem Bereich zusammenarbeiten. Beide Gruppierungen basieren ihre Arbeit auf dem vorliegenden Versuch, ohne den ihre Arbeit kaum möglich gewesen wäre.

## **6.6 Korrelation zwischen der volumetrischen Messung der mittleren Texturtiefe (MTD) und anderen Texturmessungen**

### **6.6.1 Korrelation mit MTD**

Für die internationale Standardisierung ist es wichtig, einen mobil gemessenen Wert zu finden, der die "alte" Fleckmethode als eine Einzelwertrepräsentation der Makrotextur ersetzt bis ein besseres Mass entwickelt werden kann und auch den Vergleich mit alten Daten, die auf der Fleckmethode basieren, ermöglicht. Zu diesem Zweck wurden die MTD-Werte als Referenz benutzt und die Korrelationen aller anderen Messungen mit dieser Messung wurden untersucht. Tabelle 19 zeigt die Resultate mit und ohne die porösen und nassen Oberflächen. Wichtiger sind die Vergleiche ohne diese Oberflächen, da diese nicht von allen Geräten genügend gut erfasst werden konnten. Da aber einige Geräte dennoch befriedigende Ergebnisse auf diesen Oberflächen lieferten, wurden sie in der Tabelle ebenfalls mitberücksichtigt. Die entsprechende Spalte gilt zumindest für A2 und A3E, vermutlich aber auch für den ARAN und die SCRIM's. Tabelle 19 gibt an, wie gut die Messungen auf einer relativen Skala korrelieren, gibt aber nicht an, wie gut die absoluten Texturtiefen vorausgesagt werden.

Diese Angaben finden sich in Tabelle 20. Werte in der Nähe von 1 bedeuten, dass die vom betreffenden Profilometer vorausgesagte Texturtiefe sehr nahe beim effektiv gemessenen MTD-Wert liegt.

Typ	Messart	Alle Oberflächen		Ohne offenporige und nasse Oberflächen	
		Korrelationskoeffizient	Anzahl Beobachtungen	Korrelationskoeffizient	Anzahl Beobachtungen
A2	ETD	0.899	283	0.951	259
A5	MPD	0.877	293	0.958	269
A4	MPD	0.800	304	0.856	280
D3	HSC (~ETD)	0.898	271	0.931	247
A3B	TX2 (~ETD)	[0.906]	117	[0.921]	111
A1	RMS	0.358	283	0.912	262
A2	TdMa~RMS	0.930	283	0.947	259
A2	RMS	0.922	283	0.929	259
A5	RMS	0.902	293	0.923	269
A4	RMS	0.746	304	0.810	280
D3	RQ~RMS	0.896	271	0.920	247
D2	MTD~RMS	0.834	247	0.838	235
D5	SMTD~RMS	0.885	280	0.883	256
D4	SMTD~RMS	0.849	252	0.859	234
A3E	~RMS	[0.878]	114	[0.803]	108
A12	MTD=RMS	[0.474]	156	[0.485]	144
A3B	TX1=RMS	[0.851]	117	[0.911]	111

*Tabelle 19: Korrelationskoeffizienten zwischen der Makrotextur, wie sie von verschiedenen elektro-optischen Geräten gemessen wurden, und der mittleren Texturtiefe (MTD), wie sie mit der Fleckmethode gemessen wurde (A8). (Ohne Strecke 10, die nass war.)*

Bemerkungen zur Tabelle 19: Die erste Gruppe sind Geräte, bei denen die Texturtiefe gemäss Fleckmethode aufgrund von Flächenberechnungen aus dem Profil vorausgesagt wird. Bei der zweiten Gruppe wurden lediglich der RMS-Wert des Profils gemessen; möglicherweise gefiltert und/oder unter Anwendung einer Transformationsgleichung angepasst, um die Werte näher an den tatsächlich gemessenen MTD zu bringen.

A5, eine stationäre Methode machte die Messungen auf denselben Punkten wie die Fleckmethode, die anderen Geräte führten ihre Messungen auf der ganzen Strecke durch, ohne diese Punkte im speziellen zu erfassen.

Die Zahl der Beobachtungen sind das Produkt aus der Anzahl Strecken, Anzahl Sektionen auf jeder Strecke (2) und der Anzahl der Durchläufe (normalerweise 3).

Die Werte in eckigen Klammern beruhen auf weniger Beobachtungen.

Typ	Messart	Ohne offenporige und nasse Oberflächen			
		Minimum	Maximum	Mittel	Anzahl Beobachtungen
A2	ETD	0.660	1.240	0.950	259
A5	MPD	1.200	1.370	1.170	269
A4	MPD	1.050	1.790	1.100	280
D3	HSC (~ETD)	10.700	1.050	0.980	247
A3B	TX2 (~ETD)	[1.58]	[0.93]	[1.15]	111
A1	RMS	0.470	0.440	0.450	283
A2	TdMa~RMS	0.630	1.013	0.980	259
A2	RMS	0.610	0.640	0.530	259
A5	RMS	0.590	0.660	0.550	269
A4	RMS	0.560	1.100	0.630	280
D3	RQ~RMS	0.590	0.520	0.520	247
D2	MTD~RMS	1.070	0.860	0.940	235
D5	SMTD~RMS	0.061	0.630	0.530	256
D4	SMTD~RMS	0.410	0.610	0.510	234
A3E	~RMS	[0.51]	[0.29]	[0.38]	108
A12	MTD=RMS	[0.81]	[1.30]	[0.77]	144
A3B	TX1=RMS	[0.71]	[0.53]	[0.66]	111

*Tabelle 20: Fähigkeit, der verschiedenen elektro-optischen Profilometer die Texturtiefe gemäss Fleckmethode (MTD gemessen mit A8) vorauszusagen. Die Werte sind in Proportion zur mit der Fleckmethode gemessenen Texturtiefe angegeben. (Die Strecken 26.2, 41, 70 (porös) und 10 (nass) wurden nicht berücksichtigt.)*

Bemerkungen zur Tabelle 20: Es ist relativ einfach, eine Gleichung zu benutzen, die die Lasermessungen sehr gut mit den Fleckmethoden koinzidieren lässt. In den Fällen, wo bereits eine solche Gleichung gebraucht wird, müssen nur die Koeffizienten geändert werden. Die Tabelle zeigt nur, wie die im Experiment benutzten Prozeduren/Gleichungen die Texturtiefe voraussagen.

Es fällt auf, dass die Minimalwerte nicht so nahe kommen, wie die Maximalwerte. D.h. nicht unbedingt, dass sie in diesen Bereichen schlecht arbeiten, es kann gut sein, dass die Fleckmethode bei extrem kleinen Texturtiefen nicht exakt arbeitet. Siehe auch Bemerkungen zu Tabelle 19 .

## 6.6.2 Sensitivität gegenüber Megatextur und Unebenheit

Bei der Auswahl der am besten geeigneten Berechnungsmethode sollte es möglich sein, den Einfluss anderer Charakteristiken, ausser der Makrotextur, für die Schätzung des "Ersatzmasses" für die volumetrische Texturtiefe zu minimieren. Es ist gut vorstellbar, dass im speziellen die Megatextur oder die Unebenheit diese Messungen beeinflusst haben könnten. Dies wurde vom M. Gothié folgendermassen abgeklärt [19]:

Zuerst wurde die Regression jeder "Ersatzmessung" mit A8-MTD berechnet. Dann wurden die Residuen in der Regression gegenüber Megatextur (LMe) und Unebenheit (IRI) getestet. Die Analysen beschränkten sich auf A2, A4, D3 und D5. Es wurden keine Einflüsse der Megatextur und der Unebenheit bemerkt, es sei denn man beschränkte sich auf die Strecken in Spanien und liesse die Oberflächenbehandlungen weg. Dies erscheint logisch, da die Megatextur wichtig ist, wenn die Makrotextur tief und die Megatextur hoch ist. Der Effekt machte sich deshalb hauptsächlich auf diesen Strecken bemerkbar und ist im Grunde ein Resultat der Streckenauswahl, die vor allem den Zwecken des Experimentes zu dienen hatte und nicht unbedingt repräsentativ für das Streckennetz des jeweiligen Landes war. Die Resultate waren wie folgt:

Gerät Messart	Basislänge für Berechnung	Gefälls- korrektur	Anzahl Werte	R (LMe)	R (IRI)
A2-ETD	70 mm	Ja	30	0.24	0.32
A4-MPD	138 mm	Ja	15	0.35	0.28
D3-RA	104 mm	Nein	100	0.54	0.67
D3-RQ	104 mm	Nein	100	0.49	0.49
D5-SMTD	300 mm	Ja*	30	0.32	0.00

*Tabelle 21*

\* Polynom 2. Grades

Die Korrelationskoeffizienten R sind in den beiden letzten Kolonnen angegeben. Der Effekt scheint nur für das Gerät D3 signifikant zu sein und nur für Oberflächen ohne Oberflächenbehandlungen. Wenn man auch die Oberflächen in Spanien ausschliessen würde, die über eine längsgerillte Textur verfügen, so wären die Effekte noch deutlicher.

A2 und A4 benutzen einen Bearbeitungsprozess, der jegliches Gefälle von der Profilkurve abzieht. D5 benutzt einen Bearbeitungsprozess, der ein Polynom zweiten Grades berechnet und vom Profil abzieht. Das sollte besonders effizient sein, um längere Wellenlängen auszu-schalten. D3 macht keine Gefällskorrektur.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Gefällskorrektur oder etwas Ähnliches nötig ist, um die Einflüsse der Megatextur und/oder der Unebenheit zu beseitigen. Aus Sicht der Berechnung, sind hier eine kurze Basislänge und eine einfache Korrektur praktisch, da sie eine kurze Berechnungszeit erfordern.

### 6.6.3 Schlussfolgerungen

1. Es ist möglich, den MTD, so wie er mit der Fleckmethode gemessen wird, sehr genau mit Profilmessungen vorauszusagen. Die besten Geräte weisen eine Varianz (1-R<sup>2</sup>) von 8-10% und von 15% auf, wenn die offenen porigen Beläge dazugerechnet werden.
2. Kann man eine Verbesserung erzielen, wenn man im Gegensatz zu einer einfachen RMS-Berechnung die Fläche unter der Texturspitze berechnet? A3B, A2 und A4 und A5 benutzen beide Methoden. Wenn man die porösen Decken weglässt und vom RMS auf die Flächenberechnung wechselt, vermindert sich die unerklärte Varianz von 15% auf 8%, während A2 eine Verbesserung von 17% auf 10% aufweist. Wie auch immer, wenn man die porösen Oberflächen dazuzählte, ergab sich der umgekehrte Effekt, die RMS-Berechnung war besser. Die beste Berechnung wurde durch den TDMA von A2 erzielt. Dieser Wert basiert auf einem gefilterten RMS-Wert und wendet eine Formel an, um die Texturtiefe vorauszusagen. Es ist allerdings fragwürdig, ob die Fleckmethode für neue poröse Beläge überhaupt relevant ist. Beim Gerät A3B erwiesen sich die auf der Fläche beruhenden Daten in allen Fällen als besser als der RMS.
3. RMS-Berechnung gibt keine vergleichbaren Werte zur Fleckmethode, ausser eine Umformungsgleichung wird angewandt.
4. Die meisten Geräte, die Texturtiefe voraussagen, geben Mittelwerte, die nahe bei den gemessenen Werten liegen. Die Maximal- und Minimalwerte geben allerdings weit grössere Unterschiede an.
5. Um den Einfluss der Megatextur und der Unebenheit bei der Berechnung eines Alternativmasses zum MTD zu minimalisieren, ist es nötig, eine Korrektur für die Neigung der Profilkurve einzubeziehen, beispielsweise mittels Anpassung und Subtraktion einer linearen Regressionslinie oder einer Polynomfunktion 2. Grades.

Zu Punkt 5: Aufgrund des vorliegenden Experiments ist es leicht möglich, neue Umformungsgleichungen für die einzelnen Geräte festzulegen, so dass die vorausgesagten Werte näher bei den gemessenen zu liegen kommen. Beispielsweise: Die Transformationsgleichung von A2 beruhte auf früheren Messungen mit einer stationären Variante des Systems, das einen Lineal zur Verteilung und Sand als Material für die Fleckmethode nutzte [20]. Aufgrund des vorliegenden Experimentes wurde eine neue Transformationsgleichung zur Berechnung von ETD aus MPD entwickelt. Da die neue und die alte Transformationsgleichung linear sind, bleiben die hier aufgeführten Korrelationskoeffizienten unbeeinflusst.

## 6.7 Korrelation zwischen Texturmessungen für alle Messungen und Geräte

Jede Messart (Y) wurde mittels einer linearen Regression mit allen anderen (X) korreliert und zwar gemäss folgender Gleichung:

$$Y = A * X + B$$

Gl. 9

Tabelle 22 zeigt die Korrelationskoeffizienten aller Geräte mit der volumetrischen Fleckmethode (A8-MTD), aufgereiht nach ihrer Grösse. Es scheint, dass die Messmethoden, die am besten abschneiden, auf der "mittleren Profiltiefe" (MPD) basieren, ein Algorithmus, der die volumetrische Methode simuliert [21]. Das Prinzip ist folgendes: Aus dem Profil wird die Regressionslinie berechnet. Eine Parallele dazu wird durch die maximale relative Höhe gezogen. Der vertikale Abstand zwischen den beiden Linien ergibt den MPD. Die Samplelänge von A4 und A5 betrug 138 mm, ISO/CD 13473 fordert mittlerweile eine Basislänge / Samplelänge von 100 m.

Ausserdem zeigte sich, dass wenn immer eine Profilmessung eines Gerätes mit verschiedenen Algorithmen bearbeitet wird, ein RMS-ähnliches Mass schlechter abschneidet, als ein Mass, das auf der Spitzenamplitude basiert; siehe A2, A3B, A4 und A5; oder auch D3-RA im Vergleich mit D3-RQ.

In der nachstehenden Tabelle ist die Rangfolge der verschiedenen Profilmessungen gemäss ihrer Korrelation mit der volumetrischen Fleckmethode aufgeführt. N ist die Anzahl Messungen. STD ist die residuelle Standardabweichung von A8-MTD. Zu beachten ist die unterschiedliche Anzahl von Messungen, auf denen die Korrelationen basieren. Den Korrelationen, die auf weniger als 30 Werten basieren, ist nicht soviel Gewicht beizumessen, wie den anderen.

Korrelations- koeffizient	Auf MPD basierend	Auf RMS basierend	STD mm	N
0.966	A5-MPD		0.15	51
0.962	A2-ETD		0.17	43
0.953		A2-TDMA*	0.19	43
0.952	A3B-TX2		0.19	18
0.943		A2-RMS	0.21	43
0.940	A42-MPD		0.21	49

0.940		A3B-TX1	0.22	18
0.940	D3-RA*		0.22	42
0.930	A44-MPD		0.23	48
0.930	A41-MPD		0.22	49
0.929		D3-RQ	0.23	42
0.925		A5-RMS*	0.23	51
0.896		A3E-R1	0.20	18
0.889		A1-RMS	0.28	47
0.886		D5-SMTD	0.26	43
0.882		A42-RMS	0.29	49
0.874		A41-RMS	0.30	49
0.868		A3E-M1	0.23	18
0.860		D4-CSMTD	0.30	45
0.854		D2-MTD	0.33	39
0.843		A44-RMS	0.33	48
0.807		A3E-R2	0.27	18
0.781		A3E-M2	0.29	18
0.602		A3E-F1	0.37	18
0.489		A12-MTD	0.56	25
0.402		A3E-F2	0.42	18

*Tabelle 22: Rangfolge der verschiedenen Profilmessungen gemäss ihrer Korrelation*

\*Diese Daten basieren nicht rein auf dem MPD (oder dem RMS), sind aber ähnlich.

Tabelle 23 zeigt für jedes Gerät, mit welchem anderen Gerät die beste Korrelation besteht. Die dazugehörige Graphik zeigt für jedes Gerät die beste Korrelation mit einem Pfeil. Die Graphik zeigt deutlich, dass es zwei Gruppen ohne Verbindung gibt. Alle ausser zwei Messungen, die auf dem MPD-Algorithmus basieren, gehören zu einer Gruppe, zu der auch die volumetrische Fleckmethode (A8-MTD) gehört, während die meisten Messungen, die auf dem RMS basieren zur anderen Gruppe gehören.

Mass 1	Mass 2	Rmax
A1-RMS	A3B-TX1	0.969
A2-TDMA	A3B-TX1	0.986
A2-ETD	A5-MPD	0.984
A2-RMS	A5-RMS	0.978
A3B-TX1	A2-TDMA	0.986
A3B-TX2	A5-MPD	0.987
A3E-M1	A44-MPD	0.942
A3E-M2	A44-RMS	0.924
A3E-R1	A44-MPD	0.940
A3E-R2	A42-MPD	0.870
A3E-F1	A42-RMS	0.890
A3E-F2	A42-RMS	0.890
A41-RMS	A3B-TX1	0.750
A42-RMS	A3B-TX1	0.962
A44-RMS	A5-RMS	0.965
A41-MPD	A3B-TX2	0.950
A42-MPD	A3B-TX1	0.981
A44-MPD	A5-MPD	0.975
A5-RMS	A3B-TX1	0.979
A5-MPD	A3B-TX1	0.987
A8-MTD	A5-MPD	0.966
A12-MTD	A1-RMS	0.653
D2-MTD	A2-TDMA	0.978
D3-RA	A2-RMS	0.975
D3-RQ	A3B-TX1	0.969
D4-CSMTD	A2-RMS	0.970
D5-SMTD	A3B-TX1	0.954

*Tabelle 23: Liste, die angibt, welches Mass am besten mit einem anderen Mass korreliert.*

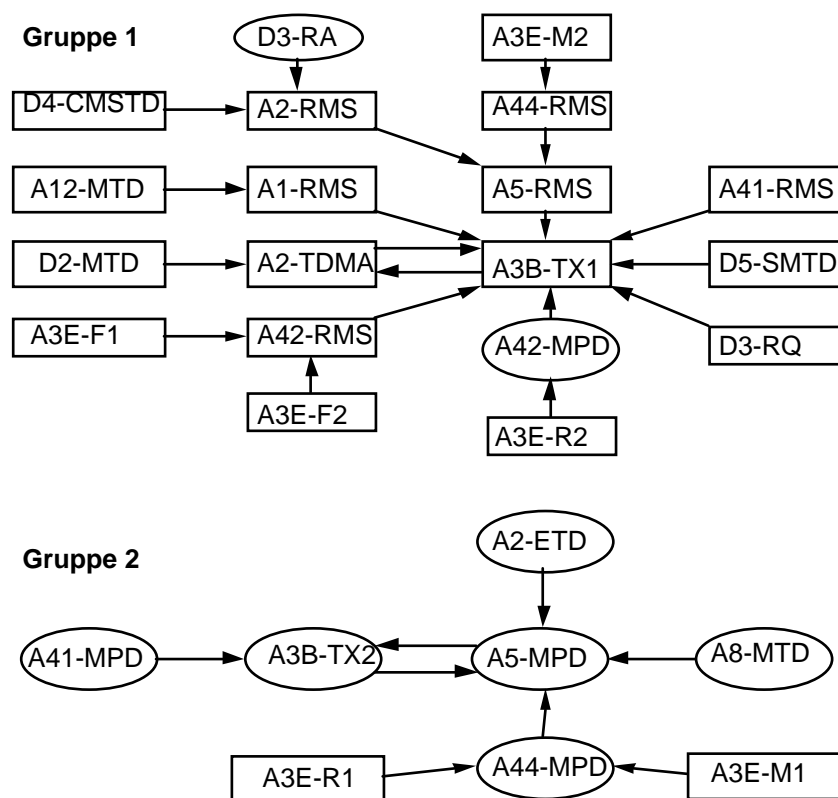


Figure 4: Abhängigkeiten zwischen den Geräten

Man könnte davon ausgehen, dass das jeweilige Gerät mit den meisten Pfeilen der beste Repräsentant jeder Gruppe darstellt (A3B-TX1 bzw. A5-MPD). Die höchste Korrelation besteht zwischen A3B-TX2 und A5-MPD. Dazu ist aber zu bemerken, dass A3B weniger Messungen als andere Geräte durchführte, die Resultate sind also weniger signifikant. A5 ist ein statisches Gerät, mit dem genau dieselben Stellen gemessen wurden, wie mit der Fleckmethode. Ohne diese Geräte besteht die beste Korrelation zwischen A2-RMS und D3-RA.

Betrachtet man die Regressionsgeraden

$$Y = A * X + B$$

Gl. 10

welche die volumetrische Fleckmethode mit allen anderen Geräten (ausser den Ausflussmessern) ergab, so zeigt sich, dass die Fleckmethode eine systematische Abweichung aufweist.

Das Mittel von B (0.26 mm) trifft sich mit dem Maximalkorn der Glaskörner (90% passieren das Sieb mit 0.25 mm und bleiben am Sieb mit 0.18 mm hängen). Das deutet darauf hin, dass die systematische Abweichung ihren Ursprung in der Korngrösse der Körner hat. Dies und die Tatsache, dass die Profilmessgeräte untereinander die besseren Korrelationen als mit der Fleckmethode aufweisen, weist darauf hin, dass eine Normierung für Makrotextur aus der Sicht der Messkunde mit einer Profilmessung als Referenzmethode besser ist als mit einer volumetrischen Messmethode. Weitere Angaben finden sich in [21].

Die folgenden Schlussfolgerungen können gezogen werden:

Wenn man das Gerät A12, das während des Experimentes viele technische Probleme hatte, weglässt, so sind alle Geräte mit einer berührungslosen Profilerfassung fähig, mindestens ein Mass für die Makrotextur zu messen, das mit mindestens einem der anderen Geräte eine Korrelation von mehr als 0.940 aufweist.

Der Korrelationskoeffizient zwischen den Messungen der Profilmessgeräte und der mit der volumetrischen Fleckmethode gemessenen mittleren Texturtiefe schwankt zwischen 0.402 und 0.966. Unter Berücksichtigung der obigen Folgerung kann die teilweise sehr tiefe Korrelation nicht verallgemeinernd mit der schlechten Messgenauigkeit dieser Geräte erklärt werden. Es ist durchaus möglich, dass die Signalverarbeitung kritisch ist. Generell sind die Messungen, die auf dem Konzept der Mittleren Profiltiefe (MPD) beruhen, besser als die, die auf dem RMS-Wert basieren. Wie auch immer, einige auf dem RMS basierende Messungen korrelieren dennoch besser mit der mittleren Texturtiefe (MTD) als einige MPD-Messungen. Das könnte mit den Bandweiten zusammenhängen, die einige Geräte benutzen. Einige dem RMS ähnliche Messungen (beispielsweise TDMA) könnten den MPD-Messungen ebenbürtig sein, weil ihre weniger geeignete Sensitivität gegenüber der Profilform durch eine besser passende Sensitivität gegenüber Profilverwellenlängen kompensiert wird. Konsequenterweise ist es somit wichtig, die optimale Bandbreite zu finden. Das Gesamtergebnis ist auch von den Zufallsfehlern einer Messmethode abhängig, hier schneidet TDMA ungewöhnlich gut ab.

Die volumetrische Fleckmethode ist signifikant verzerrt durch die Korngrößenverteilung: Texturtiefen, die tiefer als 0.25 mm sind, können nicht gemessen werden und es wird vermutet, dass Texturen bis zu 1 mm signifikant beeinflusst werden.

## **6.8 Zwischenkorrelationen in der Textur.**

Wie in [20] beschrieben, ist es wichtig, dass zwischen den einzelnen Textureigenschaften einer Teststreckenauswahl möglichst tiefe Korrelationen herrschen. Findet man beispielsweise eine hohe Korrelation zwischen Reibung und einem Texturparameter, wäre es sonst möglich, dass die gleiche Korrelation mit einem anderen Texturparameter gefunden würde. Dann wäre es unmöglich zu beurteilen, welcher Parameter der beste ist. Eine Art, die Zwischenbeziehungen der Textur zu beschreiben, ist die Zwischenkorrelation (es werden hier nur die Spektralwerte berücksichtigt). Die Zwischenkorrelation ist die Korrelation der Textur, gemessen bei einer Wellenlänge, mit der Textur, gemessen bei jeder anderen Wellenlänge. Das wurde für alle Strecken in Spanien und Belgien (Ausnahme Strecke 10) getrennt durchgeführt. Es zeigte sich, dass diese Zwischenkorrelationen ein bisschen tiefer als die in [20] sind, so dass die Streckenwahl günstig für eine Analyse der Reibungs- und Texturparameter war. Die Ergebnisse für Belgien sind etwas schlechter, dafür ist dort die Verteilung der Textur über die Bandbreite besser, d.h. die Strecken in Spanien tendierten etwas zu stark in Richtung tiefer Texturen.

Es zeigte sich, dass die Zwischenkorrelationen für die Strecken in Spanien und für die Strecken in Belgien grosse Unterschiede aufweisen. Das deutet an, dass die ausgewählten Strecken, obwohl sie in etwa dieselbe Bandbreite in Sachen Texturtiefe abdecken, in Bezug auf den spektralen Gehalt tatsächlich auf ziemlich unterschiedlichen Charakteristiken basieren. Für weiterführende Analysen könnte das ein Vorteil sein.

Hinsichtlich einer anderen Betrachtungsweise zeigte sich, dass Texturpegel, die eine Oktave auseinander liegen, immer noch eine hohe Zwischenkorrelation von mehr als 0.95 aufweisen. Um unter 0.90 zu kommen muss die Differenz in den Wellenlängen grob gesagt zwischen zwei und drei Oktaven liegen. Das bedeutet, dass eine spektrale Auflösung, die besser als eine Oktave ist, keine zusätzlichen Informationen bringt, ausser vielleicht auf

speziellen Texturen wie zum Beispiel gerillten Oberflächen. Praktisch bedeutet das, dass Spektralanalysen von Texturen keine aufwendigen Verarbeitungsmethoden wie FFT benötigen. Einfache und schnelle numerische Algorithmen können eine genügend genaue Näherung für ein breites Bandspektrum produzieren.

## **6.9 Optimale Texturwellenlängen für eine Schätzung der mittleren Texturtiefe (MTD)**

### **6.9.1 Einführung**

In diesem Abschnitt wird die Korrelation zwischen der mittleren Texturtiefe (MTD), gemessen mit der volumetrischen Fleckmethode, mit den Texturspektralebenen, gemessen mit einem Profilmesser (A2), untersucht. Die Spektralebenen werden in verschiedenen Bändern präsentiert - von Terzbändern zu Gesamtwerten, die mehrere Oktaven abdecken. Das Ziel ist, zu sehen, welche Texturwellenlängen in einer Profilmessung berücksichtigt werden müssen, um den MTD ersetzen zu können.

Die Analyse basiert auf allen Strecken, ausser Strecke 10, die nass war. Teilweise wurden auch die porösen Strecken weggelassen, da sie eine speziell tiefe Textur aufweisen, die beide Messmethoden (Fleckmethode und Profilmethode) fragwürdig machen.

### **6.9.2 Korrelation zwischen (linearem) MTD und (logarithmischen) spektralen Terzbändern**

Die Korrelationen wurden aufgrund von 86 Wertepaaren (bzw. 92 mit den offenporigen Belägen) durchgeführt und zwar mit den linearen MTD-Werten (in Millimetern) und den logarithmischen Spektralpegeln (in dB relativ zu einem Mikrometer rms). Es zeigte sich, dass die Korrelationen bei extrem kleinen Texturwellenlängen (Bänder zu 2 und 2.5 mm) ansteigen. Das kann mit der hohen Zwischenkorrelation zwischen den Texturwellenlängen von 2 - 2.5 mm mit denen von 20 - 500 mm erklärt werden. Es zeigte sich anhand der Korrelationen, dass für die Voraussage von MTD-Werten mittels Profilmessungen die Wellenlängen um 30 mm am wichtigsten sind um die grösstmögliche Genauigkeit zu erzielen.

### **6.9.3 Korrelation zwischen Log-konvertiertem MTD und (logarithmischen) spektralen Terzbändern.**

Für diese Untersuchung wurden die MTD-Werte in logarithmische Pegel umgerechnet:

$$MTD (dB) = 60 + 20 * \log MTD (mm)$$

Gl. 11

Auch bei diesem Vorgehen zeigte sich, dass für eine Vorhersage von MTD-Werten mit einer Profilmessung die Texturwellenlängen um 30 mm am wichtigsten sind.

#### 6.9.4 Beziehung zwischen MTD und Spektralpegeln für Lin-Log und Log-Log-Skalen

Vergleicht man den MTD mit den Spektralpegeln des Spektralbandes mit der besten Korrelation, d.h. 31.5 mm Texturwellenlänge, so ergibt sich eine Kurve, wenn die MTD-Werte normal angegeben werden (Lin-Log-Beziehung), und eine lineare Beziehung, wenn der MTD in ein logarithmische Mass umgerechnet wird.

Die Lin-Log-Skala hat den Nachteil, dass bei tiefen Texturen wenig unterschieden wird, ein ungünstiger Effekt, da Sicherheitsprobleme vor allem bei glatten Oberflächen auftreten.

#### 6.9.5 Korrelation zwischen Log-konvertiertem MTD und (logarithmischen) spektralen Breitbandpegeln.

Folgende Fragen stellen sich nun: Wie breit soll das Wellenband für die beste Korrelation sein? Wird die Korrelation besser oder schlechter, wenn längere Wellenlängen miteinbezogen werden?

Tabelle 24 zeigt, was passiert, wenn man von einem relativ engen Terzband über eine Oktave zu mehreren zusammengesetzten Oktaven geht. Bereits ein Terzband gibt eine Korrelation nahe beim Optimum. Man gewinnt oder verliert nichts Signifikantes bei einer Ausweitung der Bandweite. Das Optimum scheint die Oktaven von 5 zu 80 mm, die die Texturwellenlängen von 3.5 bis 112 mm abdecken, zu beinhalten.

Berücksichtigte Textur-Spektral-Bänder	Korrelationskoeffizient	Unerklärte Varianz (%)
31.5 mm, Terz	0.92	16
40 mm, Oktave	0.91	17
40+20 mm, zwei Oktaven	0.92	16
40+20+10 mm, drei Oktaven	0.91	16
40+20+10+5 mm, vier Oktaven	0.91	17
40+20+10+5+2.5 mm, fünf Oktaven	0.89	20
80+40+20+10, vier Oktaven	0.92	16
160+80+40+20+10 mm, fünf Oktaven	0.89	21
315*160+80+40+20+10 mm, sechs Oktaven	0.88	22

*Tabelle 24: Korrelation zwischen dem Logarithmus von MTD und Textur in Spektralbändern, ausgehend von der optimalen Terz zu weiteren Bändern, indem längere und kürzere Wellenlängen addiert werden.*

Diese Berechnungen basieren auf Spektralpegeln, die auf dem berechneten RMS der Profilkurve innerhalb eines gewissen Bandes beruhen. Wenn man eine Texturtiefenkalkulation benutzt, die direkt auf der Profilkurve beruht, ist es gut möglich, dass kurze Wellenlängen einflussreicher werden als hier, weil sie die Spitzen im Profil ausmachen. Die optimale Hochpassfilterung für jede Vorverarbeitung von MTD-Voraussagen aus Profilmessungen scheint demzufolge um 100 mm Texturwellenlängen zu liegen. Das ist logisch, wenn man bedenkt, dass die MTD-Werte unter Anwendung eines Verteilgerätes mit 65 mm Durchmesser ermittelt wurden. Es ist zu erwarten, dass das Verteilgerät, mit dem die Glaskörner verteilt werden, Texturen mit Wellenlängen, die kürzer als sein näherungsweise doppelter Durchmesser sind, nicht einbezieht.

## 6.10 Ausflussmesser

Zwei Ausflussmesser (B8 und B11E) nahmen am Experiment teil. Die beiden Geräte hatten unterschiedliches Bedienungspersonal und waren unterschiedlich konstruiert. B8 war in Belgien und Spanien, B11E wurde nur in Spanien eingesetzt. B11E verfügte über ein automatisches Zeitmessgerät, so dass es möglich war, auch sehr kurze Intervalle zu messen, wenn die Textur sehr grob war oder wenn es sich um eine offenporige Deckschicht handelte (trotzdem wurden die offenporigen Beläge in diesem Abschnitt nicht berücksichtigt). Bei B8 wurde die Ausflusszeit manuell mit einer Stoppuhr gemessen, kurze Ausflusszeiten konnten somit nicht gemessen werden; die Messungen, bei denen die Ausflusszeit mit 0 angegeben wurde, wurden für die Analyse nicht berücksichtigt.

Um die Ausflussmessungen mit der Textur zu korrelieren wurde eine bi-logarithmische Regression mit natürlichen Logarithmen durchgeführt:

$$\ln(Y) = A * \ln(X) + B$$

Gl. 12

Y ist die Ausflusszeit in Sekunden und X ist eine Makrotexturmessung. Die Resultate sind in den Tabellen, Tabelle 25 und Tabelle 26 angegeben.

In der untenstehenden Tabelle ist die Rangliste der verschiedenen Texturmessungen gemäss ihrer Korrelation mit dem Ausflussmesser B11E aufgeführt. N ist die Anzahl Messungen. STD ist die residuelle relative Standardabweichung der Ausflusszeit.

Korrelationskoeffizient	Auf MPD basierend	Auf RMS basierend	STD (%)	N
0.939	A8-MTD		14	18
0.897	A5-MPD		22	18
0.890	A2-ETD		31	18
0.886	A44-MPD		20	17
0.885	A42-MPD		20	17
0.860	A41-MPD		22	17
0.852		D3-RQ	27	18
0.848	D3-RA		28	18
0.843		D4-CSMTD	30	19
0.836		A42-RMS	27	17
0.828		A5-RMS	31	18
0.819		A44-RMS	28	17
0.819		A2-RMS	31	18
0.809		A41-RMS	27	17
0.798		D5-SMTD	31	18
0.784		A2-TDMA	42	18
0.755		A3E-R1	36	18
0.731		A3E-R2	35	18
0.969		A3E-F1	31	18
0.985		A1-RMS	31	18
0.642		A3E-M2	54	18
0.625		A3E-M1	68	18
0.525		A3E-F2	36	18
0.523		A12-MTD	79	7
0.514		D2-MTD	35	18

*Tabelle 25: Rangliste der verschiedenen Texturmessungen gemäss ihrer Korrelation mit dem Ausflussmesser B11. N ist die Anzahl Messungen. STD ist die residuelle relative Standardabweichung der Ausflusszeit.*

Korrelationskoeffizient	Auf MPD basierend	Auf RMS basierend	STD (%)	N
0.880	A8-MTD		15	25
0.857	A2-ETD		21	25
0.852	A5-MPD		16	25
0.768	A44-MPD		15	23
0.732	A3B-TX2		16	6
0.715	A42-MPD		18	24
0.704	A41-MPD		21	24
0.670		A1-RMS	22	22
0.633	D3-RA		23	24
0.571		A2-RMS	26	25
0.555		D3-RQ	23	24
0.481		A3E-F1	34	14
0.478		A3E-R2	35	14
0.476		D5-SMTD	28	24
0.472		A3E-R1	36	14
0.468		D4-CSMTD	28	24
0.467		A5-RMS	28	25
0.454		A3B-TX1	26	6
0.440		A2-TDMA	42	25
0.407		A3E-M2	46	14
0.403		A44-RMS	26	23
0.400		A3E-F2	36	14
0.358		A42-RMS	34	24
0.353		A41-RMS	35	24
0.282		A3E-M1	55	14
0.218		D2-MTD	30	23
0.173		A12-MTD	58	23

*Tabelle 26: Rangliste der verschiedenen Texturmessungen gemäss ihrer Korrelation mit dem Ausflussmesser B8. N ist die Anzahl Messungen. STD ist die residuelle relative Standardabweichung der Ausflusszeit.*

Einmal mehr zeigt sich hier die Überlegenheit der auf MPD basierenden Messungen (einschliesslich der volumetrischen Fleckmethode, die in beiden Fällen die höchste Korrelation ergab) gegenüber den auf RMS basierenden Messungen. B11E hat höhere Korrelationen mit den Makrotexturmessungen, der Hauptgrund dürfte die höhere Präzision der automatischen Zeitmessung sein. Zwischen B8 und B11E beträgt der Korrelationskoeffizient 0.887 und die relative Standardabweichung liegt bei 16% der Ausflusszeit. Es kann gefolgert werden, dass die auf einer Fläche (oder MPD) basierenden Messungen die Drainage viel besser charakterisieren als die auf RMS basierenden Messungen.

## 7 Analyse der Reibungsmessungen

Für die Analyse der Reibungsmessungen wurden drei Hauptgruppen gebildet:

- Seitenkraft (SFC)
- Konstanter Schlupf (SLIP)
- Blockiertes Rad (LOCKED)

Ein Gerät hatte variablen Schlupf (SWP), es wurde den Geräten mit blockiertem Messrad zugeordnet. Einige Geräte waren für Messungen der Reibungsspitze ausgerüstet, diese wurden separat behandelt (PEAK). Innerhalb der Gruppen wurden die Geräte weiter unterteilt und zwar anhand der benutzten Messreifen: Glatt, gerillt und profiliert. Im Abschnitt 7.1 werden Vergleiche innerhalb der Gruppen dargestellt, im Abschnitt 7.2 werden die einzelnen Gruppen miteinander verglichen und im Kapitel 7.3 werden Vergleiche mit den Texturmessungen und den Messungen der Reibungsspitze dargestellt.

Die Vergleiche wurden anhand linearer Regressionen durchgeführt, die Korrelationskoeffizienten (R) sind in den folgenden Tabellen aufgeführt.

### 7.1 Gerätevergleich innerhalb der Gruppen

In einem ersten Schritt wurden die Geräte innerhalb einer Gruppe miteinander verglichen. Zuerst wurde ein Vergleich der SCRIM-Geräte durchgeführt. Dieser Vergleich wurde am LCPC mit sämtlichen Daten durchgeführt. Für die anderen Vergleiche wurden die einzelnen Durchläufe bei einer Geschwindigkeit zuerst gemittelt und dann verglichen. Im Gegensatz zu einem Vergleich sämtlicher Einzelmessungen, ist es wichtig auf die Verbesserung der Resultate hinzuweisen, wenn verschiedene Durchgänge bei einer Geschwindigkeit zuerst gemittelt werden (Mittelbildung vermindert Punktwolken). Vergleicht man die R-Werte in Tabelle 27 mit denselben Geräten in Tabelle 28, zeigt sich, dass Mitteln die Korrelation generell verbessert.

Die erhaltenen Korrelationen wiesen mit wenigen Ausnahmen Werte von über 0.7, oft über 0.9, auf.

#### 7.1.1 Vergleich der SCRIM-Geräte

Der Vergleich der SCRIM's basierte auf den korrigierten Werten des mittleren SFC, der für jeden Abschnitt (A und B) berechnet wurde. Diese Werte wurden korrigiert, um die unterschiedlichen Geschwindigkeiten, mit denen die Messungen durchgeführt wurden, zu berücksichtigen. Grundsätzlich betragen die offiziellen Geschwindigkeiten für die Korrelationsbetrachtungen 30, 60 und 90 km/h. Einzelne Geräte, die ihre Norm- oder Routinemessungen bei 50 km/h durchführen, nahmen Messungen bei 30, 50 und 90 km/h vor. Teilweise konnten die erwünschten 90 km/h nicht erreicht werden, dann wurde mit 70 oder 80 km/h gemessen.

In diesen Fällen wurden die Messwerte anhand des Penn State Modells folgendermassen korrigiert:

$$F(S) = F_0 * \exp[S/S_0] \quad \text{Gl. 13}$$

S ist die Schlupfgeschwindigkeit des Testreifens.

Wenn V die Geschwindigkeit des Fahrzeuges ist, dann gilt:

$$S=V \quad \text{für blockiertes Messrad}$$

$$S=V * \% \text{-Schlupf} \quad \text{für konstanten Schlupf}$$

$$S=V * \sin(x) \quad \text{für ein übersteuertes Rad mit dem Winkel } x \text{ (} x = 20^\circ \text{ für SCRIM's)}$$

F(S) ist der Reibungskoeffizient und V ist die Schlupfgeschwindigkeit

F<sub>0</sub> und S<sub>0</sub> hängen von den Belageigenschaften und dem Testgerät ab.

Jeder Streckenteil A und B war 75 m lang. Das von den SCRIM's benutzte Samplingintervall belief sich auf 10 m, so dass für jeden Teil A und B 7 SFC-Werte erhalten wurden. Für die Auswertungen wurden diese 7 Werte gemittelt. Da der Gleitwiderstand zwischen A und B oft signifikante Unterschiede aufwies, wurden alle korrigierten und für die Abschnitte gemittelten Werte akzeptiert. Daraus ergab sich theoretisch als Maximum die folgende Anzahl von Werten:

48 Testrecken (28 in Belgien, 20 in Spanien) \*2 Abschnitte A und B

= 96 \*3 Geschwindigkeiten

= 288 \*2 Durchläufe für jede Geschwindigkeit

= 576 Werte

Aus verschiedenen Gründen lagen die effektiven Wertepaare allerdings meist etwas niedriger (ungültige Messungen, weniger Durchläufe etc.). Für die Geräte, die in beiden Ländern teilnahmen, betrug die Höchstzahl 536 Werte, manchmal auch nur 500.

Für alle Wertepaare wurde die lineare Regression gemäss

$$Y = A * X + B$$

Gl. 14

durchgeführt und der Korrelationskoeffizient R und die dazugehörigen residuellen Reste berechnet. Die linearen Regressionen wurden für alle Geräte durchgeführt, indem jedes Gerät als Y mit allen anderen als X gerechnet wurde. Aus diesem Grunde kann die Verbindungen zwischen den Geräten in beiden Richtungen durchgeführt werden.

Tabelle 27 fasst die Resultate zusammen. Angesichts der Tatsache, dass es sich ausschliesslich um SCRIM-Geräte handelte, zeigten sich relativ tiefe Korrelationen, meist um 0.8, oft tiefer. Einige SCRIM's, speziell C3E haben R-Werte die im Vergleich zu den anderen signifikant tiefer liegen (oft um 0.5 und 0.6). Wie sich später herausstellte, hatte das Gerät einen Defekt bei der Halterung des Messrades.

		Y							
X		D1	D2	D3	D4	D5	C3b	C3e	C6e
	D1	A		1.007	1.116	1.352	1.237		0.723
B			0.011	0.136	0.163	0.134		0.148	0.013
R			0.833	0.867	0.830	0.782		0.427	0.766
N			212	216	212	216		174	192
R.S.D.			0.053	0.047	0.053	0.061		0.086	0.063
D2	A	0.828		0.870	1.057	1.006	1.024	0.786	0.964
	B	0.085		0.004	0.019	0.022	0.031	0.101	0.048
	R	0.833		0.798	0.773	0.768	0.770	0.613	0.784
	N	214		498	470	510	276	186	204
	R.S.D.	0.048		0.057	0.061	0.060	0.063	0.071	0.053
D3	A	0.778	0.917		1.158	1.080	1.179	0.746	0.917
	B	0.193	0.130		0.006	0.013	0.029	0.198	0.149
	R	0.867	0.798		0.856	0.834	0.869	0.574	0.784
	N	216	498		473	501	270	186	204
	R.S.D.	0.039	0.058		0.050	0.053	0.051	0.073	0.051
D4	A	0.614	0.731	0.739		0.887	0.976	0.532	0.705
	B	0.190	0.143	0.078		0.032	0.044	0.233	0.169
	R	0.830	0.773	0.856		0.864	0.917	0.504	0.783
	N	212	470	473		536	249	181	206

	R.S.D.	0.036	0.051	0.040		0.042	0.035	0.061	0.039
D5	A	0.632	0.764	0.773	0.974		0.978	0.608	1.028
	B	0.210	0.156	0.089	0.053		0.081	0.216	0.056
	R	0.782	0.768	0.834	0.864		0.871	0.590	0.769
	N	216	510	501	536		285	186	204
	R.S.D.	0.043	0.053	0.045	0.044		0.042	0.058	0.051
C3b	A		0.753	0.737	0.939	0.891			
	B		0.105	0.051	0.005	0.001			
	R		0.770	0.869	0.917	0.871			
	N		276	270	249	285			
	R.S.D.		0.054	0.041	0.034	0.040			
C3e	A	0.591	0.780	0.770	0.974	0.971			0.876
	B	0.254	0.152	0.101	0.074	0.035			0.133
	R	0.427	0.613	0.574	0.504	0.590			0.590
	N	174	186	186	181	186			169
	R.S.D.	0.086	0.071	0.074	0.081	0.073			0.076
C6e	A	0.723	0.813	0.855	1.112	0.749		0.673	
	B	0.113	0.075	0.014	0.074	0.173		0.126	
	R	0.766	0.784	0.784	0.783	0.769		0.590	
	N	192	204	204	206	204		169	
	R.S.D.	0.052	0.049	0.049	0.049	0.043		0.067	

R.S.D.: Residuelle Standardabweichung

*Tabelle 27: Vergleich der SCRIM's aufgrund aller Einzelmessungen*

## 7.1.2 Vergleich von ähnlichen Messausrüstungen

Bei diesen Vergleichen zeigen die Tabellen oben rechts den Vergleich bei allen Geschwindigkeiten, während unten links der Vergleich bei der Standardgeschwindigkeit gezeigt wird. Sie wird mit 60 km/h angegeben, ist aber die mittlere Geschwindigkeit, wie sie in Tabelle 6 in Kap. 0 angegeben ist. Für die Diskussion der Resultate, die nun folgen, werden nur die Vergleiche bei diesen Standardgeschwindigkeiten herbeigezogen, da die anderen beiden Geschwindigkeiten bei normalen Tests weniger gebraucht werden und im vorliegenden Experiment vorwiegend für die Untersuchung der Beziehung zwischen Reibung und Geschwindigkeit benutzt wurden.

In den Tabellen, Tabelle 28, Tabelle 29 und Tabelle 30 finden sich die Vergleich der Geräte der einzelnen Gruppen mit ähnlichen Messverfahren (SFC, SLP und LKD). Tabelle 27 enthält die SCRIM's und auch die drei anderen Geräte, welche die Seitenkraft messen. Die mittlere Korrelation bei der nominellen Messgeschwindigkeit von 60 km/h (die normale Messgeschwindigkeit der meisten Geräte) betrug 0.863.

Wenn man alle Geschwindigkeiten berücksichtigt, zeigt sich eine kleine Verbesserung auf 0.868, die auf die grössere Datenmenge zurückzuführen ist. Die höchste Korrelation, 0.961, findet sich zwischen C9 und C10, die zweitbeste, 0.960, zwischen C3B und D5. D2 hatte mit 0.802 das tiefste Gesamtmittel und C3B mit 0.907 das höchste. Die Ausnahme war C3E, wie schon im vorgängigen Kapitel erwähnt worden war. Das Gerät hatte infolge eines Unfalls ein gelockertes Messrad. B10E wurde nicht berücksichtigt, da der MuMeter nur auf fünf Strecken Messungen durchführte. Die Seitenkraftgeräte (SFC) hatten gesamthaft gesehen die besten Korrelationen.

In der nachstehenden Tabelle ist Vergleich der Seitenkraftgeräte (SFC) untereinander aufgeführt.

## Vergleich der Seitenkraftmessgeräte

Gerät	C3B	C3E	C6E	D1E	D2	D3	D4	D5	C8	C9	C10	Mittel
C3B	.	.	.	0.865	0.935	0.946	0.931	0.9	0.894	0.826	0.9	
C3E	.		0.763	0.59	0.769	0.757	0.675	0.758	0.617	0.65	0.695	0.697
C6E	.	0.689		0.901	0.899	0.906	0.906	0.855	0.755	0.831	0.842	0.862
D1E	.	0.42	0.889		0.907	0.931	0.929	0.862	0.79	0.896	0.859	0.884
D2	0.889	0.589	0.896	0.902		0.891	0.856	0.859	0.8	0.78	0.786	0.86
D3	0.953	0.601	0.935	0.933	0.882		0.9	0.892	0.836	0.766	0.807	0.874
D4	0.945	0.532	0.897	0.943	0.541	0.9		0.929	0.837	0.871	0.837	0.89
D5	0.96	0.69	0.893	0.858	0.862	0.899	0.942		0.863	0.84	0.869	0.878
C8	0.88	0.392	0.796	0.816	0.738	0.825	0.859	0.866		0.87	0.898	0.839
C9	0.851	0.477	0.826	0.879	0.752	0.791	0.83	0.841	0.897		0.956	0.856
C10	0.87	0.543	0.836	0.839	0.759	0.808	0.87	0.863	0.914	0.961		0.853
B10E	.	.	[0.511 ]	[0.61]	0.453	[0.425]	[0.445 ]	[0.426 ]	0.478	0.38	0.542	0.474
Mittel	0.907	0.548	0.871	0.882	0.802	0.881	0.859	0.887	0.843	0.848	0.858	

C3E: Defektes Messrad während dem Experiment Mittel 60 km/h 0.863

Mittel unten Standardgeschwindigkeit gemäss Tabelle 5 Mittel alle Geschw. 0.868

Mittel rechts Alle Messgeschwindigkeiten

kursiv wird als Ausreisser betrachtet und nicht zur weiteren Mittelbildung beigezogen

(.) 5 oder weniger Beobachtungen

[] weniger als 10 Beobachtungen

Tabelle 28: Vergleich der Seitenkraftgeräte untereinander (SFC)

Tabelle 29 zeigt die Resultate der Geräte mit konstantem Schlupf. Die Gesamtkorrelation betrug 0.834 bei den normalen Gebrauchsgeschwindigkeiten und 0.856 bei allen Geschwindigkeiten. D7 wurde nicht berücksichtigt, da zu wenige Daten zur Verfügung standen und der Schlupf bei diesem Gerät war nicht konstant. Wie Tabelle 4 zeigte, variierte der konstante Schlupf der einzelnen Geräte zwischen 14% und 86%. Es wurde untersucht, ob Geräte mit dem gleichen Schlupf besser korrelierten, spezielle Tendenzen wurden aber keine gefunden. Die individuellen Korrelationen reichten von 0.694 zwischen B1 und B2 bis

zu 0.935 zwischen B4 und B1 bzw. 0.94 mit B3. Der Gesamtdurchschnitt einzelner Geräte reicht von 0.768 für B1 bis zu 0.885 für B3.

Die untenstehende Tabelle zeigt den Vergleich der Geräte mit konstantem Schlupf (SLP) untereinander.

Vergleich von Geräten mit konstantem Schlupf und anderen Schlupfmessgeräten

Gerät	B4E SLP	C5	D8	B1 SLP	B2 SLP	B3	B5 SLP	C4	D7B SLP	Mittel
B4ESLP		0.807	0.934	0.935	0.784	0.94	0.839	0.886	.	0.875
C5	0.807		0.875	0.791	0.779	0.862	0.843	0.835	0.624	0.827
D8	0.929	0.864		0.817	0.861	0.918	0.87	0.854	0.53	0.876
B1SLP	0.935	0.718	0.769		0.776	0.811	0.827	0.774	0.35	0.819
B2SLP	0.782	0.781	0.829	0.694		0.917	0.883	0.871	0.025	0.839
B3	0.935	0.864	0.915	0.773	0.905		0.919	0.913	0.58	0.897
B5SLP	0.822	0.805	0.845	0.753	0.855	0.892		0.848	0.462	0.861
C4	0.886	0.821	0.824	0.735	0.873	0.908	0.827		0.688	0.854
D7BSLP	.	[0.635 ]	[0.705 ]	.	[0.11]	[0.504]	[0.354 ]	[0.546 ]		
Mittel	0.871	0.809	0.854	0.768	0.817	0.885	0.828	0.839		

Mittel unten      Standardgeschwindigkeit gemäss Tabelle 5      Mittel 60 km/h      0.834

Mittel rechts      Alle Messgeschwindigkeiten      Mittel alle Geschw.      0.856

kursiv wird als Ausreisser betrachtet und nicht zur weiteren Mittelbildung beigezogen

(.)      5 oder weniger Beobachtungen

[]      weniger als 10 Beobachtungen

Tabelle 29: Vergleich der Geräte mit konstantem Schlupf (SLP) untereinander

Tabelle 30 zeigt die Resultate für die Geräte mit blockiertem Messrad (LKD). Die Gesamtmittel sind angegeben, sollten aber in ihrem Kontext betrachtet werden, da sie glatte und gerillte Messreifen einbeziehen. Die folgende Diskussion der Resultate betrachtet diese Gruppen getrennt. B4SWP wurde hier berücksichtigt, da es die gleichen Reifen wie B6 hatte. Weitere Vergleiche finden sich in den folgenden Abschnitten. Wie zu erwarten war, hatte B4ESWP schlechtere Korrelationen als B6 und D6, da das Messrad nicht eigentlich blockiert ist. B6 hatte einen glatten ASTM-Reifen und D6 hatte einen glatten PIARC-Reifen. A13 hatte nicht so gute Korrelationen: 0.747 mit B6 und D6. B4EMAX wurde ebenfalls hier miteinbezogen, da der maximale Schlupf normalerweise 86% betrug und deshalb näher bei den Geräten mit blockierten Messreifen lag als bei den anderen Geräten mit konstantem Schlupf. Es zeigte sich, dass B4EMAX recht gut mit den Geräten mit blockiertem Messrad korrelierte.

In untenstehender Tabelle sind die Vergleiche der Geräte mit blockierten Messreifen (LKD) untereinander aufgeführt.

Vergleich von Messungen mit blockiertem Messrad

Gerät	glatt					gerillt					Mittel	
	A13	B4E max	B4 SWP	B6 524	D6	B1 LKD	B2 LKD	B5 LKD	B6 501	C1		
glatt												
A13		.	0.68	0.78	0.84	0.8	0.68	0.76	0.81	0.83	0.77	
B4Emax	0.86		.	.	.	.	.	.	.	.		
B4ESWP	0.76	0.95		0.92	0.87	0.91	0.86	0.83	0.87	0.93	0.86	
B6524	0.75	0.84	0.92		0.94	0.74	0.47	0.72	0.66	0.86	0.76	
D6	0.75	0.86	0.81	0.94		0.57	0.47	0.64	0.68	0.75	0.72	
gerillt												
B1LKD	0.7	0.9	0.93	0.82	0.74		0.87	0.91	0.9	0.87	0.82	
B2LKD	0.65	0.92	0.76	0.7	0.65	0.89		0.86	0.88	0.73	0.73	
B5LKD	0.71	0.68	0.84	0.84	0.79	0.91	0.91		0.87	0.81	0.8	
B6501	0.81	0.79	0.87	0.82	0.68	0.9	0.82	0.87		0.92	0.82	
C1	0.76	0.84	0.91	0.9	0.83	0.89	0.81	0.87	0.92		0.84	
Mittel	0.84	0.85	0.86	0.84	0.78	0.85	0.79	0.82	0.83	0.86		

			beide	glatt	gerillt
Mittel unten	Standardgeschw. gemäss Tabelle 5	Mittel 60 km/h	0.83	0.84	0.88
Mittel rechts	Alle Messgeschwindigkeiten	Mittel alle Geschw.	0.79	0.84	0.86
(.)	5 oder weniger Beobachtungen				
[]	weniger als 10 Beobachtungen				

Tabelle 30: Vergleich der Geräte mit blockierten Messreifen (LKD) untereinander

Die Geräte mit gerillten Messreifen hatten Korrelationen von 0.808 zwischen C1 und B2 bis zu 0.919 zwischen C1 und B6. Es zeigte sich auch, dass die Korrelationen zwischen Geräten mit dem PIARC- und dem ASTM-Reifen 0.817, 0.872 und 0.898 betragen. Grundsätzlich ergaben sich gute Korrelationen für die Geräte mit blockierten Messreifen, wenn man die Geräte mit gerillten und glatten Messreifen getrennt betrachtete.

## **7.2 Vergleich der verschiedenen Gruppen**

Die Tabellen, Tabelle 31, Tabelle 32 und Tabelle 33 zeigen die Vergleiche zwischen den einzelnen Gruppen. Tabelle 31 zeigt den Vergleich der Seitenkraftmesser (SFC) mit den Geräten mit konstantem Schlupf (SLP); in der Tabelle 32 findet sich der Vergleich von Geräten mit blockiertem Messrad (LKD) und den Geräten mit konstantem Schlupf und in Tabelle 33 findet sich schliesslich der Vergleich der Geräte mit blockiertem Messrad und den Seitenkraftmessern. Anders als in Tabelle 28, Tabelle 29 und Tabelle 30 sind diesmal nur die Vergleiche bei der normalen Messgeschwindigkeit aufgeführt.

Der Vergleich von Seitenkraftmessern und Geräten mit konstantem Schlupf in Tabelle 31 ergab im allgemeinen gute Vergleichbarkeit mit mittleren Korrelationen, die meisten liegen zwischen 0.8 und 0.9. Glatte und gerillte Reifen wurden getrennt, ergaben aber keine signifikanten Differenzen. Das Gesamtmittel beträgt 0.819. Da die tatsächlichen Schlupfgeschwindigkeiten dieser Geräte ähnlich sind, konnte man recht gute Korrelationen erwarten. Aufgrund der tiefen Schlupfgeschwindigkeiten waren auch kleine Differenzen zwischen gerillten und glatten Reifen zu erwarten, die Ergebnisse bestätigten dies. Es ist nur bei hohen Schlupfgeschwindigkeiten der Fall, dass die Makrotextur einen grösseren Einfluss hat und der Unterschied zwischen den Reifen grösser wird (siehe auch Tabelle 30).

In untenstehender Tabelle ist der Vergleich der Seitenkraftmesser mit den Geräten mit konstantem Schlupf aufgeführt.

Vergleich Seitenkraft (SFC) und konstanter Schlupf (SLP)

Gerät	glatt			gerillt							Mittel
	B4E SLP	C5	D8	B1 SLP	B2 SLP	B3	B5 SLP	C4	D7B SLP		
C3B	.	0.88	0.9		0.78	0.89	0.93	0.87	0.91	0.73	0.88
C3E	0.39	0.58	0.59		0.63	0.54	0.63	0.7	0.57	.	0.58
C6E	0.66	0.67	0.79		0.78	0.76	0.77	0.81	0.74	.	0.75
D1E	0.75	0.75	0.83		0.88	0.83	0.8	0.74	0.68	.	0.78
D2	0.57	0.75	0.83		0.76	0.75	0.8	0.85	0.71	0.4	0.75
D3	0.65	0.84	0.84		0.77	0.84	0.86	0.89	0.81	0.63	0.81
D4	0.86	0.85	0.86		0.82	0.84	0.86	0.86	0.82	0.67	0.85
D5	0.81	0.86	0.88		0.81	0.84	0.86	0.89	0.84	0.75	0.85
C8	0.88	0.86	0.9		0.81	0.86	0.88	0.87	0.91	0.7	0.87
C9	0.84	0.84	0.89		0.66	0.75	0.79	0.76	0.82	0.55	0.79
C10	0.92	0.89	0.91		0.79	0.8	0.86	0.85	0.85	0.66	0.86
B10E	.	0.53	0.35		.	0.13	0.24	0.09	.	.	0.05
Mittel	0.87	0.82	0.86		0.87	0.82	0.84	0.84	0.81	0.64	0.82

Nur Standardgeschwindigkeit

kursiv wird als Ausreisser betrachtet und nicht zur weiteren Mittelbildung beigezogen

(.) 5 oder weniger Beobachtungen

[] weniger als 10 Beobachtungen

*Tabelle 31: Vergleich der Seitenkraftmesser mit den Geräten mit konstantem Schlupf*

Tabelle 32 zeigt den Vergleich zwischen blockiertem Messrad (oder 100% Schlupf) und konstantem Schlupf. Die Reifentypen wurden wiederum getrennt betrachtet und diese Trennung ergab auch bessere Resultate, allerdings mit kleinerem Effekt als beim Vergleich der Geräte mit blockiertem Rad untereinander (Tabelle 33). Das Gesamtmittel beläuft sich auf 0.783.

Untenstehende Tabelle zeigt den Vergleich von blockiertem Messrad mit konstantem Schlupf.

Vergleich blockiertes Messrad (LKD) mit konstantem Schlupf (SLP)

Gerät	glatt			gerillt						Mittel	
	B4E SLP	C5	D8	B1 SLP	B2 SLP	B3	B5 SLP	C4	D7B SLP		
glatt											
A13	0.7	0.73	0.81	0.65	0.81	0.81	0.76	0.78	0.46	0.76	
B4Emax	0.96	0.52	0.8	0.9	0.83	0.84	.	0.75	.	0.77	
B4ESWP	0.94	0.84	0.92	0.93	0.77	0.89	0.84	0.81	.	0.87	
B6524	0.93	0.84	0.87	0.71	0.76	0.83	0.75	0.73	0.55	0.8	
D6	0.8	0.82	0.83	0.58	0.74	0.73	0.7	0.71	0.51	0.74	
gerillt											
B1LKD	0.84	0.9	0.83	0.91	0.76	0.82	0.85	0.8	[0.73]	0.84	
B2LKD	0.73	0.76	0.7	0.76	0.75	0.77	0.77	0.8	0.71	0.67	
B5LKD	0.76	0.88	0.82	0.76	0.8	0.82	0.89	0.74	0.76	0.72	
B6501	0.85	0.85	0.84	0.71	0.81	0.85	0.77	0.76	[0.71]	0.81	
C1	0.91	0.92	0.89	0.78	0.81	0.89	0.86	0.82	0.43	0.86	
Mittel	0.84	0.81	0.83	0.77	0.78	0.82	0.8	0.77	0.61	0.78	

Nur Standardgeschwindigkeit

kursiv wird als Ausreisser betrachtet und nicht zur weiteren Mittelbildung beigezogen

(.) 5 oder weniger Beobachtungen

[] weniger als 10 Beobachtungen

*Tabelle 32: Vergleich von blockierten Messrad mit konstantem Schlupf*

Tabelle 33 zeigt den Vergleich zwischen den Seitenkraftmessern und den Geräten mit blockiertem Messrad. Die mittleren Korrelationen reichen von 0.746 bis zu 0.846, wenn man C3E weglässt. Diese Korrelationen sind generell tiefer als die vorangegangenen, sind aber höher als erwartet, da sie bei zwei extremen Schlupfgeschwindigkeiten messen. Das Gesamtmitel betrug 0.819.

Die untenstehende Tabelle enthält den Vergleich zwischen Seitenkraftmessern und Geräten mit blockiertem Messrad.

Vergleich blockiertes Messrad (LKD) mit Seitenkraft (SFC)

Gerät	C3B	C3E	C6E	D1E	D2	D3	D4	D5	C8	C9	C10	B10E	Mittel
glatt													
A13	0.86	0.48	0.8	0.8	0.76	0.77	0.82	0.79	0.73	0.73	0.74	.	0.78
B4Emax	.	0.47	0.78	0.78	0.68	0.77	0.83	0.73	0.82	0.85	0.86	.	0.76
B4ESW P	.	0.66	0.69	0.79	0.76	0.81	0.85	0.84	0.84	0.83	0.91	0.27	0.8
B6524	0.74	0.65	0.81	0.84	0.74	0.78	0.82	0.81	0.79	0.89	0.91	0.46	0.8
D6	0.67	0.69	0.84	0.87	0.71	0.72	0.76	0.81	0.76	0.91	0.9	0.13	0.78
gerillt													
B1LKD	0.8	0.81	0.79	0.8	0.78	0.84	0.85	0.85	0.83	0.77	0.86	.	0.82
B2LKD	0.76	0.76	0.82	0.85	0.72	0.85	0.76	0.79	0.77	0.64	0.72	0.34	0.77
B5LKD	0.78	0.76	0.77	0.78	0.81	0.87	0.81	0.83	0.86	0.78	0.86	0.23	0.81
B6501	0.9	0.49	0.79	0.82	0.76	0.92	0.85	0.82	0.77	0.73	0.8	.	0.82
C1	0.83	0.72	0.81	0.85	0.75	0.88	0.87	0.85	0.81	0.82	0.89	0.36	0.83
Mittel	0.79	0.69	0.79	0.82	0.75	0.82	0.82	0.81	0.8	0.79	0.85	0.3	0.79

Nur Standardgeschwindigkeit

kursiv wird als Ausreisser betrachtet und nicht zur weiteren Mittelbildung beigezogen

(.) 5 oder weniger Beobachtungen

[] weniger als 10 Beobachtungen

*Tabelle 33: Vergleich zwischen Seitenkraftmessern und Geräten mit blockiertem Messrad*

Die besten Korrelationen zwischen den Gerätegruppen ergaben sich somit zwischen den Seitenkraftmessern und den Messungen mit konstantem Schlupf. Wie auch immer, nähme man alles zusammen, ergäbe sich ein Gesamtmittelwert von 0.8. Die Überprüfung der Qualität einer allfälligen Harmonisierung zeigt sich, wenn sie diese Werte auf die Werte der gruppeninternen Vergleiche anheben würde, also beispielsweise 0.86 oder besser.

### **7.3 Vergleich von Geräten mit Messung der Reibungsspitze mit Texturmessungen**

Die Seitenkraftmessungen, die Messungen mit konstantem Schlupf und die Messungen mit blockiertem Messrad wurden mit den Texturmessungen und den Messungen der Reibungsspitze verglichen. Die Vergleiche wurden nur für die normal benutzten Geschwindigkeiten durchgeführt. Die Ergebnisse finden sich in den Tabellen, Tabelle 34, Tabelle 35 und Tabelle 36.

Tabelle 34 zeigt, dass die Seitenkraftmesser nur eine mittelmässige Korrelation mit den Pendeln (A14 und B7) aufweisen, die Mittel liegen bei 0.649 bzw. 0.678. Die Korrelationen mit der Makrotextur waren sehr schlecht, d.h. unter 0.25. Mit den Pendeln wurde eine bessere Korrelation erwartet, die tiefe Korrelation mit der Makrotextur entsprach demgegenüber den Erwartungen. Die Korrelationen mit den Messungen der Reibungsspitze zeigen keine klaren Trends. Der Grund liegt in der Tatsache, dass keines dieser Geräte auf dieselbe Weise funktionierte. Zudem war die Datenmenge der Reibungsspitzenmessungen für rund die Hälfte der Geräte klein. ABS wurde ebenfalls hier mitberücksichtigt. Diese Messungen sollten unter der Spitzenreibungsschlupfgeschwindigkeit messen, im Gegensatz zu Schlupfgeschwindigkeiten bei oder über der Spitzenreibungsschlupfgeschwindigkeit. Wie auch immer, die beste Korrelation der Reibungsspitzenmessgeräte gegenüber anderen Reibungsspitzenmessgeräten war 0.766 zwischen C1 und B6 für den glatten Messreifen und 0.826 für den gerillten Messreifen. Alle anderen lagen unter 0.7 und so tief wie 0.314.

Die folgende Tabelle zeigt den Vergleich vom Seitenkraft mit Textur und Reibungsspitze.

Vergleich von Seitenkraft (SFC) mit Textur und Reibungsspitze (PEAK)

Gerät	SFC-Textur				SFC-PEAK							
	A14 BPN	B7 SRT	A8 MTD	Mittel* RMS	glatt		gerillt					Mittel
					B4E PK	B6524 PK	B1 ABS	B5 ABS	B6501 PK	C1 PK	D7B PK	
C3B	0.65	0.72	-0.02	-0.01	.	0.7	0.8	0.91	0.83	0.88	0.52	0.82
C3E	0.43	0.34	0.14	0.3	0.47	0.77	0.84	.	0.41	0.76	.	0.65
C6E	0.71	0.78	0.41	0.21	0.77	0.78	0.7	.	0.77	0.86	.	0.97
D1E	0.63	0.79	0.54	0.27	0.78	0.82	0.79	.	0.78	0.82	.	0.8
D2	0.61	0.61	0.12	0.3	0.67	0.71	0.75	0.76	0.74	0.8	0.12	0.74
D3	0.57	0.76	0.22	0.14	0.76	0.71	0.73	0.81	0.05	0.84	0.22	0.65
D4	0.66	0.7	0.15	0.17	0.82	0.78	0.76	0.65	0.79	0.84	0.53	0.77
D5	0.66	0.69	0.15	0.19	0.72	0.78	0.8	0.39	0.78	0.83	0.59	0.72
C8	0.71	0.71	0.18	0.15	0.82	0.77	0.81	0.41	0.74	0.81	0.54	0.73
C9	0.75	0.67	0.51	0.42	0.83	0.88	0.78	0.32	0.11	0.79	0.51	0.62
C10	0.79	0.7	0.32	0.34	0.82	0.9	0.84	0.42	0.74	0.86	0.48	0.76
B10E	[0]	0.04	0.17	-0.79	.	0.29	.	.	.	.	.	.
Mittel	0.65	0.68	0.25	0.23	0.67	0.78	0.86	0.58	0.67	0.91	0.44	0.75

Nur Standardgeschwindigkeit

\*Mittel aus A1, A2 & A4

Mittel glatt 0.78

Mittel gerillt 0.69

kursiv wird als Ausreisser betrachtet und nicht zur weiteren Mittelbildung beigezogen

(.) 5 oder weniger Beobachtungen

[] weniger als 10 Beobachtungen

*Tabelle 34: Vergleich vom Seitenkraft mit Textur und Reibungsspitze*

Tabelle 35 zeigt die Korrelationen für die Geräte mit blockiertem Messrad. Die beste Korrelation zu den Pendeln ergab sich mit B7 mit einem Mittel von 0.79. Die anderen Resultate sind ähnlich zu den Resultaten der Geräte mit Seitenkraft und konstantem Schlupf.

Nachstehende Tabelle zeigt den Vergleich von Messungen bei blockiertem Messrad mit Textur und Reibungsspitze.

Vergleich von blockiertem Messrad (LKD) mit Textur und Reibungsspitze

Gerät	LKD-Textur				LKD-Reibungsspitze								
	A14 BPN	B7 SRT	A8 MTD	Mittel* RMS	glatt		gerillt			C1 PK	D7B PK	Mittel	
					B4E PK	B6524	B1 ABS	B5 ABS	B6501 PK				
glatt													
A13	0.82	0.76	0.39	0.42	0.9	0.7	0.67	0.28	0.78	0.71	0.24	0.81	
B4Emax	0.75	0.78	0.61	0.55	0.95	0.87	0.95	.	0.65	0.64	.	0.81	
B4ESWP	0.79	0.67	0.59	0.47	0.92	0.9	0.82	.	0.73	0.83	.	0.84	
B6524	0.7	0.66	0.42	0.66	0.8	0.93	0.71	0.52	0.66	0.86	0.37	0.64	
D6	0.78	0.65	0.73	0.66	0.86	0.92	0.7	0.22	0.64	0.77	0.42	0.59	
Mittel	0.77	0.7	0.55	0.55	0.89	0.86	0.77	0.25	0.69	0.76	0.27	0.84	
gerillt													
B1LKD	0.59	0.76	-0.08	0.13	0.9	0.7	0.86	[-0.55]	0.76	0.89	[0.6]	0.82	
B2LKD	0.39	0.75	0.05	0.02	0.9	0.62	0.77	0.64	0.76	0.75	0.37	0.74	
B5LKD	0.55	0.76	0.17	0.22	0.66	0.72	0.75	0.69	0.74	0.87	0.37	0.74	
B6501	0.6	0.82	0.1	0.23	0.73	0.68	0.56	[0.91]	0.85	0.89	[0.29]	0.74	
C1	0.63	0.84	0.15	0.25	0.82	0.8	0.71	0.52	0.76	0.93	-0.09	0.75	
Mittel	0.55	0.79	0.08	0.17	0.8	0.7	0.73	0.44	0.77	0.87	.	0.72	

Nur Standardgeschwindigkeit

\*Mittel aus A1, A2 & A4

(.) 5 oder weniger Beobachtungen

[] weniger als 10 Beobachtungen

*Tabelle 35: Vergleich von Messungen bei blockiertem Messrad mit Textur und Reibungsspitze*

Tabelle 36 zeigt bessere Korrelationen zwischen den Geräten mit konstantem Schlupf und den Pendeln. Gegenüber der Makrotextur schneiden die Geräte mit konstantem Schlupf noch schlechter ab, als die Seitenkraftmesser. Die Resultate mit den Spitzenreibungsmessern sind ähnlich den beiden anderen Gruppen und aus denselben Gründen.

Untenstehende Tabelle zeigt den Vergleich von Messungen mit konstantem Schlupf mit Textur und Reibungsspitze.

Vergleich von Messungen mit konstantem Schlupf (SLIP) mit Textur und Reibungsspitze (PEAK)

Geräte	SLIP-Textur				SLIP-PEAK								
	A14 BPN	B7 SRT	A8 MTD	Mittel* RMS	glatt		gerillt					Mittel	
					B4E PK	B6524 PK	B1 ABS	B5 ABS	B6501 PK	C1 PK	D7B PK		
glatt													
B4ESLP	0.87	0.65	0.03	0.53	0.92	0.94	0.94		0.8	0.83	.	0.74	
C5	0.61	0.79	0.16	0.2	0.57	0.77	0.84	0.37	0.76	0.86	0.38	0.76	
D8	0.67	0.68	0.09	0.17	0.8	0.86	0.84	0.77	0.76	0.88	0.31	0.82	
Mittel	0.71	0.71	0.09	0.3	0.76	0.86	0.87	0.57	0.77	0.86	0.34	0.77	
gerillt													
B1SLP	0.6	0.58	-0.09	0.02	0.91	0.67	0.91	0.22	0.7	0.84	0.24	0.8	
B2SLP	0.78	0.83	0.24	0.11	0.85	0.74	0.84	0.69	0.84	0.75	0.26	0.78	
B3	0.74	0.82	0.18	0.23	0.85	0.79	0.76	0.89	0.86	0.87	0.31	0.83	
B5SLP	0.63	0.75	0.16	0.19	0.74	0.71	0.81	0.71	0.79	0.87	0.07	0.77	
C4	0.76	0.8	0.01	0.11	0.78	0.71	0.84	.	0.81	0.83	0.48	0.79	
D7BSLP	[0.27]	[0.16]	[0.09]	[0.02]	.	0.48	[0.77]	[0.8]	[0.56]	[0.61]	0.86	.	
Mittel	0.7	0.76	0.1	0.13	0.83	0.68	0.83	0.63	0.8	0.83	0.28	0.8	

Nur Standardgeschwindigkeit

\*Mittel aus A1, A2 & A4

(.) 5 oder weniger Beobachtungen

[] weniger als 10 Beobachtungen

Tabelle 36: Vergleich von Messungen mit konstantem Schlupf mit Textur und Reibungsspitze

## 7.4 Zusammenfassung

Die Gesamtkorrelationen der Geräte waren generell gut:

Systemtyp	Seitenkraft	Konstanter Schlupf	Blockiertes Messrad
Seitenkraft	0.863	0.819	0.795
konstanter Schlupf	0.819	0.834	0.703
Blockiertes Messrad	0.795	0.783	0.843
Pendel	0.665	0.732	0.670

Tabelle 37. Gesamtkorrelationen zwischen den Geräten

Das Mittel beim Vergleich ähnlicher Geräte beträgt 0.847, das Mittel beim Vergleich verschiedener Geräte liegt etwas tiefer bei 0.799.

Die Resultate der Korrelationen mit den Pendeln (ein Ersatz für die Mikrotextur) zeigen ein Mittel von nur 0.689 (nimmt man nur den CH-Pendel ergeben sich 0.743). Eigentlich war eine höhere Korrelation erwartet worden. Die sehr tiefen Korrelationen mit den Makrotexturmessungen - zwischen 0.08 und 0.25 - entsprachen demgegenüber den Erwartungen.

Betrachtet man die besten Korrelationen jedes Gerätes mit ähnlich oder anderen Geräten (Tabelle 38), so ergab sich die beste Korrelation für die beiden beteiligten Odilographen. Die schlechteste ergab sich zwischen zwei SCRIM-Geräten, wobei eines, wie sich im Nachhinein herausstellte, nicht richtig funktionierte.

Die besten Korrelationen für jedes Gerät stehen in untenstehender Tabelle.

Ähnliche Geräte				Unterschiedliche Geräte			
Gerät 1	Gerät 2	R	N	Gerät 1	Gerät 2	R	N
C9-SFC	C10-SFC	0.961	71	C3B-SFC	B3-SLP	0.933	48
C10-SFC	C9-SFC	0.961	71	B3-SLP	C3B-SFC	0.933	48
C3B-SFC	D5-SFC	0.960	50	B4E-SWP	B1-SLP	0.931	17
D5-SFC	C3B-SFC	0.960	50	B1-SLP	B4E-SWP	0.931	18
D3-SFC	C3B-SFC	0.953	50	B6.524-LKD	B4E-SLP	0.926	24
D4-SFC	C3B-SFC	0.945	50	C10-SFC	B4-SLP	0.922	23
D1E-SFC	D4-SFC	0.943	36	B4E-SLP	C10-SFC	0.922	23
B6.524-LKD	D6-LKD	0.936	90	C5-SLP	C1-LKD	0.920	90

D6-LKD	B6.524-LKD	0.936	90	C1-LKD	C5-SLP	0.920	90
C6E-SFC	D3-SFC	0.935	34	D3-SFC	B6.501-LKD	0.915	92
B4E-SLP	B1-SLP	0.935	18	D8-SLP	B4E-SWP	0.915	82
B1-SLP	B4E-SLP	0.935	18	B6.501-LKD	D3-SFC	0.915	80
B3-SLP	B4E-SLP	0.935	24	B1-LKD	B1-SLP	0.910	67
D8-SLP	B4E-SLP	0.929	24	C1-LKD	C4-SFC	0.909	82
B4E-SWP	B1-LKD	0.927	17	C4-SLP	C1-LKD	0.909	82
B1-LKD	B4E-SWP	0.927	17	C9-SFC	D6-LKD	0.908	83
B4E-MAX	B2-LKD	0.924	17	D6-LKD	C9-SFC	0.908	92
B2-LKD	B4E-MAX	0.924	17	B4E-MAX	B1-SLP	0.898	17
B6.501-LKD	C1-LKD	0.919	72	B2-SLP	C3B-SFC	0.893	44
C1-LKD	B6.501-LKD	0.919	87	B5-LKD	B5-SLP	0.889	89
C8-SFC	C10-SFC	0.914	92	B5-SLP	D3-SFC	0.888	88
B5-LKD	B2-LKD	0.911	76	D5-SFC	B5-LKD	0.885	84
C4-SLP	B3-SLP	0.908	92	D4-SFC	C1-LKD	0.87	94
B2-SLP	B3-SLP	0.905	80	D1E-SFC	D6-LKD	0.869	36
D2-SFC	D1E-SFC	0.902	36	A13-SWP	C3B-SFC	0.864	46
B5-SLP	B3-SLP	0.892	96	B2-LKD	D3-SFC	0.849	77
C5-SLP	D8-SLP	0.864	98	C6E-SFC	D6-LKD	0.838	30
A13-SWP	B4E-MAX	0.861	19	D2-SFC	D8-SLP	0.832	78
D7B-SWP	D8-SLP	0.708	5	C3E-SFC	B1-??-LKD	0.812	22
C3E-SFC	D5-SFC	0.690	31	D7B-SWP	D5-SFC	0.748	9

Tabelle 38: Die besten Korrelationen für jedes Gerät

## **7.5 Variabler Schlupf**

Der Norsemeter führte in Spanien Messungen mit gleitendem Schlupf vom 0% bis 86% und wieder zurück auf 0% durch. Diese Daten können etwa dafür benutzt werden, den Prozentsatz für die Reibungsspitze zu finden, damit eine Messung mit konstantem Schlupf in exakt dieser Grösse durchgeführt werden kann.

Spitzenreibungsmessungen können sehr nützlich sein. Die Auswertungen zeigten aber auch, warum die verschiedenen Spitzenreibungsmessungen nicht sehr gut übereinstimmten. Für eine gegebene Oberfläche ändert sich die Spitze je nach Zustand (trocken, nass, Schnee, etc.). Für ein und dasselbe Belags-Reifen Paar ändert sich die Spitze mit der Geschwindigkeit, dem Schlupf und der Schlupfgeschwindigkeit. Wie auch immer, die vorliegenden Daten nähern sich einer Asymptote, die von der Reifen-Fahrbahn-Kombination abhängt. Das zeigt sich auch bei Messungen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten

## 8 Modelle zur Voraussage der Griffigkeit

In diesem Kapitel wird das PIARC-Modell beschrieben. Es ist eine Modifikation des Penn State Modells [6]. Das mechanistisch aufgebaute Horne-Modell [3] wurde ebenfalls untersucht, erwies sich aber als ungeeignet für eine Harmonisierung, es eignet sich für Reifentests.

### 8.1 Verhältnis Reibung-Schlupf und Geschwindigkeit

Das Penn State Modell verknüpft die Reibung ( $F$ =Friction) mit der für die Messung benutzten Schlupfgeschwindigkeit ( $S$ ):

$$F(S)=F_0 \cdot \exp[-(S/S_0)]$$

Gl. 15

$F(S)$  ist die Reibung bei der Schlupfgeschwindigkeit  $S$

$S$ , die Schlupfgeschwindigkeit, ist die Geschwindigkeit des Gummis, der mit der Strasse in Kontakt ist, relativ zum Belag. Daraus folgt:

Blockiertes Messrad:  $S$  entspricht der Fahrzeuggeschwindigkeit  $V$

Konstanter Schlupf:  $S$  entspricht  $V \cdot \% \text{Schlupf} / 100$

Seitenschlupf:  $S$  entspricht  $V \cdot \sin$  Messradwinkel

$F_0$  und  $S_0$  sind Eigenschaften des Belages für ein gegebenes Gerät und hängen auch mit der Textur zusammen.

$F_0$  ist eine dimensionslose Konstante, generell eine Funktion der Mikrotextur und  $S_0$  ist eine Konstante, die von der Makrotextur abhängt (Einheit: km/h).  $S_0$  wird Geschwindigkeitskonstante genannt und hat Werte im Bereich von 20 bis 600 km/h, ohne aber in diesem Bereich limitiert zu sein. Der typische Bereich liegt eher zwischen 100 und 200. Ein tiefer Wert für  $S_0$  bedeutet schlechte Makrotextur, ein hoher Wert bedeutet, dass eine hohe Makrotextur vorliegt. Dem Modell kann entnommen werden, dass bei höherer Schlupfgeschwindigkeit ein tieferer Reibungswert vorliegt. In ähnlicher Weise bedeutet ein hoher Wert, dass die Reibung weniger von der Geschwindigkeit abhängig ist.

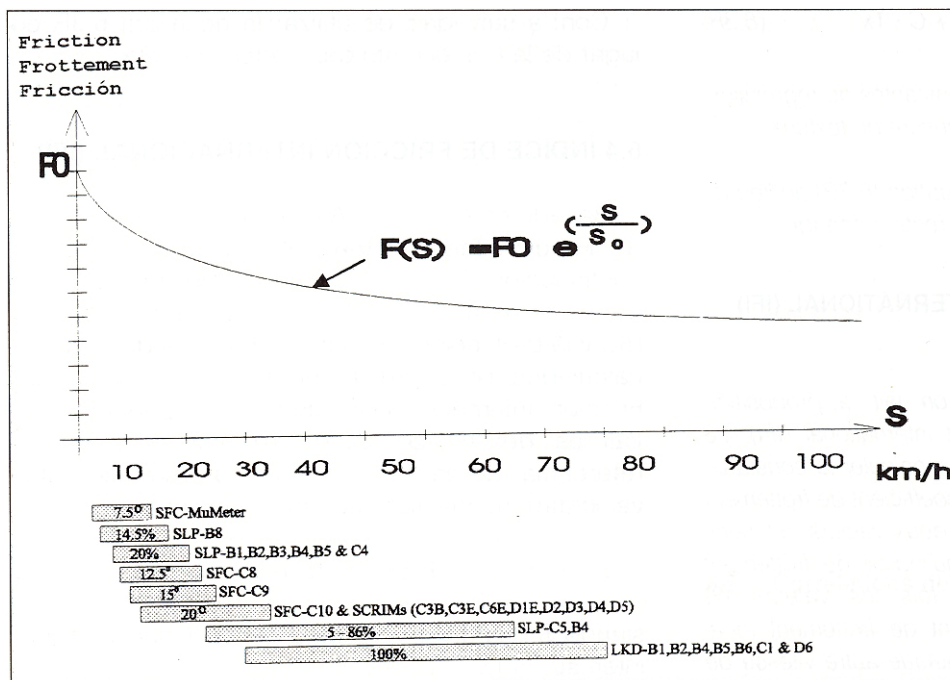


Figure 5: Reibungskoeffizienten in Abhängigkeit der Schlupfgeschwindigkeit

Anhand einer typischen Reibungs - Schlupfgeschwindigkeits - Beziehung zeigen sich für die teilnehmenden Geräte geeignete Bereiche von Schlupfgeschwindigkeiten zwischen 30 und 90 km/h, der zugehörige Mittelpunkt liegt bei 60 km/h.

Um das Modell anwenden zu können, mussten zwei Dinge gemacht werden:

1. Für jede Messstrecke ist die Reibungs-Schlupfgeschwindigkeitskurve festzulegen, genannt die Goldene Kurve.
2. Für alle Messgeräte ist ein Modell festzulegen, so dass sie die Werte der Goldenen Kurve vorausgesagt können.

In dieser Hinsicht unterscheidet sich Harmonisierung vom Vergleich. Harmonisierung bedeutet, dass jedes Messgerät seine eigene Messung in gewohnter normaler Weise durchführt und das Modell benutzt, um den gemeinsamen Wert auf der Goldenen Kurve vorauszusagen.

In einem ersten Schritt wurde das Penn State Modell leicht modifiziert, indem eine Konstante F10 benutzt wurde (Reibung bei 10 km/h anstelle von 0 km/h). Die modifizierte Gleichung ergibt dieselben F(S) Werte, hat aber unterschiedliche Konstanten. Das modifizierte Modell lautet:

$$F(S) = F10 * \exp [-(10-S)/S_0]$$

Gl. 16

wobei F10 dem F(S) bei 10 km/h entspricht.

F10 wurde ausprobiert, weil die Seitenkraftmesser und die Geräte mit konstantem Schlupf zwar bei tiefen Schlupfgeschwindigkeiten messen, aber kein Gerät misst bei 0 km/h. F0 kann nur durch Extrapolation ermittelt werden.

## **8.2 Herleitung der Goldenen Werte**

Die Datenbasis eines gegebenen Gerätes, das die Reibung bei zwei oder mehr Geschwindigkeiten auf einer der Strecken gemessen hat, kann dazu benutzt werden, um Werte von F10 und  $S_0$  für dieses Gerät für alle Streckenabschnitte in der Datenbasis zu berechnen. Dies wurde durchgeführt und auf die Beziehung dieser verschiedenen F10 Werte und  $S_0$  Werte für die verschiedenen Geräte wird in der Folge näher eingegangen.

Das Reibungsmodell liefert eine geeignete Möglichkeit, um einen oder mehrere zusammengesetzte Standards zu entwickeln, mit denen Ziel- (Gold-) Werte für die Streckenabschnitte berechnet werden können. Dies könnte für jede Gruppe ähnlicher Geräte durchgeführt werden.

Zwei solche Gruppen wurden gebildet und die zusammengesetzten Schätzungen für F10 und  $S_0$  wurden für jede dieser Gruppen entwickelt. Die eine Gruppe bestanden aus allen Reibungsmesser mit einem glatten Messreifen, die andere umfasste alle Geräte, die einen gerillten oder profilierten Messreifen benutzten. Innerhalb jeder Gruppe wurden die zusammengesetzten F10 und  $S_0$  für die gemessenen Streckenabschnitte berechnet. Falls ein Abschnitt eine grosse Abweichung für ein oder mehrere Mitglieder einer Gruppe aufwies, so wurde die Sektion weggelassen oder wenn ein einzelnes Mitglied von der Linie abwich, wurde das Mitglied weggelassen. Zusätzlich wurden fünf Sektionen mit unzuverlässigen Texturdaten weggelassen.

Nachdem die Ausreisser aus dem Weg geschafft waren, wurden die F10 und die  $S_0$  Werte für jeden Abschnitt A und B einer Strecke gemittelt. Diese Mittelwerte von F10 und  $S_0$  wurden mit GBF1 und GBS0 für die profillosen Messreifen und mit GRF1 und GRS0 für die gerillten und gemusterten Messreifen bezeichnet.

Die ursprüngliche Absicht hinter dem Gebrauch von F10 anstelle von F0 war die Hoffnung, dass viele Seitenkraftmesser und die Messungen mit konstantem Schlupf gut mit F10 korrelieren würden. Wie auch immer, diese Korrelationen waren nur mässig und eine Texturmessung musste einbezogen werden um gute Resultate zu erzielen. Aus diesem Grunde beschloss man die Goldene Kurve für profillose Reifen zur Standardisierung und Harmonisierung zu benutzen. Für dieses Vorgehen gibt es verschiedene Gründe, v.a. aber:

Steigt die Schlupfgeschwindigkeit auf 60 km/h und mehr, wird der Einfluss der Makrotextur auf die Höhe der Reibung nicht nur immer grösser, sondern wird über 60 km/h zum dominanten Faktor [7, 8].

Diese Tatsache wurde durch das Experiment bestätigt durch die im nächsten Abschnitt dargestellte steigende Korrelationen von Makrotextur und Reibung mit steigender Geschwindigkeit. Da sich gerillte und profilierte Reifen als relativ wenig sensitiv gegenüber der Makrotextur [9, 10, 11] erwiesen und profillose Reifen sensitiv gegenüber beiden - Mikro- und Makrotextur - sind, waren die profillosen Reifen die logische Wahl für den Standard.

Als Resultat wurden die Werte für glatte Reifen modifiziert von GBF1 und GBS0 zu GF60 und GS, wobei GF60 der Wert auf der Goldenen Kurve bei einer Schlupfgeschwindigkeit von

60 km/h darstellt, während GS mit GBS0 übereinstimmt. GF60 wurde gewählt, weil es eine übliche Stoppgeschwindigkeit für Fahrzeuge darstellt und deshalb ein Sicherheitsmass darstellt. Da das PIARC Modell die Voraussage des Goldenen Reibungswertes bei jeder Schlupfgeschwindigkeit erlaubt, kann sich der Benutzer für sein eigenes Strassenmanagement jeder Geschwindigkeit anpassen.

Tabelle 39 zeigt eine Liste von GF60 und GS Werten. Werte mit einem \* wurden für weitere Analysen weggelassen, ebenso Strecken mit einem \*. Gründe finden sich zum Teil in den vorhergehenden Abschnitten, teilweise waren aber auch zu wenige Daten vorhanden (z.B. bei Strecke 3) oder der betreffende Abschnitt war ein Ausreisser für die meisten oder zu viele Geräte (z.B. Strecke 34), so dass die übrig gebliebenen Geräte einen zu grossen Einfluss auf den betreffenden Wert gehabt hätten. Für eine gute statistische Analyse blieben genügend Daten übrig.

Untenstehende Tabelle zeigt die „Goldenen Werte“

Strecke	Ab-schnitt	GS	GF60	Strecke	Ab-schnitt	GS	GF60	Strecke	Ab-schnitt	GS	GF60
1	A	375*	0.549*	21	B	168	0.523	53	B	65	0.284
1	B	334	0.52	24	A	97	0.393	56	A	85	0.297
2	A	150	0.268	24	B	120	0.394	56	B	66	0.272
2	B	170	0.258	26.1	A	50*	0.396*	57	A	183	0.551
3*	A*	72*	0.28*	26.1	B	42	0.346	57	B	225	0.564
3*	B*	86*	0.297*	26.2*	A*	199*	0.656*	58	A	113	0.389
4	A	91	0.477	26.2*	B*	180*	0.662*	58	B	118	0.403
4	B	73	0.456	32	A	172	0.489	59	A	76	0.256
6	A	69	0.356	32	B	131	0.46	59	B	82	0.259
6	B	74	0.345	33.1	A	53*	0.294*	60	A	74	0.261
8	A	62	0.279	33.1	B	54*	0.296*	60	B	74	0.25
8	B	57*	0.281*	33.2	A	53	0.323	61	A	63	0.262
9	A	175	0.379	33.2	B	55	0.299	61	B	50	0.227
9	B	149	0.373	33.3	A	60*	0.367*	62	A	127	0.405
10*	A*	134*	0.478*	33.3	B	71	0.394	62	B	177	0.394
10*	B*	122*	0.489*	33.4	A	70	0.366	63	A	164	0.313
11	A	77*	0.375*	33.4	B	68	0.346	63	B	153*	0.277*
11	B	103	0.441	34*	A*	142*	0.689*	64	A	145	0.523
12	A	240	0.586	34*	B*	134*	0.672*	64	B	170	0.517
12	B	256	0.582	40	A	169	0.398	65	A	67	0.263
13	A	297	0.518	40	B	165	0.402	65	B	68	0.25

13	B	279*	0.517*	41*	A*	132*	0.445*	66	A	76	0.261
15	A	295*	0.450*	41*	B*	137*	0.442*	66	B	64	0.245
15	B	354*	0.437*	42	A	75	0.356	67	A	68	0.434
17	A	63	0.223	42	B	96	0.393	67	B	98	0.456
17	B1	135*	0.231*	50	A	64	0.327	68	A	99	0.32
17	B2	135*	0.237*	50	B	62	0.355	68	B	87	0.309
18	A	223*	0.450*	51	A	68	0.239	69*	A*	66*	0.292*
18	B	166	0.485	51	B	89	0.259	69*	B*	72*	0.328*
19	A	198	0.491	52	A	85	0.298	70*	A*	164*	0.452*
19	B	237	0.497	52	B	86	0.277	70*	B*	195*	0.454*
21	A	181	0.518	53	A	72	0.308				

Tabelle 39: Goldene Werte

### 8.3 Das PIARC Modell

Weil das oben angegebene modifizierte Modell nicht für alle angewandten Messmethoden gute Korrelationen ergab und die Schlupfgeschwindigkeiten stark von 10 km/h variierten, wurden verschiedene andere Modelle ausprobiert. Das Modell, das die besten Resultate erbrachte, wird im Folgenden beschrieben, es wird mit PIARC Modell bezeichnet. Das PIARC Modell unterscheidet sich darin, dass die Konstante  $S_p$  (hat den gleichen Wert wie  $S_0$ , soll aber anzeigen, dass das PIARC und nicht das Penn State Modell benutzt wird) verwendet wird, um den gemessenen Reibungswert (FRS) an 60 km/h (FR60) anzugleichen. Anschliessend wurde für jedes Gerät eine einfache Regression durchgeführt, um den geschätzten Goldenen Wert (F60) des Goldenen Wertes (GF60) zu finden. Wichtig am PIARC Modell ist, dass die Reibungsmessung mit einem Gerät nicht mit einer der am Experiment benutzten Geschwindigkeit durchgeführt werden muss. FRS kann bei irgendeinem S (Schlupfgeschwindigkeit) gemessen werden und wird immer an FR60 angeglichen. Deshalb funktioniert für ein Gerät, das aufgrund der Verkehrssituation nicht seine eigene normale Messgeschwindigkeit einhalten kann und schneller oder langsamer fahren muss, das Modell immer noch, solange S (oder V, das zu S umgerechnet werden kann) aufgezeichnet wird.

Der mathematische Ablauf wird im Folgenden wiedergegeben:

1. Zuerst wird die Geschwindigkeitskonstante aus einer Texturmessung wie folgt berechnet:

$$S_p = a + b * T_x$$

Gl. 17

wobei a und b Konstanten für irgendein Texturmessgerät sind,  $T_x$  ist eine entsprechende Texturmessung.

2. Der bei einer Schlupfgeschwindigkeit gemessene Reibungswert FRS wird zu einer 60 km/h Messung (FR60) konvertiert:

$$FR60 = FRS * \exp [(S-60)/S_p] \quad \text{Gl. 18}$$

wobei FRS die Reibungsablesung eines Gerätes bei der Schlupfgeschwindigkeit S darstellt und  $S_p$  aus der obigen Gleichung stammt.

- S = Fahrzeuggeschwindigkeit (V) bei blockiertem Messrad  
 = V \* Schlupfprozent bei Messungen mit konstantem Schlupf  
 = V \* sin (x) für Seitenkraftmessungen, x ist der Schlupfwinkel

3. Den geschätzte Wert (F60) des Goldenen Wertes (GF60) kann man dann wie folgt erhalten:

$$F60 = A + B * FR60 \quad \text{Gl. 19}$$

wobei A und B Konstanten für irgendein Reibungsmessgerät sind und FR60 aus obiger Gleichung kalkuliert wird.

Die Regressionskonstanten A, B, a und b wurden für jedes Gerät aus den Daten des Experiments gewonnen. Unter Benutzung von GS für  $S_p$  für jeden Messabschnitt wurde eine Regression durchgeführt, um die Konstanten a und b zu bestimmen. In ähnlicher Weise wurden die Goldenen Werte GF60 für jeden Messabschnitt als F60 benutzt, um A und B zu bestimmen.

Die Ausnahme ist, wenn das Gerät einen gerillten oder einen profilierten Messreifen benutzt. In diesem Falle muss die Makrotextur ( $T_x$ ) in der Regression eingeschlossen werden. Die Gleichung lautet dann:

$$F60 = A + B * FR60 + C * T_x \quad \text{Gl. 20}$$

wobei A, B und C Regressionskonstanten sind, FR60 ist wie oben und  $T_x$  ist eine Texturmessung.

Mit Ausnahme der letzten Gleichung ist der Rest des Modells genau gleich.

## 8.4 Vorgeschlagener internationaler Reibungsindex (IFI)

Basierend auf dem PIARC Modell wird ein internationaler Reibungsindex (IFI) wie folgt vorgeschlagen:

Das beschriebene Modell wird benutzt, um die Schätzung der Goldenen Geschwindigkeitskonstante ( $S_p$ ) und den geschätzten Goldenen Reibungswert bei 60 km/h zu generieren ( $F_{60}$ ). Diese beiden geschätzten Werte werden dann als der Internationale Reibungsindex IFI ( $F_{60}, S_p$ ) angegeben. Wenn die IFI Werte notiert sind, kann der Goldene Reibungswert,  $F(S)$ , bei jeder anderen interessierenden Schlupfgeschwindigkeit ( $S$ ) berechnet werden. Dazu kann die folgende Gleichung benutzt werden:

$$F(S) = F_{60} * \exp [(60-S)/S_p] \quad \text{Gl. 21}$$

wobei  $S$  jede interessierende Schlupfgeschwindigkeit darstellen kann.

Will man also  $F(S)$  bei beispielsweise 120 km/h wissen, so müsste man in der obigen Gleichung lediglich 120 für  $S$  einsetzen.

## 8.5 Voraussage der Geschwindigkeitskonstante mit einer Texturmessung

Die Entwicklung des PIARC Modells und der IFI benötigen eine Messung der Makrotextur, um die Reibungsmessungen bei verschiedenen Geschwindigkeiten zu harmonisieren. Tatsächlich ist seit längerem bekannt, dass die Makrotextur der wichtigste Faktor für die Bestimmung der Geschwindigkeitskonstante einer Reibungsmessung darstellt. Früher gefundene Korrelationen basierten oft auf einem bestimmten Reibungsmessgerät und einer bestimmten Texturmessung, waren aber oft dennoch nicht genau genug. Der vorliegende Versuch schuf die Gelegenheit, diese Beziehungen zu verbessern, indem ein Mittel der Reibungs-Geschwindigkeits-Beziehung anhand zahlreicher Griffigkeitsmessgeräte berücksichtigt werden konnte (der so genannte Goldene Wert  $GS$ ). In diesem Abschnitt wird gezeigt, wie genau jede einzelne Makrotexturmessmethode den  $GS$  voraussagen kann.

### 8.5.1 Korrelationen der geschätzten Geschwindigkeitskonstante

In einer ähnlichen Weise wie sie gebraucht wurde, um herauszufinden wie genau die Texturmessungen die Texturtiefe (gemäss volumetrischer Fleckmethode) voraussagen, wurde die lineare Regression zwischen  $GS$  und jeder Texturmessung berechnet, damit die in Kapitel 6.2 definierten Koeffizienten  $a$  und  $b$  bestimmt werden können. Der dazugehörige Korrelationskoeffizient wurde zusammen mit den folgenden Grössen berechnet: Der maximale absolute Fehler und der mittlere absolute Fehler ( $\max |EI|$  und  $\text{ave } |EI|$ ), sowie das quadratische Mittel des Fehlers (RMSE), das auch die Summe der Residuen ist. Die Resultate finden sich in Tabelle 40.

Nachstehende Tabelle zeigt die Regressionen der vorausgesagten Geschwindigkeitskonstante ( $S_p$ ) mit der Goldenen Geschwindigkeitskonstante  $GS$ .

Methode	Gerät	V [km/h]	N	a	b	MaxIEI	AveIEI	RMSE	R
MPD	A2	34	69	14.235	89.719746	77.80	14.78	21.33	0.956
ETD	A2	34	69	37.3855	76.9768	78.27	14.79	21.42	0.950
MPD	A5	0	65	9.74081	81.67568	77.19	16.94	23.18	0.941
TDMA	A2	34	69	17.3401	94.25999	69.42	17.75	23.59	0.939
MTD	A8	0	69	-11.5981	113.63246	85.38	17.95	25.42	0.930
MTD	A3B	60	25	-12.6729	119.769	57.90	18.70	25.39	0.920
4SC	D3	60	67	17.628	92.9984	125.73	18.54	28.02	0.915
RQ	D3	60	67	14.1414	180.6588	130.17	19.33	28.71	0.911
MPD	A4	18	69	11.5017	69.13345	96.95	20.80	29.14	0.906
RMS	A2	34	69	18.7992	170.08937	96.47	20.14	28.57	0.906
RA	D3	60	64	16.395	225.4199	126.00	19.07	28.56	0.906
RMS	A1	30	69	22.6763	285.61917	86.20	23.48	29.31	0.902
MPD	A4	36	69	9.22889	83.2893	109.41	21.59	30.39	0.897
MTD	A3B	30	25	-3.4267	116.55418	73.32	21.48	29.27	0.892
RMS	A3B	60	25	13.9824	186.7008	71.52	23.41	30.97	0.878
1/ZEIT	B11E	80	33	48.1228	129.9821	69.52	14.45	24.20	0.877
MTD	A3B	80	25	-3.05123	108.202	72.06	24.69	31.96	0.870
RMS	A5	0	66	21.1784	158.69943	96.14	24.67	35.10	0.862
CSMTD	D4	50	58	30.6987	148.4899	141.45	23.44	34.48	0.814
MTD	D2	69	62	-34.9681	142.6474	128.76	20.01	37.21	0.806
RMS	A3B	80	25	21.4705	172.5365	95.43	29.92	39.02	0.798
SMTD	D5	50	63	25.8322	139.6801	151.73	24.40	36.48	0.793
RMS	A3B	30	25	35.2133	154.6843	114.56	29.22	46.46	0.781
ROUGH	A3E	30	33	9.67855	215.1516	71.81	21.62	31.61	0.779
MEGA	A3E	30	33	32.535	247.9318	90.98	21.96	32.78	0.759
MPD	A4	72	69	42.256	139.2028	146.97	35.23	48.10	0.714
FINE	A3E	30	33	21.9145	317.0124	115.30	29.81	43.74	0.496
BPN	A14	0	68	-130.262	3.70656	177.74	48.60	61.44	0.451
BPN	B7	0	62	-44.4114	2.99675	162.51	50.41	60.05	0.397

Tabelle 40: Regressionen der vorausgesagten Geschwindigkeitskonstante ( $Sp$ ) mit der Goldenen Geschwindigkeitskonstante  $GS$

Wie schon bei der Voraussage des MTD (mittlere Texturtiefe) gesehen, Messungen, die auf dem MPD (Mittlere Profiltiefe) basieren, schneiden besser ab als solche die auf dem RMS (quadratisches Mittel) basieren. Das gilt nicht für den Einzelfall, wie die Tabelle zeigt, aber die Geräte, die beides messen können, haben systematisch bessere Korrelationen mit MPD als mit RMS. Das ist auch konsistent mit der ziemlich hohen Korrelation der MTD-Messungen mit der Volumetrischen Fleckmethode und dem GS (Goldene Geschwindigkeitskonstante), da der MPD-Algorithmus so angelegt ist, dass er die Volumetrische Methode simuliert.

Die letzten Geräte in Tabelle 40 gelten als Ersatzmessungen für die Mikrotextur, so dass tiefe Werte erwartet werden konnten. Der Ausflussmesser, mit der manuellen Zeitnahme (B8), konnte nur eine bestimmte Bandbreite von Makrotexturen erfassen, was die statistische Bandbreite beeinflusste. Diese Geräte wurden deshalb in der folgenden Diskussion nicht berücksichtigt.

Die Korrelationen schwankten somit zwischen 0.714 und 0.956. Am besten schnitten A2-MPD, A2-ETD, A5-MPD, A2-TDMA und MTD (A8) ab. Diese messen alle bei 36 km/h oder sind stationäre Methoden. Wenn das PIARC-Modell für Reibungsmessungen bei 60 km/h benutzt wird, so wäre es ideal, nur die Texturmessungen bei 60 km/h zu berücksichtigen. Rückblickend wäre es somit von Vorteil gewesen, wenn die Texturmessgeräte, zusätzlich zu ihren gewohnten Geschwindigkeiten, ebenfalls bei 60 km/h Messungen durchgeführt hätten. Betrachtet man das Gerät A4, das bei 18 km/h, 36 km/h und 73 km/h Messungen machte, sieht man, dass die Korrelationen mit steigender Geschwindigkeit von 0.906 auf 0.897 und 0.852 sinken. In ähnlicher Weise führte A3E Messungen bei 30, 60 und 80 km/h durch und hatte entsprechende Korrelationen von 0.892, 0.920 und 0.870. Geschwindigkeitseffekte auf Texturmessungen wurden bereits im Kapitel 6 besprochen und es zeigt sich auch hier, dass der Effekt nicht sehr gross ist. Von den Geräten, die bei 60 km/h oder höheren Geschwindigkeiten Messungen durchführten, bewegen sich die Korrelationskoeffizienten zwischen 0.92 und 0.714. Da die meisten dieser Geräte ähnliche Lasermessgeräte benutzen, sollte eine standardisierte Berechnungsmethode wie MPD alle diese Korrelationen auf 0.9 oder mehr verbessern können.

Die SCRIM's, die Lasersensoren benutzten, hatten Korrelationen zwischen 0.915 und 0.793. Mit dem besten MPD-Algorithmus sollten auch hier dieselben Verbesserungen möglich sein.

### 8.5.2 Texturbandweite um GS vorauszusagen

Die optimalen Texturbandweiten zur Voraussage von GS und GRS0 wurden untersucht. Alle fünf Texturspektren, die von A2, A4 (bei drei Geschwindigkeiten) und A5, wurden betrachtet und es zeigte sich:

GS ist am besten zu den spektralen Texturkomponenten im Bereich von 10-80 mm korreliert, während GRS0 ein bisschen besser mit etwas kleineren Wellenlängen - 2.5-20 mm - korreliert. Es ist zu berücksichtigen, dass die relativ höheren Korrelationen, die A5 bei kurzen Wellenlängen aufwies, verlässlicher sind als die anderen, weil A5 der einzige stationäre Profilometer am Experiment ist und es ist weniger wahrscheinlich, dass diese Messungen einen Mangel an Sensitivität oder Genauigkeit bei kleinen Wellenlängen aufweisen. Bei mobilen Geräten ist das viel eher möglich.

Das Studium der optimalen Bandbreite für die Voraussage des MTD (Mittlere Texturtiefe gemäss der Volumetrischen Fleckmethode) oder der Reibungsgeschwindigkeitsgradienten (GS oder GRS0) zeigt konsistent auf einen optimalen Wellenlängenbereich von 2.5 mm bis

zu 40 oder 80 mm bezüglich der zentralen Wellenlängen der Oktavbänder, was tatsächlich mit 2 mm bis 50 oder 100 mm korrespondiert.

Diese Anforderungen werden näherungsweise von allen am Experiment benutzten Messmethoden erfüllt. In Tabelle 41 korrespondiert die tiefere Grenze (2 mm) zur "minimalen Wellenlänge" und die höhere Grenze kann mit der "Berechnungsbasislänge" verglichen werden. Betrachtet man auf der einen Seite Tabelle 15 und auf der anderen Seite die Tabelle 26 und Tabelle 40, so kann man erkennen, dass es eine Beziehung gibt zwischen der Genauigkeit, mit der die Spezifikation eines Gerätes die optimale Bandbreite trifft, und der Güte, mit der es MTD und GS voraussagen kann.

## 8.6 Voraussage des Goldenen Werte (GF60) mit einer Reibungsmessung

Das in Kapitel 7.3 angegebene Modell wurde nun benutzt, um die Modellkonstanten A, B und C (für Geräte mit profilierten Messreifen) zu bestimmen. Dazu wurde zunächst die Reibungsmessung jedes Gerätes (FRS) mit der entsprechenden Gleichung an 60 km/h Schlupfgeschwindigkeit angepasst, damit FR60 für jede Strecke bestimmt werden konnte. Diese FR60-Werte für jede Strecke wurden dann unter Anwendung der in Kapitel 7 angegebenen Gleichungen für eine Regression verwendet, um so die Konstanten A, B und C zu finden. So kann jedes Gerät diese Konstanten einsetzen, um den Goldenen Wert F60 aus einer FRS-Messung, die an FR60 anzupassen ist, vorausszusagen (ein Beispiel findet sich in Kapitel 9.1.1). In Tabelle 41 sind diese Konstanten mit dem R, dem maximalen absoluten Fehler, dem mittleren absoluten Fehler und dem quadratischen Mittel der residuellen Abweichungen (RMSE) aufgeführt.  $S_p$  wurde mit dem MPD bestimmt.

Untenstehende Tabelle zeigt die Regressionen um GF60 vorausszusagen unter Anwendung des PIARC-Modells.  $S_p$  wurde mit dem MPD bestimmt.

Glatter Reifen		S	N	A	B	C	MaxIEI	AveIEI	RMSE	R
LKD	B6.524	65	69	0.04461	0.92549	0	0.095	0.02	0.0267	0.969
	D6	60	69	0.00226	1.00762	0	0.06	0.016	0.0243	0.981
SLP	B4SLP-86	52	15	-0.03033	0.86411	0	0.038	0.021	0.0267	0.96
	B4SLP-20	12	15	0.11917	0.64319	0	0.089	0.031	0.0411	0.915
	C4	10	63	0.04195	0.84865	0	0.091	0.031	0.0394	0.936
	C5	43	69	0.01883	0.8678	0	0.203	0.043	0.0584	0.84
	D8	9.4	67	0.08209	0.9104	0	0.086	0.027	0.0346	0.947
SFC	C8	13	69	0.05436	0.7702	0	0.091	0.029	0.0362	0.941
	C9	13	69	0.1134	0.7291	0	0.081	0.024	0.0301	0.96
	C10	21	61	0.1135	0.74581	0	0.085	0.025	0.011	0.962
	C3B	21	35	0.04912	0.96738	0	0.074	0.023	0.03	0.955

	C3E	21	27	0.0188	0.8127	0	0.131	0.043	0.0558	0.839
	C6E	21	29	0.0319	0.8734	0	0.063	0.02	0.0262	0.959
	D1E	21	31	0.0165	0.8495	0	0.067	0.018	0.026	0.967
	D2	21	68	0.02102	0.9276	0	0.113	0.039	0.0516	0.879
	D3	21	69	-0.00594	0.86211	0	0.085	0.026	0.0342	0.948
	D4	21	69	0.00195	0.9867	0	0.094	0.031	0.0373	0.938
	D5	17	69	0.03258	0.8717	0	0.112	0.03	0.0385	0.933
	Gerillter Reifen	S	N	A	B	C	MaxIEI	AveIEI	RMSE	R
LKD	B1LKD	60	42	0.02204	0.50025	0.08216	0.085	0.033	0.0419	0.903
	B2LKD	60	63	0.02634	0.5042	0.0992	0.114	0.039	0.0491	0.895
	B5LKD	60	59	-0.07215	0.76744	0.08551	0.124	0.038	0.049	0.904
	B6-501	65	67	-0.02283	0.60682	0.09759	0.115	0.033	0.043	0.916
	C1	60	62	-0.02534	0.80685	0.06772	0.011	0.033	0.0414	0.927
SLP	B1SLP	12	46	0.14107	0.32256	0.07388	0.126	0.05	0.0624	0.8305
	B2SLP	12	64	0.02968	0.91848	-0.01362	0.073	0.028	0.035	0.9498
	B3	12	68	0.03964	0.85618	-0.01589	0.084	0.029	0.0365	0.9415
	B5SLP	12		0.01962	0.8673	-0.00588	0.118	0.033	0.0414	0.9179
	Gleitkörper	S	N	A	B	C	MaxIEI	AveIEI	RMSE	R
	A13.60	60	68	-0.03365	0.77098	0	0.086	0.027	0.048	0.9
	A13.20	20	68	0.08114	0.73158	0	0.069	0.026	0.0307	0.96
	A14-BPT	10	68	0.05626	0.00756	0	0.109	0.043	0.0526	0.874
	B7-SRT	10	62	0.0436	0.00953	0	0.173	0.03	0.0454	0.913

MaxIEI = Maximaler absoluter Fehler

AveIEI = Mittlerer absoluter Fehler

RMSE = RMS des residuellen Fehlers

*Tabelle 41: Regressionen um GF60 vorauszusagen unter Anwendung des PIARC-Modells. Sp wurde mit dem MPD bestimmt*

Wie die Tabelle 41 zeigt, reichen die Korrelationskoeffizienten R von 0.839 bis 0.981. Nur vier liegen unter 0.89. Von diesen war bekannt, dass C3E mechanische Probleme hatte, B1SLP wurde seither neu kalibriert. D2 hatte mit 18 mehr Ausreisser als andere SCRIM's, während C5 12 Ausreisser hatte und zwar vorwiegen bei tiefen Reibungsstufen unter 0.35. Diese vier Geräte hatten auch die höchsten absoluten Fehler, höchsten mittleren absoluten Fehler und auch die höchsten quadratischen Mittel der Residualabweichungen.

## 8.7 Voraussage des Goldenen Wertes (GF60) mit einer "Mikrotextur-" und einer Makrotexturmessung

Dieses Kapitel befasst sich mit zwei Makrotexturmessungen (MPD und MTD) und Messungen, die als Ersatzmessungen für Mikrotextur gelten (Reibungsmessungen bei tiefer Geschwindigkeit). Für die Auswahl dieser "Mikrotexturmessungen" wurde Tabelle 34 beigezogen. Es wurden folgende Geräte bestimmt: Die beiden Pendel A14 (US-BPT) und B7 (CH-SRT) sowie D8.5 (der Griptester bei 5 km/h). Zwei weitere Messverfahren, A13.20 (A13 bei 20 km/h) und B4.SWP (der Norsemeter mit der kleinsten Schlupfeinstellung), wären ebenfalls in Frage gekommen, wurden aber für diesen Bericht nicht weiter berücksichtigt.

Vergleicht man die Korrelationen dieser Messungen mit den Goldenen Werten als Funktion der Schlupfgeschwindigkeit, zeigt sich, dass die Korrelationen des MPD mit steigender Schlupfgeschwindigkeit steigen, wie es von einer Makrotexturmessung erwartet wird. D8.5 zeigt eine umgekehrte Entwicklung, die Korrelation sinkt mit steigender Schlupfgeschwindigkeit. Die beiden Pendel zeigen eine geringe Abnahme mit steigender Schlupfgeschwindigkeit. Diese Abnahme fiel geringer aus als für eine Mikrotexturmessung zu erwarten war. D8.5 hat eine Schlupfgeschwindigkeit, die unter 1 km/h liegt, bei den Pendeln liegt sie bei rund 10 km/h. Das könnte bedeuten, dass die Pendel mit einer tieferen Schlupfgeschwindigkeit die Mikrotextur besser erfassen könnten. Eine Schleifmessung bei Fussgängertempo, kombiniert mit einem Laser, könnte somit ein guter Ansatz für eine Messung der Makro- und der Mikrotextur sein. A12 basierte auf dieser Idee, hatte aber Elektronik- und Batterieprobleme.

Untenstehende Tabellen zeigen die Voraussage von GF60, wenn nur die "Mikrotexturmessungen" und die beiden Makrotexturmessungen (MPD und MTD) beigezogen werden.

Makrotextur mit MPD

"Mikrotextur"	S	N	A	B	C	MaxIEI	AveIEI	RMSE	R
D8.5	0.7	23	0.05852	0.92036	0	0.065	0.022	0.0263	0.968
A13.20	20	65	0.08114	0.73158	0	0.069	0.026	0.0307	0.96
A14-BPT	10	68	0.05626	0.00756	0	0.109	0.043	0.0526	0.874
B7-SRT	10	62	0.0436	0.00953	0	0.173	0.03	0.0454	0.913

MaxIEI = Maximaler absoluter Fehler

AveIEI = Mittlerer absoluter Fehler

RMSE = quadr. Mittel des residuellen Fehlers

*Tabelle 42: Voraussage von GF60, wenn nur die "Mikrotexturmessungen" und die beiden Makrotexturmessungen (MPD und MTD) beigezogen werden*

## Makrotextur mit MTD

Gleitkörper	S	N	A	B	C	MaxIEI	AveIEI	RMSE	R
D8.5	0.7	23	0.08317	0.84639	0	0.081	0.029		0.935
A13.20	20	65	0.09269	0.78191	0	0.072	0.025		0.96
A14-BPT	10	68	0.07784	0.00709	0	0.123	0.042		0.875
B7-SRT	10	62	0.05408	0.00917	0	0.157	0.033		0.923

MaxIEI = Maximaler absoluter Fehler

AveIEI = Mittlerer absoluter Fehler

RMSE = quadr. Mittel des residuellen Fehlers

*Tabelle 43: Makrotextur mit MTD*

Betrachtet man die Korrelationen zusammengefasst, so zeigt sich, wie gut das PIARC-Modell funktioniert:

---

Korrelationen R um GF60 vorauszusagen

---

	mit MPD	mit MTD
D8.5	0.968	0.935
A13.20	0.960	0.960
B7	0.913	0.923
A14	0.874	0.875

---

*Tabelle 44: Korrelation zusammengefasst*

D8.6 und A13.20 haben die besten Korrelationen. Es scheint, als ob die kontinuierliche Erfassung über eine grössere Fläche das bessere Mass ergibt. Wie schon erwähnt, haben Untersuchungen in Neuseeland gezeigt, dass Pendel eine schlechte Wiederholbarkeit aufweisen und es wird vorgeschlagen, dass bei Pendelmessungen mehr Punkte pro Strecke gemessen und dann gemittelt werden sollten.

## **8.8 Voraussage des Goldenen Wertes (GF60) mit anderen Methoden**

In diesem Kapitel werden zwei weitere Methoden zur Voraussage von GF60 und GS betrachtet. Die eine Methode stützt sich auf Messungen mit einem glatten und einem gerillten Messreifen und die andere Methode arbeitet mit wechselnden Schlupfgeschwindigkeiten, um dann mit einer logarithmischen Regression F60 und  $S_p$  zu finden. Für die erste Methode wurden Daten von B6 verwendet (ASTM-Gerät mit blockierten Messrädern), der mit beiden

Arten von Messrädern operierte: E501 (gerillt) und E524 (glatt). Die Daten wurden als B6.501 und B6.524 in der Datenbank abgespeichert. Es wurden die Daten bei einer Messgeschwindigkeit von 65 km/h verwendet und eine Regression wie folgt durchgeführt:

$$S_p = a + b \cdot B6.501 + c \cdot B6.524$$

Gl. 22

Dieses  $S_p$  wurde benutzt, um die Daten von B6.524 auf eine Geschwindigkeit von 60 km/h umzurechnen und so FR60 zu bekommen. Mit A und B aus Tabelle 41 wurde dann daraus F60 ermittelt.

Die zweite Methode wurde mit den Geräten, die variablen Schlupf hatten, untersucht: A13 und B4E, wobei  $S_p$  durch eine Regression der Reibungsmessungen bei den verschiedenen Schlupfgeschwindigkeiten ermittelt wurde. Tabelle 45 zeigt die Ergebnisse. Beim Verwenden dieser Ergebnisse zur Schätzung der Goldenen Werte zeigte sich, dass A13 zur Voraussage von GS (die Geschwindigkeitskonstante) schlechte Ergebnisse lieferte. Eine andere Untersuchung ergab aber, dass lineare Regressionen bei 30, 40 und 60 km/h um GF(30, 40 und 60) zu berechnen bessere Daten zur Voraussage der Geschwindigkeitskonstante GS liefern.

Untenstehende Tabellen zeigen die Regressionen zur Voraussage von GS und GF60 mit anderen Methoden.

#### Voraussage der Geschwindigkeitskonstante GS

Methode	S	N	A	B	C	MaxIEI	AveIEI	RMSE	R
501/524	65	68	50.03398	-317.254	613.2443	106.3	28.169	37.173	0.82
A13-Var	0-80	58	106.603	0.01564	0	172.07	48.206	58.181	0.226
B4E-SWP	0-52	17	-125.909	1.48292	0	200.65	61.432	83.808	0.83

MaxIEI = Maximaler absoluter Fehler

AveIEI = Mittlerer absoluter Fehler

RMSE = Quadr. Mittel des residuellen Fehlers

*Tabelle 45: Regressionen zur Voraussage von GS und GF60 mit anderen Methoden*

## Voraussage von GF60 mittels Berechnung von F60

Methode	S	N	A	B	C	MaxIEI	AveIEI	RMSE	R
501/524	65	68	0.53678	0.9067	0	0.156	0.021	0.031	0.957
A13-Var	60	58	-0.03365	0.77098	0	0.137	0.037	0.048	0.9
B4E-SWP	60	17	-7.4E-6	1.00002	0	0.129	0.043	0.051	0.81

MaxIEI = Maximaler absoluter Fehler

AveIEI = Mittlerer absoluter Fehler

RMSE = Quadr. Mittel des residuellen Fehlers

*Tabelle 46: Voraussage von GF60 mittels Berechnung von F60*

Es sollte in diesem Zusammenhang erwähnt werden, dass eine Makrotexturmessung alleine (in diesem Fall A2-ETD) den IFI mit einem R von 0.771 und F mit einem R von 0.871 voraussagt. Das zeigt einmal mehr, dass Makrotextur mit steigender Geschwindigkeit immer wichtiger für die Reibung wird.

## 9 Harmonisierung und Standardisierung

### 9.1 Einzelne Geräte

Für jedes Reibungs- und Texturmessgerät wurden Regressionen durchgeführt, um die Konstanten des PIARC-Modells zu finden (a, b, A, B und C, wo nötig). Für die Reibungsmesser finden sich diese Werte in den Tabellen, Tabelle 41, Tabelle 42 und Tabelle 45, wenn  $S_p$  aus dem MPD ermittelt wird. Zusätzlich wurden diese Konstanten aber auch ermittelt, wenn  $S_p$  aus anderen Texturmessungen ermittelt wurde. In Tabelle 40 finden sich die Konstanten, um  $S_p$  aus Texturmessungen zu ermitteln. Mit diesen Werten kann jedes Reibungsmessgerät FR60 berechnen und zwar unter Verwendung von  $S_p$  aus einer Texturmessung. Dann kann aus FR60 F60 berechnet werden (oder direkt aus FRS, wenn die Gleichungen kombiniert werden). F60 und  $S_p$  können dann als IFI angegeben werden. Die folgenden Graphiken zeigen den Vorgang.

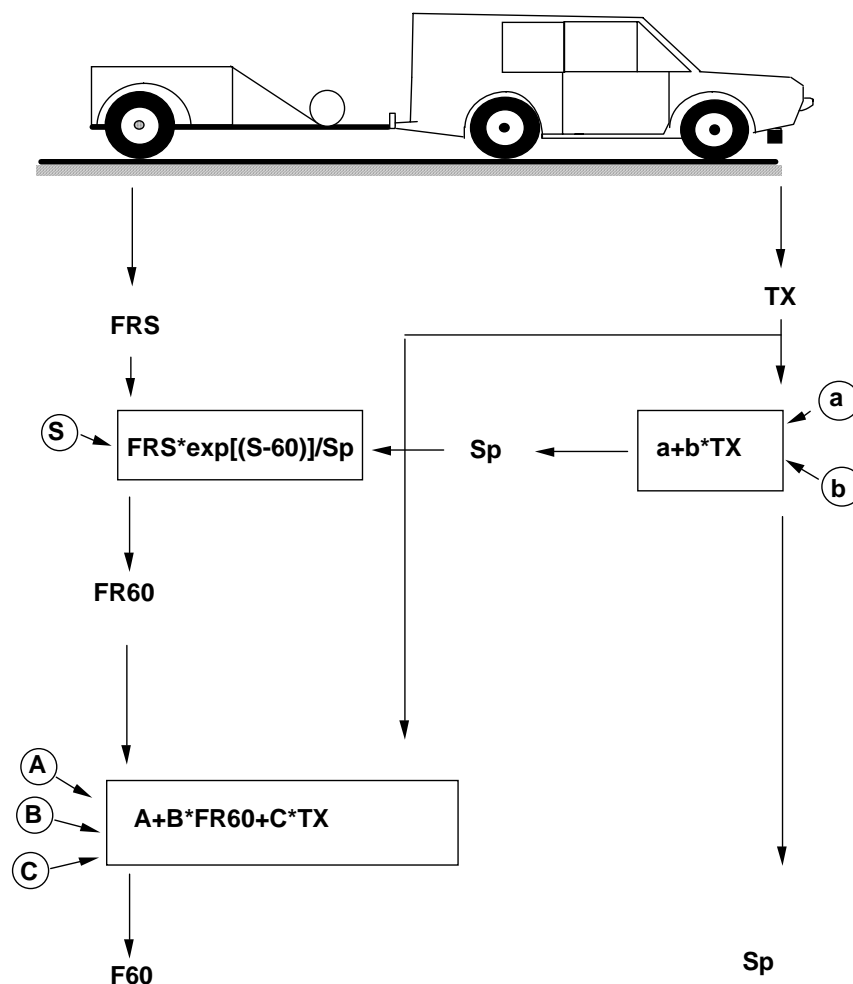


Figure 6: Flussdiagramm

Mit einem Satz von  $F_{60}$  und  $S_p$  Werten, kann  $F(S)$  bei jeder Schlupfgeschwindigkeit  $S$  mit folgender Gleichung ermittelt werden:

$$F(S) = F_{60} \cdot \exp[(60-S)/S_p]$$

Gl. 23

Damit ist auch die Verknüpfung zu alten Datenbanken gegeben oder man kann andere Geschwindigkeiten zum Eigengebrauch benutzen. So kann man beispielsweise für Hochgeschwindigkeitsstrassen  $F(120)$  und  $F_{60}$  benutzen. Für Seitenkraftmesser und Geräte mit Schlupf muss allerdings die Fahrzeuggeschwindigkeit  $V$  noch in  $S$  umgerechnet werden.

Tabelle 47 zeigt die Verbesserung in den Korrelationen und den mittleren absoluten Fehlern, nachdem die Harmonisierung (IFI) angewandt wurde.

In allen Fällen verbesserten sich die Korrelationen signifikant, ausser natürlich dort, wo die Korrelationen schon vorher gross waren. Es ist anzumerken, dass durch die Addition der Textur nicht nur die Fehler und Korrelationen verbessert wurden, auch die Abweichungen der Messungen reduzierten sich in allen Fällen signifikant (verminderte Punktwolken).

Untenstehende Tabelle zeigt den Vergleich der Korrelationen und Fehler vor und nach der Harmonisierung.

Gerät	N	FS geg. GFS	F60 geg. GF60	FS geg. GFS	F60 geg. GF60
		R	R	abs. Fehler	abs. Fehler
D6	69	0.98	0.98	0.017	0.016
B6-524	69	0.97	0.97	0.025	0.02
D1E	31	0.91	0.97	0.052	0.018
B4-SWP	17	0.83	0.96	0.1	0.021
C9	69	0.74	0.96	0.083	0.024
C10	61	0.84	0.96	0.066	0.025
C3B	35	0.93	0.96	0.055	0.023
C6E	29	0.84	0.96	0.045	0.02
A13-20	65	0.88	0.96	0.059	0.026
D8	67	0.82	0.95	0.098	0.027
D3	69	0.9	0.95	0.092	0.026
B2-SLP	64	0.86	0.95	0.049	0.028
C4	63	0.81	0.94	0.059	0.031
C8	69	0.82	0.94	0.074	0.029

D4	69	0.83	0.94	0.046	0.031
B3	68	0.82	0.94	0.071	0.029
D5	69	0.81	0.93	0.058	0.03
C1	62	0.84	0.93	0.048	0.033
B1-SLP	46	0.62	0.93	0.152	0.05
B4-SLP	15	0.71	0.92	0.078	0.031
B6-501	67	0.71	0.92	0.092	0.033
B5-SLP	67	0.78	0.92	0.084	0.033
B7-BPN	62	0.74	0.91	0.069	0.03
B1-LKD	42	0.66	0.9	0.128	0.033
B2-LKD	63	0.59	0.9	0.089	0.039
B5-LKD	59	0.73	0.9	0.078	0.038
A13-60	66	0.89	0.9	0.157	0.027
D2	68	0.76	0.88	0.059	0.039
A14-BPN	68	0.56	0.87	0.103	0.043
C5	69	0.75	0.84	0.095	0.043
C3E	27	0.55	0.84	0.082	0.043

Tabelle 47: Vergleich der Korrelationen und Fehler vor und nach der Harmonisierung

### 9.1.1 Beispiel mit D3

Als Beispiel, wie das Modell auf einen Reibungsmesser und eine Texturmessung angewandt werden kann, werden die Reibungswerte von D3 (D3.FR) und eine Texturmessungen von A2 (A2.MPD) in Betracht gezogen. Die Gleichung aus Kapitel 7.3 wird zur Bestimmung von  $S_p$  benutzt. Aus Tabelle 40 kann man für A2.MPD die beiden Konstanten a und b entnehmen (14.23 und 89.72):

$$S_p = 14.23 + 89.72 \cdot A2.MPD$$

Gl. 24

Wenn A2.MPD 2.05 mm beträgt, wird  $S_p$  gleich 198 km/h

Die Kombination der in Kapitel 7.3 angegebenen Gleichungen ergibt:

$$F60 = A + B * FRS * \exp[(S-60)/S_p] + C * A2.MPD \quad \text{Gl. 25}$$

In Tabelle 41: Regressionen um GF60 vorausszusagen unter Anwendung des PIARC-Modells. Sp wurde mit dem MPD bestimmt, findet man für D3, dass A gleich -0.0059, B gleich 0.862 und C gleich 0 (glatter Messreifen) ist.

Tabelle 41: Regressionen um GF60 vorausszusagen unter Anwendung des PIARC-Modells. Sp wurde mit dem MPD bestimmt.

$$F60 = -0.0059 + 0.862 * FRS * \exp[(S-60)/198.2] \quad \text{Gl. 26}$$

Wenn die Reibungsmessungen bei 55 km/h 0.543 beträgt, ist FRS 0.543 und

$$S = \sin(20^\circ) \text{ oder } 18.8. \quad \text{Gl. 27}$$

Somit wird:

$$F60 = 0.377 \quad \text{Gl. 28}$$

In anderen Worten 0.377 ist die Schätzung des Goldenen Reibungswertes und 198.2 km/h ist die Schätzung der goldenen Geschwindigkeitszahl und der IFI wird dann wie folgt angegeben:

$$IFI(0.377, 198.2) \quad \text{Gl. 29}$$

### 9.1.2 Zwischen Gerätetypen

Wenn ein universeller Standard benutzt wird, kann jedes Gerät mit anderen Geräten via diesen Standard in Beziehung gebracht werden. Dabei ist anzumerken, dass jede teilnehmende Organisation von einer Texturmessung aus Kapitel 6 oder der Datenbasis

wählen kann. Tabelle 48 zeigt die Originalkorrelationen von sechs Geräten und diejenigen, die auf ihren Vorhersagen von F60 beruhen. Einige Regressionen verkleinern sich nur in der zweiten Kommastelle, was statistisch nicht signifikant ist, andere hingegen verbesserten sich in grossem Ausmass. Das betraf in erster Linie die, die eine schlechte Anfangskorrelation aufwiesen.

Nachstehende Tabelle zeigt den Vergleich von ursprünglichen Korrelationen mit den Korrelationen von F60 für die gleichen sechs Geräte (Original Korrelation) und durch Texturmessungen verbesserte Korrelationen.

Originalkorrelationen (R) von sechs Geräten

Gerät	B6-524	C5	D3	D5	D6	D8
B6-524	.	0.84	0.78	0.81	0.94	0.87
C5	0.84	.	0.84	0.86	0.92	0.86
D3	0.78	0.84	.	0.9	0.72	0.84
D5	0.81	0.86	0.9	.	0.81	0.88
D6	0.94	0.92	0.72	0.81	.	0.83
D8	0.87	0.86	0.84	0.88	0.83	.

Neue Korrelationen (R) von sechs Geräten mit F60

Gerät	B6-524	C5	D3	D5	D6	D8
B6-524	.	0.81	0.91	0.97	0.91	0.89
C5	0.81	.	0.9	0.86	0.84	0.83
D3	0.91	0.9	.	0.96	0.94	0.94
D5	0.87	0.86	0.96	.	0.94	0.95
D6	0.91	0.84	0.94	0.94	.	.
D8	0.89	0.83	0.94	0.95	0.95	.

*Tabelle 48: Vergleich von ursprünglichen Korrelationen mit den Korrelationen von F60 für die gleichen sechs Geräte*

## **9.2 Der vorgeschlagene internationale Reibungsstandard**

Das PIARC Modell wird gebraucht um F60 und  $S_p$  zu berechnen. Der vorgeschlagene internationale Reibungsindex IFI würde dann mit  $(F60, S_p)$  angegeben. Es wird deshalb vorgeschlagen, dass die Normierungsgremien Studien durchführen, die den IFI als Kandidaten für einen internationalen Standard in Betracht ziehen.

### 9.3 Kalibration von anderen Geräten

Andere Geräte können unter Anwendung einer der in den folgenden Kapiteln 9.3.1 bis 9.3.4 aufgeführten Methoden kalibriert werden. Man schätzt die goldenen Werte  $F_{60}$  und  $S_p$  mit einer statistisch repräsentativen Auswahl an Teststrecken, die ein genügend breites Spektrum an Textur- und Reibungswerten abdecken sollen (als Minimum werden 10 Strecken vorgeschlagen). Neue Geräte, Geräte, die nie kalibriert wurden oder neu kalibriert werden müssen, sollen demnach dieselben Strecken messen und Regressionen in Anwendung des PIARC Modells müssten durchgeführt werden, um so die Konstanten  $a$ ,  $b$ ,  $A$ ,  $B$  (und  $C$ , wenn das Gerät gerillte Messreifen braucht) zu finden.

Angenommen, man will ein anderes, neues Texturmesssystem als das im vorherigen Beispiel verwendete A2.MPD gebrauchen. Zuerst würde D3 die Test-, bzw. Kalibrationsstrecken mit dem A2 Texturmessgerät messen und  $F_{60}$  und  $S_p$  für jede Strecke bestimmen. Die Messungen würden dann mit dem neuen Gerät, das als D3.Tx bezeichnet werden soll, wiederholt. Darauf folgt eine lineare Regression für  $S_p$  und D3.Tx gemäss folgender Gleichung:

$$S_p = a + b * D3.Tx \quad \text{Gl. 30}$$

Daraus werden die Konstanten  $a$  und  $b$  bestimmt. Dann muss die Schlupfgeschwindigkeit für jede Fahrt bestimmt werden und die zweite Regression für D3.FRS und  $F_{60}$  muss gemäss folgender Gleichung durchgeführt werden:

$$F_{60} = A + B * D3.FRS * \exp[(S-60)/S_p] \quad \text{Gl. 31}$$

Damit werden die Konstanten  $A$  und  $B$  bestimmt. Mit  $a$ ,  $b$ ,  $A$  und  $B$  ist D3 zum Gebrauch von D3.FRS und D3.Tx kalibriert. Auf ähnliche Weise würde jedes andere Gerät (DEV.FRS und DEV.Tx) mit derselben Prozedur kalibriert, um D3.FRS mit DEV.FRS und D3.Tx mit DEV.Tx zu ersetzen.

Um Goldene Werte zur Wiederkalibrierung zu bestimmen, sollten in allen folgenden Abschnitten nur Ausrüstungen benützt werden, die am PIARC-Experiment teilnahmen, und für jedes Gerät muss sichergestellt werden, dass die Kalibrierung nicht geändert hat. Es wird empfohlen, die Abläufe gemäss 9.3.1 den Abläufen gemäss 9.3.2 und 9.3.3 vorzuziehen. Wie auch immer, alle diese Methoden müssen noch verifiziert werden.

#### 9.3.1 Anwendung von Reibungsmessern, die am Experiment teilnahmen

Auf den zehn oder mehr Strecken mit unterschiedlichen Griffigkeitseigenschaften kann man Geräte benutzen, die am Experiment teilnahmen, um so die goldenen Werte ( $F_{60}$  und  $S_p$ )

der Strecken zu schätzen. Dann kann das neue Gerät zu den geschätzten goldenen Werten kalibriert werden, wie es im obigen Abschnitt beschrieben wurde. Diese Methode könnte verbessert werden, indem man mehrere Geräte, die am Experiment teilnahmen, benutzt. Mit Hilfe von jedem dieser Geräte könnten  $F_{60}$  und  $S_p$  berechnet werden und diese Werte könnten gemittelt werden, um die goldenen Werte dieser Strecken zu schätzen. Je besser die Korrelationen eines Gerätes beim Experiment, desto geeigneter ist es als Vergleichsgrösse.

### 9.3.2 Unter Anwendung von A13 oder D8

A13 und D8 wurden ausgewählt, weil sie klein sind und leicht zu Orten transportiert werden könnten, wo kein Gerät, das am Experiment teilnahm, vorhanden ist. Wieder werden 10 oder mehr Strecken mit einem der Geräte (A13 mit 20 km/h oder D8 mit 5 km/h) gleichzeitig mit einer Texturmessung erfasst, um  $F_{60}$  und  $S_p$  zu erhalten. Dann wird das neue Gerät in der beschriebenen Weise kalibriert, ausser, dass die geschätzten  $F_{60}$  und  $S_p$  mit A13(20) und einer Texturmessung oder mit D8 und einer Texturmessung bestimmt wurden.

A13(20) und D8(5) hatten ausgezeichnete Korrelationen und sind ähnlich dem Pendel, ausser, dass sie über viel grössere Flächen messen als das Pendel.

### 9.3.3 Unter Anwendung von Mikro- und Makrotextur

Auf zehn oder mehr Strecken mit unterschiedlichen Griffigkeitseigenschaften kann man die Pendel (A14 oder B7), die am Experiment teilnahmen, benutzen, um den goldenen Wert  $F_{60}$  zu schätzen und die volumetrische Methode, um den  $S_p$  der Strecken zu schätzen. Ein neues Gerät kann dann wie oben zu den geschätzten goldenen Werten kalibriert werden. Diese Methode könnte verbessert werden, wenn mehr Messungen entlang der Strecken gemacht würden. Wie Forschungen in Neuseeland zeigten, müssen die Pendel mit Vorsicht benutzt werden und verschiedene Pendel produzieren verschiedene Resultate. Die beiden Pendel, die am Experiment teilnahmen zeigten, wie verschieden die Resultate sein können.

### 9.3.4 Geräte ohne Textur

Drei Methoden, mit denen  $F_{60}$  und  $S_p$  für Kalibrationszwecke ebenfalls ermittelt werden können, wurden bereits im Kapitel 8.8 abgehandelt: Darunter befand sich auch die Methode mit zwei verschiedenen Messreifen, A13.VAR und B3.VAR. Dazu muss bei A13.VAR allerdings die Berechnung von  $S_p$  verbessert werden. Wie bei allen obigen Beispielen können die mit einem dieser Geräte bestimmten  $F_{60}$  und  $S_p$  zur Kalibration neuer Geräte beigezogen werden.

## 9.4 Anwendung des PIARC-Modelles

Im folgenden findet sich ein Beispiel über die Anwendung des PIARC-Modells zur Bestimmung der Textur- und Reibungswerte für ein Gerät, das am Versuch teilnahm und befriedigende Werte des IFI liefert. Wenn die Entscheidungsträger Grenzwerte für den IFI festlegen [ $IFI^*$  ( $FR_{60}^*$ ,  $S_p^*$ )] können die Anforderungen für einen minimalen Texturwert und eine minimale Reibung formuliert werden.

Das Vorgehen, um diese Kriterien zu entwickeln, kann für alle Reibungs- und Texturmesssysteme, die am Versuch teilnehmen, angewandt werden. Zuerst muss ein Texturmessgerät gewählt werden. Der Tabelle 40 können dann die entsprechenden Konstanten a und b entnommen werden.

$$S_p = a + b \cdot T_x \quad \text{Gl. 32}$$

Die besten Resultate werden mit einem Gerät, das MPD misst, erzielt.

Dann wählt man ein Reibungsmessgerät und seine gemessene Reibung ist anhand der Schlupfgeschwindigkeit S (FRS) der Schlupfgeschwindigkeit 60 km/h (FR60) anzupassen, indem man das berechnete  $S_p$  benutzt.

$$FR60 = FRS \cdot \exp[-(60-S)/S_p] \quad \text{Gl. 33}$$

Den entsprechenden Tabellen in Kapitel 8 kann man dann die Konstanten A, B und C (für Geräte mit gerillten, bzw. profilierten Reifen) entnehmen und in die folgende Gleichung einführen:

$$F60 = A + B \cdot FR60 + C \cdot T_x = A + B \cdot FRS \cdot \exp[-(60-S)/S_p] + C \cdot T_x \quad \text{Gl. 34}$$

oder

$$F60 = A + B \cdot FRS \cdot \exp[-(60-S)/(a + b \cdot T_x)] + C \cdot T_x \quad \text{Gl. 35}$$

wobei  $C=0$  ist für Geräte mit glatten Messreifen.

Dann sind die "Eingriffswerte für den IFI\*" zu wählen:  $F60^*$  und  $S_p^*$ . Diese sind in den obigen Gleichungen einzusetzen und für die minimal erforderliche Reibungsmessung und für die minimal erforderliche Texturanforderung aufzulösen:

$$FR_{min} = (F60^* - A - C \cdot T_x) \cdot \exp[60-S]/(a+b \cdot T_x) \quad \text{Gl. 36}$$

$$T_{xmin} = (S_p^* - a)/b \quad \text{Gl. 37}$$

Da  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $S$ ,  $S_p^*$  und  $IFI^*$  in der obigen Diskussion bestimmt wurden, drückt die erste Gleichung das Verhältnis zwischen  $FR_{min}$  und  $T_x$  aus. Die zweite Gleichung bestimmt  $T_{xmin}$ . Diese beiden Gleichungen können dann benutzt werden, entsprechende Graphiken zu berechnen.

Beispiele mit MPD als Texturmessung zeigten, dass sich für zwei SCRIM's (D3 und D5) fast identische Kurven ergaben. Für D6 mit blockiertem Messrad kann man sehen, dass die Anforderung an die Reibung über einem gewissen Texturschwellenmass unabhängig von der Textur ist, weil D6 die Reibung bei 60 km/h misst und für FRS keine Anpassung der Geschwindigkeit erfordert. Auch B6.524 ist fast unabhängig von der Textur, da die Messung bei diesem Gerät bei 65 km/h erfolgt. Zwei Geräte mit konstantem Schlupf (C5 und D8) haben unterschiedliche Graphiken, weil sie verschiedene Schlupfgeschwindigkeiten haben: 43 km/h (85% Schlupf) für C5 und 8.7 km/h (14.5% Schlupf) für D8.

## 10 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

### 10.1 Schlussfolgerungen

Dieser Forschungsbericht enthält Daten, die es erlauben eine internationale Skala von Reibungswerten zu definieren, genannt IFI. Der Bericht richtet sich in erster Linie an Forschungsstellen. Es liegt nun an den nationalen Strassenverwaltungen und/oder an den Normierungsgremien, den Nutzen von IFI für ihre Anwendungen, ihre Spezifikationen oder Normen zu evaluieren.

Die Resultate in diesem Bericht zeigen, dass es möglich ist, eine universelle Skala (IFI) zu definieren, die zusammen mit Reibungsmessungen angegeben werden kann. Es wurde ebenfalls gezeigt, dass eine Messung von  $S_p$  mit einer Texturmessung durchgeführt werden sollte, damit F60 bestimmt werden kann und  $S_p$  sollte zusammen mit F60 angegeben werden, um so die Nützlichkeit von Reibungsmessungen zu maximieren. Der Gebrauch dieser beiden Grössen in Berichten - einschliesslich Unfälle, Untersuchungen etc. - gibt die beste Information für solche Studien. Zusätzlich sind die Resultate solcher Studien überall dort von Nutzen, wo diese Skala implementiert wurde, und erhöht damit den Wert solcher Studien.

Datenbanken und Strassenmanagement würden ebenfalls davon profitieren, wenn jeweils F60 und  $S_p$  angegeben werden. Mit grösseren Datenmengen ergeben sich bessere Unterlagen für Verbesserungen.

Die Modellparameter für jeden getesteten Abschnitt wurden geschätzt und in einer Datenbank aufgezeichnet.

Im Falle von glatten Messreifen sind das GF60 und GS. Das ist die Goldene Reibung bei 60 km/h und die Goldenen Geschwindigkeitszahl. Die Werte für gerillte Reifen sind mit GFR1 und GRS0 bezeichnet. GF60 und GS sind ebenfalls in Tabelle 39 zu finden. Gewisse Strecken wurden für die Analysen in diesem Bericht nicht verwendet (mit \* bezeichnet in der Tabelle). Meistens war das im Zusammenhang mit Schwierigkeiten bei den Texturmessungen, wie es in Kapitel 6 beschrieben wurde. Die verbleibenden Daten werden als genügend betrachtet und das Ausscheiden fragwürdiger Daten ist immer von Vorteil, wenn genügend adäquate Daten zur Verfügung stehen. Kapitel 8 bestätigt die Möglichkeit, mit Makrotexturmessungen den Reibungsgeschwindigkeitsgradienten vorauszusagen:

Texturparameter	Anzahl Geräte	Korrelationsbereich	Absolute mittlere Differenz
MPD	5	0.906 - 0.950	18.1
RMS	10	0.793 - 0.939	22.0
MTD	1	0.929	18.0
Ausflusszeit	2	0.675 & 0.877	Kein Wert & 15.5

Tabelle 49: Texturparameter

Wie genau diese Voraussage gemacht werden kann, scheint viel mehr von der effektiven Bandbreite des Messsystems oder der Messmethode und von der Signalbearbeitungsmethode abzuhängen als von irgendeiner anderen technischen Eigenschaft des benutzten Gerätes (mit einer Ausnahme). Die bevorzugte Bandbreite liegt zwischen 2 - 50/100 mm in Bezug auf Texturwellenlängen. Der bevorzugte Algorithmus, um irgendein Profilsignal für die relevanteste Charakterisierung der Makrotextur zu bearbeiten, ist die so genannte Mittlere Texturtiefe (MPD - Mean Profile Depth).

Die von allen Texturmessgeräten produzierten Daten sind hochkonsistent, wenn die beste Messung jedes Gerätes berücksichtigt wird (Ausnahme A12). Wenn man A12 (das viele Probleme hatte) ausklammert, so sind alle beteiligten kontaktlosen Profilmessgeräte in der Lage, mindestens eine Makrotexturmessung zu liefern, die mit mindestens einem anderen Gerät  $R > 0.94$  aufweist und die relative Standardabweichung liegt zwischen 10% und 20%, was die Reproduzierbarkeit der Messungen der kontaktlosen Profilveräte in ihrem heutigen Zustand charakterisiert.

Da die Volumetrische Methode vermutlich noch eine Weile als Referenz dienen wird, wird empfohlen, die aus diesem Versuch gefundenen Formeln zu benutzen, um jede spezielle Messung in MPD zu konvertieren (MPD, um MTD anzunähern). Dies wäre ein riesiger Schritt in Richtung Harmonisierung von Makrotexturmessungen.

Idealerweise, wenn Bandweite und Algorithmus einmal spezifiziert sind und wenn alle Geräte diesen Spezifikationen entsprechen und sauber kalibriert sind, um die wahren Profilabweichungen in mm auszudrücken, könnten alle eine gemeinsame Konvertierungsgleichung für ETD (geschätzte Texturtiefe) verwenden. Dieser mögliche nächste Schritt braucht aber noch weitere Forschung.

Unter Anwendung des MPD als Texturmessung, wurden die Werte A und B (und C, für profilierte Reifen) für alle teilnehmenden Reibungsmessgeräte hergeleitet. Das Mittel des absoluten Wertes der Differenz zwischen dem vorausgesagten F60 und der Goldenen Reibungswertzahl GF60 wurden berechnet und die Resultate wurden zusammengefasst nach Gerätetyp. Die mittlere absolute Differenz ist eine direkte Messung des Fehlers in der Voraussage von GF60, wenn man F60 von einem spezifischen Textur und Reibungspaar benutzt. Der Korrelationskoeffizient beschreibt lediglich, wie gut F60 mit GF60 korreliert und die Standardabweichung beschreibt die Streuung der Fehler. Die Resultate für diese Messungen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Messung	Seitenkraft	Konstanter Schlupf	Blockiertes Messrad
Absolute Mittlere Differenz	0.028	0.033	0.030
Korrelationskoeffizient (R)	0.930	0.908	0.940
Standardabweichung (SD)	0.040	0.042	0.045

Tabelle 50: Korrelationen F60 und GF60

Es zeigte sich, dass der Beizug der Textur nicht nur bessere Korrelationen ergab, sondern auch die Fehler und die Streubreite für jedes Gerät reduzierte. Dies wird noch deutlicher, wenn die Schlupfgeschwindigkeit erhöht wird und ist somit Teil der Begründung, 60 km/h und nicht eine tiefere Schlupfgeschwindigkeit zu benutzen.

Die vier Ziele des Versuchs wurden eingehalten, teilweise mit grösserem Erfolg als erwartet. Das erste Ziel wurde mit dem PIARC Modell erreicht, wie sich herausstellte war das Klima kein Problem. Wie auch immer, bei extremen Temperaturbedingungen könnte es ein Problem sein und es wäre dafür zusätzliche Forschungsarbeit nötig. Das zweite Ziel wurde mit der Entwicklung des PIARC Modells und dem IFI erreicht. Das dritte Ziel wurde in den Kapiteln 5 und 6 behandelt. Das vierte Ziel wurde erreicht, indem bei Angabe des IFI mit jedem Gerät die Messwerte in einer universellen Skala vorausgesagt werden können. Das vierte Ziel wurde geändert, aber die Ergebnisse zeigen auch, dass alle mobilen Geräte für ganze Strassenetze und alle Geräte für Projekte genutzt werden können. Weil alle diese Ziele erfüllt wurden, ergaben sich zusätzliche Vorteile:

Strassen- und Flughafenverwaltungen können einen universellen Standard übernehmen, ohne ihre gegenwärtigen Kontrollmethoden, ihre Erfahrung und historischen Daten ersetzen zu müssen.

Werte, die Eingriffe erfordern, sind vergleichbar.

Materiallieferanten können mit harmonisierten Spezifikationen ihren Markt erweitern und mehr Länder beliefern.

Vertragspartner, die in anderen Ländern arbeiten wollen, können lokale Kontrollmethoden adaptieren.

Gerätehersteller können einen grösseren Markt beliefern.

Praktiker und Forscher können ein vertieftes Wissen über Griffigkeitsphänomene und Textureffekte gewinnen.

Strassen- und Flughafenbenutzer können Berichte aus verschiedenen Ländern mit derselben Skala bekommen, was zu einer verbesserten Sicherheit beitragen kann.

Die Analysen in diesem Bericht liefern allen Beteiligten des Versuchs die benötigten Kalibrationskonstanten. Alle Beteiligten verfügen über die gesamte Datenbank und können damit weitere statistische Untersuchungen durchführen.

## **10.2 Empfehlungen**

### **10.2.1 Der vorgeschlagene internationale Reibungsindex (IFI)**

Internationale Normierungsgremien wie ASTM, CEN, ISO usw. sollten neue Normen entwickeln, die das PIARC-Modell beiziehen, um  $F_{60}$  und  $S_p$  zu berechnen und anzugeben. Diese Normen sollten dann von Strassenadministrationen und Vertragspartnern gewürdigt und benutzt werden. Die bestehenden Normen können bewahrt werden und die Daten

können gemäss Beispiel in Abschnitt 8.5 angepasst werden. Der nächste Schritt wäre für internationale Gruppen das Festlegen von akzeptablen Eingriffsgrössen, die dann weltweit für das Strassenmanagement genutzt werden könnten. Diese Werte müssen akzeptabel sein, weil für verschiedene Strassentypen und -klassen unterschiedliche Anforderungen erfüllt werden müssen.

## 10.2.2 Kalibration und Harmonisierung von anderen Geräten

In Kapitel 9.3 wurden Methoden zur Kalibrierung, Wieder- und Neukalibrierung und Harmonisierung von Geräten, die neu, abgeändert, oder nicht unter den Teilnehmern waren, vorgestellt. Es ist gut möglich, dass aufgrund dieses Versuches Modifikationen oder Neugestaltungen vorgenommen werden.

Die Daten von den Tests auf den NASA Wallop Inseln sollten Unterlagen zur Überprüfung und Verifizierung der Kalibrationsvorgänge in Kapitel 9.4 liefern. An diesen Tests waren Geräte, die an den Versuchen teilnahmen, ebenso beteiligt, wie andere oder neue Geräte (Textur und Reibung). Es wird empfohlen, in anderen Teilen der Welt ähnliche Kalibrationsversuche durchzuführen und die Resultate bekannt zu geben. Aufgrund dieser Erfahrungen könnten dann Normen zur Kalibration und Harmonisierung anderer Geräte geschrieben werden.

## 10.2.3 Textur

Zurzeit befasst sich ISO/TC43/SC1/WG39 mit Texturmessungen. Sie soll die Analyse von Texturdaten standardisieren. Zukünftige ISO-Normen sollten die Berechnung des zum PIARC Modells gehörenden Parameters  $S_p$  beinhalten.

## 10.2.4 Empfehlungen für weitergehende Forschungen

Mit der grossen Datenmenge ergeben sich viele Möglichkeiten zu weiteren Forschungen, zu denen Organisationen in aller Welt ermuntert werden. Beispiele:

- Auswirkung der Lufttemperatur, der Belagtemperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit, Megatextur oder des IRI auf Reibungsmesser. So eine Studie könnte herausfinden, welche Reifen (Gummimischungen) betroffen sind und welche nicht, und so zu besseren Testreifen führen.
- Faktoren der Texturausgestaltung, die die Reibung beeinflussen, können untersucht werden, um herauszufinden, welche Textureigenschaften am besten mit der Reibung korrespondieren. Die heute übliche Texturtiefe ist vielleicht nicht die beste Texturmessung für Reibungsmodelle.
- Jedes Reibungsgerät sollte in Bezug auf seine Sensitivität zur Geschwindigkeit begutachtet werden, und es sollte auch versucht werden, herauszufinden, welches Texturmessgerät addiert werden soll, um die besten IFI und  $S_p$  zu erhalten.
- Auch die Sensitivität von Texturmessgeräten in Bezug auf Geschwindigkeit sollte ermittelt werden. Einige Texturmesseräte haben Geschwindigkeitsangaben in der Datenbank, andere nicht. Die Wahl der geeigneten Texturmessung ist von den Auswirkungen der Geschwindigkeit abhängig. Für ein

Reibungsmessgerät, das bei 60 km/h misst, wäre ein Hochgeschwindigkeits-texturmessgerät am besten geeignet. Auf der anderen Seite mag ein stationäres oder langsames Gerät nötig sein, um die Goldenen Werte vorauszusagen, wenn zusätzliche Geräte zu kalibrieren sind.

- Weitere Forschung für Textur-Reibungs-Modelle ist immer erwünscht. Die Arbeit im vorliegenden Projekt ist erst ein Anfang, das Gebiet erfordert noch viel Grundlagenforschung. Ein verbessertes Verständnis von Texturformfaktoren und der Einbezug von Formfaktoren in Textur-Reibungs-Modellen könnten zu einer Verbesserung der Modelle führen.
- Die Konstruktion von Reibungsmessern mit Texturprofilometern sollte unterstützt werden, seien es Neukonstruktionen oder Erweiterungen bestehender Systeme.
- Es besteht der Bedarf nach einer Methode zur Aufzeichnung und Analyse von Mikrotextrur. Ausser Labormethoden gibt es keine Methoden, die es erlauben, das Profil der Mikrotextrur aufzuzeichnen. Mehr Kenntnisse über Mikrotextrur - nicht Ersatzmessungen wie mit dem Pendel - sollten Textur-Reibungs-Modelle stark verbessern.
- Beim Versuch gab es nur drei Strecken mit porösem Asphalt. Sie wurden in der Analyse weggelassen, da die Texturgeräte darauf nicht messen konnten. Vielleicht Ausfluss- oder eine andere Messung aus der Datenbank könnten untersucht werden. Texturmessgeräte benötigen Verbesserungen, damit sie diese Oberflächen messen können. Weitere Untersuchungen an offenporigen Belägen sind nötig.
- Es mag nützlich sein, die Resultate nach Belagsarten zu gruppieren, beispielsweise bituminöse Beläge, Beton, Oberflächenbehandlungen etc.
- Der Einfluss von Kurven könnte weitere Forschungen benötigen. Wie auch immer, eine Studie der FHWA berichtete, dass Querschleunigungen unter 0.3 g kein Problem darstellen sollten.
- Die Werte in Tabelle 39, zusammen mit den Werten der Textur- und Reibungsmesser, die am Versuch teilnahmen, bilden die Datenbank, von der noch viele Untersuchungen gemacht werden könnten.

## 11 Literatur

Surface Characteristics, Report of PIARC Technical Committee on Surface Characteristics, XIX World Congress, Marrakesh, 1991

"The Determination of Skid Resistance - Speed Behaviour and Side Force Coefficients of Pavements", V. R. Shah and J. J. Henry, Transportation Research Record 666 (1978) pp. 13 - 18.

"A Method for Rating the Skid Resistance and Micro/Macrotexture Characteristics of Wet Pavements", W.B. Horne and F. Buhlmann, Frictional Interaction of Tire and Pavement, ASTM STP 793 (1983), pp. 191 - 218.

"An International Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurement", PIARC Technical Committee One on Surface Characteristics (1991).

"Briefing on NASA Viscous/Dynamic Hydroplaning Theory and Friction Tester Correlation Techniques", W. B. Horne, State College, Pa., January 18, 1993.

"Models to Harmonize Methods for Measuring Road Friction", J. J. Henry, M. Marasteanu, Second International Symposium on Road Surface Characteristics, Berlin, Germany, June 1992.

"Unified Theory of Rubber Friction Reveals Adhesion Component's Role in Tire-Road Surface Coupling", W. H. Kummer and W.E. Meyer, SAE Journal 75 No 8 (1967), pp. 70 - 73.

"Prediction of Skid Resistance as a Function of Speed from Pavement Texture", M. C. Lew and J. J. Henry, transportation Research Record 666 (1978), pp. 7 - 13.

"Skid Resistance Measurement with Blank and Ribbed Test Tires and their Relationship to Pavement Texture", J. J. Henry and K. Saito, Transportation Research Record 946 (1983), pp. 38 - 43.

"Road Characteristics and Skid Resistance", J. C. Wambold, Transportation Research Record 1196 (1989) pp. 294 - 299.

Surface Characteristics of Roadways, International Research Technologies, W.E. Meyer and J. R. Reichert, editors, ASTM STP 1031, Philadelphia, PA, 1990.

PIARC (1987): "Optimization of Surface Characteristics". PIARC Technical Committee on Surface Characteristics. Report to the XVIIIth World Road Congress (1987), Brussels, Belgium.

ISO/CD 13473 (1994): "Characterization of Pavement Texture Utilizing Surface Profiles: Estimation of Mean Texture Depth". Committee Draft from ISO/TC 43/SC 1/WG 39.

Sandberg, Ulf; Anund Per (1992): "Measurements of Macrotecture by the VTI Mobile Laser Profilometer in the PIARC International Experiment 1992". VTI Notat 52-20, Swedish Road and Transport Research Institute, Linköping, Sweden.

PIARC (1994): Data diskette, containing all results from the PIARC International Experiment 1992. Available from the Secretariat General of PIARC, Paris.

ISO 10844 (1994): "Acoustics - Test surface for road vehicle noise measurement. Annex A: Measurement of pavement surface macrotecture depth using a volumetric technique". International Organization for Standardization, Geneva.

ASTM (1987): "Standard Test Method of measuring Surface Macrotecture depth Using a Volumetric Technique". Standard No E965-87, American Society for testing and Materials.

RRL (1969): "Instructions for using the portable skid resistance tester (Appendix 1: The measurement of texture depth by the sand patch method)". Road Note No 27, Road research Laboratory, London.

Gothié, Michel (1994): Personal communication to Ulf Sandberg.

Sandberg, Ulf (1990): "Relation between Tyre/Road Friction and Road Texture". STU Report 87-01481. Swedish Road and Transport Research Institute, Linköping, Sweden (1990-09-28).

Descornet, Guy (1993): "Preliminary report on texture measurements". Unpublished report, Belgian Road Research Center, Brussels (handed out at the PIARC Seminar in Delft, October 1993).

## 12 Auswirkungen des Versuchs

Der in den vorstehenden Kapiteln zusammengefasste Schlussbericht zum Experiment erschien Ende 1995.

Wie die im Bericht enthaltenen Ergebnisse und Vorschläge zu bewerten sind und was die Auswirkungen sind, hat in der Zwischenzeit Einfluss auf die Arbeit verschiedener Gremien genommen.

### 12.1 Neudefinition der Mittleren Profiltiefe

Zum einen wurde der MPD (Mittlere Profiltiefe) im Rahmen von ISO/CD 13473 neu definiert. Diese Arbeit beruhte nicht zuletzt auf den im Versuch gewonnen Daten.

Es wurden auch Umrechnungsformeln entwickelt, die es erlauben, die im Bericht aufgeführten MPD Werte in die neuen Werte umzurechnen. Entsprechend anzupassen wären dann auch die dazugehörigen Konstanten a, b, sowie A, B, und C, wenn der IFI mit Hilfe von MPD als Texturgrösse ermittelt werden soll.

### 12.2 Arbeitsgruppe der FEHRL

Die Bedeutung des IFI aus europäischer Sicht wird unter anderem in einer Arbeitsgruppe der FEHRL (Forum of European Highway Research Laboratories)) untersucht (Working Group on „European Harmonization of Friction and Evenness Measurement Methods).

In einem ersten Schritt wurde die Arbeit einer differenzierten Beurteilung unterzogen. Einige der Folgerungen der Arbeitsgruppe lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Grundsätzlich wurde das Experiment als positiv beurteilt. Die geschaffene Datenbank wurde als wichtige Grundlage für weitere Forschungen gewürdigt.

Die Tatsache, dass nicht eine Messmethode bevorzugt wurde, sondern dass die Messungen verschiedener Geräte harmonisiert wurden, wurde als sinnvoller Grundansatz angesehen.

Der IFI wurde aufgrund einer bestimmten Gruppe von Geräten und deren Zustand zur Zeit des Experiments ermittelt. Nur schon aufgrund der Tatsache, dass auch Messgeräte einem bestimmten „Drift“ unterworfen sind, macht deutlich, dass der IFI keine feste Skala darstellt. Er ist letztlich das Resultat einer bestimmten Geräte und Messstreckenkombination. Der IFI bedarf deshalb eines gewissen „Unterhalts“. Nicht nur neue oder andere Geräte, sondern auch die teilnehmenden Geräte müssen demnach periodisch kontrolliert und dem IFI erneut angepasst werden. Das ist nicht nur im Hinblick auf den IFI von Bedeutung, wenn man den Wert der gewonnen Daten nicht mindern will. Regelmässige Kalibrationen sind auch im Hinblick auf die Qualitätssicherung unerlässlich.

Das bedeutet allerdings nicht, dass das ganze Experiment wiederholt werden muss. Es ist durchaus denkbar, dass regelmässige Korrelationen nach einem Rotationssystem in kleinerem Rahmen durchgeführt werden können.

Die Arbeitsgruppe kommt zum Schluss, dass die gemachten Analysen noch nicht ausreichen, um den IFI unbesehen für nationale oder internationale Normen zu übernehmen.

Es bestehen beispielsweise noch Lücken in der Frage der Präzision der einzelnen Geräte. Auch die Frage der Wiederholbarkeit muss noch genauer abgeklärt werden.

Es ist noch offen, ob die gemachten Beobachtungen bezüglich der Geschwindigkeits-Reibungsverhältnisse für die Beläge und Oberflächen aller FEHRL-Mitgliedstaaten zutreffen. Beispielsweise offenporige Beläge sind im Modell nicht oder nur ungenügend berücksichtigt.

Es ist noch nicht nachgewiesen, ob sich mit dem IFI genügend genau Anforderungsklassen an Strassenbaumaterialien formulieren lassen.

Die Arbeitsgruppe hat in der Folge einige Empfehlungen formuliert, die sich wie folgt zusammenfassen lassen:

Damit die umfassende Datenbank aus dem Experiment ihren Wert behält, sollen die Resultate im Hinblick auf folgende Fragen zu weiteren Untersuchungen benutzt werden:

Überprüfen, ob das Konzept des IFI relevant ist, wenn man Anforderungsklassen formulieren will.

Festlegen einer Europäischen Verfahrens für die Kalibration von Reibungs- und Texturmessgeräten.

Dazu sind einige technische und organisatorische Gesichtspunkte zu berücksichtigen.

Aus technischer Sicht sind das etwa:

- Neudefinition und möglicherweise Umbenennung des IFI (Unter Umständen Wahl einer anderen Schlupfgeschwindigkeit als 60 km/h, Anpassen der Makrotexturmessungen an die neuen Normen, CEN in Entwicklung, ISO im Entwurf).
- Periodizität
- Genauigkeitsanforderungen
- Genaue Abläufe für alle Messmethoden
- Spezifikation der Eigenschaften der Oberflächen der Teststrecken
- Ablauf der Messungen (Geschwindigkeiten, Anzahl Durchgänge etc.)
- Schema für Zwischenvergleiche unter den Gerätegruppen.

Aus organisatorischer Sicht sind das etwa:

- Zusammensetzung und Verantwortung einer Aufsichtsbehörde
- Wissenschaftliches und technisches Personal, sowie Ausrüstung des Testlabors (oder der herumreisenden Equippe)

- Anforderungen an den Standort und die Infrastruktur der Testeinrichtung
- Form und Bedeutung des Kalibrationsberichtes
- Bedingungen für die Gültigkeit des Zertifikates
- Arbeitsnachweise der Testequippe
- Budget und Finanzierung (Selbstfinanzierung scheint möglich)
- Zusammenarbeit mit CEN.

Die Ausarbeitung dieser Aspekte könnte unter dem Banner der FEHRL von einer Experten-Gruppe durchgeführt werden.

Die Hauptsache der Grundlagen für die technischen Fragen der Kalibration könnten zum Grossteil mit Hilfe der Datenbank aus dem PIARC Versuch erarbeitet werden. Wie auch immer, der Bericht enthält nicht unbedingt die nötigen Informationen in Genauigkeitsfragen und befasst sich nur zum Teil mit den vielen spezifischen Bedürfnissen einer internationalen Harmonisierung.

Weitere Analysen der Datenbank, zusammen mit einigen ergänzenden Versuchen sind deshalb nach Ansicht der Arbeitsgruppe unerlässlich.

Ein Ausarbeitung eines entsprechenden Forschungsprojektes, das der FEHRL unterbreitet werden sollte, wurde von der Arbeitsgruppe als erstes Ziel angesehen.

Finanziert werden könnte es mit Hilfe der EU und zwar im Hinblick auf:

- Pränormative Forschung
- die Kosten zur Einrichtung eines europäischen Kalibrationszentrums.

Das ganze soll nicht zuletzt auch im Hinblick auf das TERN (The Trans European Road Network) geschehen. Die Griffigkeit auf diesem Strassennetz sollte von den einzelnen Ländern mit ihren verschiedenen Geräten gemessen werden können. Um die Sicherheit zu gewähren müssen die Daten aber vergleichbar sein.

Die Lancierung einer COST Aktion könne vielleicht als Ausgangspunkt von Nutzen sein.

### **12.3 Weitergehende Forschung**

Ein Teil der von der Arbeitsgruppe der FEHRL formulierten Empfehlungen konnten mittlerweile dank einem Forschungskredit der Belgischen Regierung vom BRRC (Belgian Road Research Center) in Arbeit genommen werden. Im Hinblick auf den Erhalt des Wertes der Datenbank ist das besonders wichtig. Das Projekt befasst sich denn auch mit einer genauen Analyse der Daten, wobei der Schwerpunkt auf den Bedürfnissen der in Europa benutzten Geräte liegen soll. Zusätzliche Versuche sollen sich etwa mit Oberflächen befassen, die am Experiment nur unzulänglich berücksichtigt wurden, beispielsweise offenporige Beläge. Das BRRC erhofft sich auch Hilfe von anderen FEHRL Mitgliedern, um weitere Vergleichs- und Absicherungsversuche durchführen zu können. Das Projekt wurde im Mai 1996 begonnen und war auf zwei Jahre angelegt.

## 13 Vergleichsmessungen des IVT

Neben seinen bewährten Geräten, dem Pendel, dem Ausflussmesser und dem Skiddometer nahm das IVT auch mit dem Stuttgarter Reibungsmesser (SRM) am PIARC Experiment teil. Der SRM war erst unmittelbar vor dem Versuch ausgeliefert worden und hatte deshalb noch mit einigen Kinderkrankheiten zu kämpfen. Der Stuttgarter Reibungsmesser des IVT wurde im Anschluss an das PIARC-Experiment, wie im Bericht erwähnt, neu kalibriert. Dennoch wurde die Teilnahme mit dem SRM als wichtig erachtet, da er den in die Jahre gekommenen Skiddometer ablösen soll. Der Vergleich von CH-SRM und Skiddometer war deshalb für die Würdigung des bestehenden Datenhintergrundes und des Bewertungshintergrundes der Griffigkeitsmessungen auf den schweizerischen Strassen mit den ETH-IVT Geräten besonders wichtig.

Der SRM arbeitet grundsätzlich nach dem gleichen Messprinzip wie der Skiddometer, trotzdem kann aber nicht einfach davon ausgegangen werden, dass die beiden Geräte deshalb austauschbar sind.

Die wichtigsten Unterschiede der beiden Geräte können wie folgt zusammengefasst werden:

- Der SRM kann die linke und die rechte Messspur gleichzeitig messen
- Die Messräder des SRM liegen in den beiden Fahrspuren. Um mit dem Skiddometer, wo sich das Messrad in der Mitte des Anhängers befindet, die rechte Fahrspur zu messen, muss jeweils versetzt gefahren werden, was nicht immer möglich ist
- Der SRM mit seinem grossen Wasservolumen hat eine grössere Messreichweite
- Der Schlupf bei Schlupfmessungen beträgt beim SRM rund 14%, beim Skiddometer rund 16%
- Der SRM hat eine eingebaute computergesteuerte Messaufnahme und Auswertung. Beim Skiddometer wird die Auswertung manuell graphisch auf dem Messschrieb gemacht
- Neben Block und Schlupf kann der SRM auch mit ABS messen

Eine wichtige Frage betrifft die Griffigkeitsnorm und das Beurteilungsschema der ETH-IVT: Gelten sie auch für den SRM oder müssen allenfalls Umrechnungen vorgenommen werden? Dabei geht es vor allem um die Messung mit blockiertem Messrad, auf denen die Normvorschriften beruhen.

Die beim PIARC Versuch gefundenen Korrelationen sind nachfolgend zusammengestellt (gemäss Tabelle 30) und beziehen sich lediglich auf das rechte Messrad des SRM:

Bezeichnung der Geräte	Korrelationskoeffizienten
SRM- Skiddometer	0.866 und 0.893
SRM - SRM Österreich	0.905 und 0.905
SRM Österreich - Skiddometer	0.857 und. 0.911

*Tabelle 51: Korrelationen zwischen ETH Skiddometer und ETH und A-SRM, ausgewertet mit dem rechten SRM-Messrad*

Die Korrelationen bewegen sich in ähnlichem Rahmen, wie sie zwischen anderen Geräten gefunden wurde. Die Gesamtkorrelation aller SCRIM's, die ja auch alle dasselbe Messprinzip aufweisen, belief sich beispielsweise auf 0.86.

Zudem darf nicht vergessen werden, dass es aus Zeitgründen nicht immer möglich war, mit dem Skiddometer alle Wiederholungsmessungen durchzuführen, womit sich eine entsprechend reduzierte Datenmenge ergab. Ausserdem werden die Messungen beim Skiddometer manuell ausgelöst, was auf den relativ kurzen Messstrecken und Sektionen kein leichtes Unterfangen war, v.a. wenn man eine genügend grosse Anzahl Messblöcke erzielen wollte.

Es geht aber nicht nur um die Korrelation, sondern es interessiert vor allem, ob die Messungen der beiden Geräte als statistisch gleich betrachtet werden können.

Dabei wurde wie folgt vorgegangen. Einerseits wurden die Daten aus dem Versuch betrachtet und andererseits führte das IVT soweit es das Budget zulies einige Zusatzmessungen durch.

Diese Messungen wurden im November 1993 auf der N9 und im Sommer 1994 auf einem gesperrten Autobahnstück der N4 in Knonau, sowie auf dem Simplon durchgeführt.

Man wollte dabei darauf achten, möglichst viele Parameter, die einen Einfluss haben könnten, auszuschalten. Es sollte also nicht nur wie beim PIARC-Experiment die gleiche markierte Strecke ( $\pm 50$  cm) am gleichen Tag gemessen werden, sondern man wollte die genau gleiche Spur zur gleichen Zeit messen. Das bedeutete, dass die beiden Messfahrzeuge hintereinander fahren oder sich so abwechselten, dass es dem hinteren Fahrzeug möglich war, auf der gut sichtbaren Messspur des vorderen Wagens zu messen. Wie sich herausstellte war das auf dem Simplon nicht möglich, da die beiden unterschiedlichen Fahrzeugkonfigurationen in den Kurven unmöglich die gleiche Spur einhalten konnten. Vor allem der Skiddometer mit seinem Anhänger und dem Messrad in der Mitte konnte selten genügend versetzt fahren. Ähnliches galt für verschiedene Ausfahrten, die auf der N9 gemessen wurden. Es ist klar, dass sich auf solchen Strecken auch mit demselben Gerät die

genau gleiche Spur kaum zweimal eingehalten werden könnte und darum ging es ja bei dieser Betrachtung.

Im Rahmen des Forschungsauftrages war es zwar nicht möglich eine grosse, repräsentative Auswahl an Strecken, Belägen und Bedingungen für diese Messungen zu betrachten. Doch Messungen bei kaltem Wetter im Wallis und bei sommerlichen Temperaturen auf der N4, sowie eine Anzahl unterschiedlicher Beläge auf der N9 sollten zumindest eine sehr gute Näherung darstellen.

Es wurden Messungen mit konstantem Schlupf und mit blockiertem Messrad durchgeführt. Da die Norm in der Schweiz auf Messungen mit blockiertem Messrad beruht, werden im Folgenden die Ergebnisse der Versuch mit diesem Messtyp präsentiert.

Korrelationen bei linearer Regression:

	Wertepaare	Korrelationskoeffizient
PIARC Experiment	138	0.87

Weitere Messungen:

SRM Rechts - Skiddometer	149	0.97
SRM Rechts - SRM Links	23	0.97
SRM Links - Skiddometer	23	0.93

*Tabelle 52: Korrelationen zwischen ETH-SRM und ETH-Skiddometer am AIPCR-Experiment und auf schweizerischen Strassen*

In der untenstehenden Abbildung sind die einzelnen Punkte aus den Vergleichsmessungen der SRM- mit den Skiddometerwerten aus den weiterführenden Untersuchungen auf dem schweizerischen Strassennetz dargestellt.

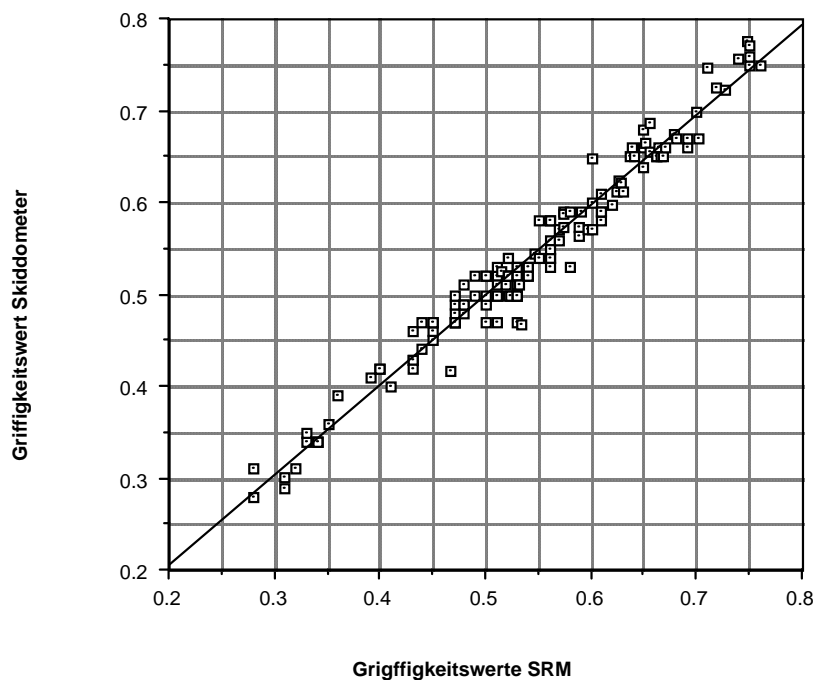


Figure 7: Vergleich der SRM- mit den Skiddometerwerten aus den weiterführenden Untersuchungen der ETH-IVT auf schweizerischen Strassen

Als nächster Schritt interessiert, ob die Mittelwerte der Messungen mit den beiden Geräten als statistisch gleich betrachtet werden können.

So zeigte sich beispielsweise, dass die Messungen mit dem linken SRM-System durchwegs kleinere Werte zeigten als die Messungen mit dem rechten SRM-System. Diese Abweichung stellten wir systematisch fest, obwohl verschiedene Messungen auf der gleichen Fahrspur durchgeführt wurden.

Es ergab sich nun also die Frage, ob dieser Unterschied statistisch signifikant ist, oder nicht.

Dabei zeigte sich, dass sich bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 5\%$  kein Grund zur Annahme ergab, die Mittelwerte und die Varianzen als verschieden zu betrachten. Das trifft zu sowohl für Betrachtungen zwischen dem linken und dem rechten System des SRM wie auch zwischen dem linken und rechten System des SRM mit dem Skiddometer.

Allerdings gilt das nicht für die Messungen aus dem PIARC Experiment, sondern nur für die weiterführenden Messungen, welche wir in der Schweiz zusätzlich zum AIPCR-Experiment durchgeführt haben.

Die am Experiment gemachten Erfahrungen konnten somit genutzt werden, um den SRM einzuführen und die Messungen zu optimieren.

Die statistischen Analysen deuten darauf hin, dass die geltenden Grenzwerte der Norm und das Beurteilungsschema der ETH-IVT auch für den SRM angewandt werden können.

## 13.1 Schlussbetrachtungen

### 13.1.1 Anmerkungen

In diesem Abschnitt finden sich einige Bemerkungen zu den einzelnen Kapiteln des PIARC Berichtes.

Teilnehmende Geräte: Am Versuch nahmen Griffigkeitsmessgeräte teil, die insgesamt 51 Messungen zuließen.

Das IVT der ETH nahm mit 4 Geräten teil:

- Pendel
- Ausflussmesser
- Skiddometer
- SRM (Stuttgarter Reibungsmesser)

Das hatte zur Folge, dass die Messequipe ein sehr grosses Messprogramm zu absolvieren hatte. Wiederholungsmessungen mit dem Skiddometer waren deswegen teilweise nicht möglich.

5.3 Änderungen an den Streckeneigenschaften während oder aufgrund der Messungen. Die Messung mit dem Pendel nach schweizerischer Methode wird normalerweise mit einer Temperaturkorrektur durchgeführt, die amerikanische Methode sieht keine solche Korrektur vor. Wie die Auswertung zeigte, hatte die Temperaturkorrektur aber keinen Einfluss, d.h. die Korrelation lag mit oder ohne Temperaturkorrektur in demselben Rahmen.

5.4 Variation zwischen zwei Durchgängen. Vor allem bei hohen Geschwindigkeiten wurden für den SRM einzelne Ausreisser festgestellt. Für den Skiddometer wurde dieser Test nicht durchgeführt, da wie oben begründet, nicht die gewünschte Anzahl Durchgänge gemessen werden konnten. Ein Umstand, der auch die Korrelationen des Skiddometers mit anderen Geräten beeinflusst haben könnte. Es standen weniger Daten zur Berechnung des Mittels zur Verfügung.

5.5 Wiederholbarkeit Der SRM wurde nach dem Experiment neu kalibriert. Ein Einfluss auf die Wiederholbarkeit kann nicht ausgeschlossen werden, ist aber eher unwahrscheinlich.

6.10 Ausflussmesser Trotz grösserem Stichprobenumfang beim Ausflussmesser des IVT, zeigt der Vergleich mit den anderen Messungen und dem anderen Ausflussmesser, dass eine automatische Erfassung der Ausflusszeit einer manuellen Methode eher vorzuziehen ist.

7.1.2 Vergleich von ähnlichen Messausrüstungen Für die folgenden Vergleiche wurden, wie schon erwähnt, die Durchläufe zuerst gemittelt. Die Vergleiche wurden für die Standardgeschwindigkeit 60 km/h, wie auch für alle Geschwindigkeiten zusammen gemacht. Für spätere Diskussionen wurde dann

nur die Standardgeschwindigkeit berücksichtigt, da die beiden anderen in erster Linie zur Analyse der Reibungs/Geschwindigkeits-Relation dienen.

Für die SFC Geräte ergab sich eine mittlere Korrelation von 0.863 bei 60 km/h und 0.868, wenn alle Geschwindigkeiten berücksichtigt wurden, dies vor allem aufgrund der grösseren Datenmenge.

Für die Schlupfmessungen ergab sich eine mittlere Korrelation von 0.834 bei 60 km/h und 0.856, wenn alle Geschwindigkeiten berücksichtigt wurden, dies vor allem aufgrund der grösseren Datenmenge. Die Schlupfprozente reichten von 14.5 bis 86%. Untersuchungen, ob Geräte mit gleichem Schlupf besser korrelierten, zeigten keine erkennbaren Tendenzen und Muster. Die tiefste Korrelation ergab sich zwischen dem SRM und dem Skiddometer mit 0.684. Die höchste zwischen dem Norsemeter mit dem SRM und dem schwedischen Skiddometer (0.935). Die tiefste durchschnittliche Korrelation mit anderen Geräten hatte der SRM mit 0.768, die höchste der schwedische Skiddometer (0.885). Anzumerken ist, dass die Kalibration für den SRM seit dem Experiment geändert wurde, die Resultate sind also nicht mehr unbedingt repräsentativ für den ETH-SRM.

Die Messungen für blockiertes Messrad wurden einerseits über alle Messgeräte und andererseits nach Reifen aufgeteilt (profillos und mit Längsrillen), analysiert.

damit ergaben sich folgende mittleren Korrelationen:

Schlupfgeschwindigkeit	Korrelation bei Berücksichtigung aller Reifenarten	Korrelation profillose Reifen	Korelation Reifen mit Längsrillen
Km/h	-	-	-
60	0.83	0.84	0.88
alle Geschw	0.79	0.84	0.86

*Tabelle 53: Zusammenfassung der wichtigsten Korrelationen von Geräten mit blockiertem Messrad*

Kommentar:

Wenn man nach Reifentyp trennt, ergaben sich somit recht gute Korrelationen.

Interessant ist auch, dass der Norsemeter mit 86% Schlupf gut mit den Blockmessungen korrelierte.

Für den Skiddometer ist anzumerken, dass die Streckenabschnitte relativ kurz waren, in Anbetracht der Tatsache, dass die Blockmessung manuell ausgelöst werden muss. Somit ist es nicht unbedingt erstaunlich, dass der Skiddometer relativ tiefe Korrelationen mit den anderen Geräten aufwies.

## 7.2 Vergleich der verschiedenen Gruppen

Die Vergleiche zwischen den unterschiedlichen Geräte wurden nicht für alle Geschwindigkeiten, sondern für die Standardgeschwindigkeit meist 60 km/h der einzelnen Geräte durchgeführt.

Die Seitenkraftgeräte und die Geräte mit konstantem Schlupf zeigten relativ gute Korrelationen. Es wurde ebenfalls zwischen glatten und gerillten Reifen unterschieden, es zeigten sich jedoch keine signifikanten Unterschiede.

Da die aktuellen Schlupfgeschwindigkeiten dieser Geräte ähnlich sind, durfte man eine relativ gute Korrelation erwarten.

Auch wegen der tiefen Schlupfgeschwindigkeit konnte man wenig Unterschied zwischen glatten und gerillten Reifen erwarten, was auch eintraf.

Nur bei hohen Schlupfgeschwindigkeiten hat die Makrotextur einen grösseren Einfluss und der Unterschied zwischen den Reifen wird grösser.

Der Vergleich der Geräte mit blockiertem Messrad oder 100% Schlupf mit den Geräten mit konstantem Schlupf wurde ebenfalls wieder getrennt nach Reifen dargestellt. Die Geräte zeigen bessere Korrelationen, wenn man nach Reifen unterscheidet. Der Effekt ist allerdings kleiner als beim Vergleich der Geräte mit blockiertem Messrad untereinander.

Der Vergleich zwischen den Seitenkraftmessern und den Messungen mit blockiertem Messrad zeigten tiefere Korrelationen als die beiden vorgängigen Vergleiche, waren aber höher als erwartet, handelt es sich doch um zwei Extreme der Schlupfgeschwindigkeit.

## 7.3 Vergleich von Geräten mit Messung der Reibungsspitze mit Texturmessungen

Der Vergleich der Seitenkraftmessungen mit den Pendelmessungen zeigt keine sehr hohen Korrelationen (0.649 bzw. 0.678). Die Korrelationen mit Makrotexturmessungen waren auch sehr schlecht, unterhalb von 0.25. Mit den Pendeln hatte man eine bessere Korrelation erwartet, die schlechte Korrelation mit den Makrotexturmessungen entsprach den Erwartungen.

Die Korrelationen mit den Spitzenreibungsmessungen zeigen keinen klaren Trend. Das hängt damit zusammen, dass die Verfahren, wie die Spitzenreibung gemessen wurde, bei allen teilnehmenden Geräten stark differierten. Zusätzlich war die Datenbasis für die

Hälfte der Geräte klein.

In diesen Vergleich miteinbezogen wurden die ABS Messungen. Sie sollten bei Schlupfgeschwindigkeiten unterhalb der Spitzenreibungsschlupfgeschwindigkeit messen im Gegensatz zu Schlupfgeschwindigkeiten über oder bei der Spitzenreibungsschlupfgeschwindigkeit. Dementsprechend ergaben sich auch relativ tiefe Korrelationen zwischen diesen Geräten.

Die Korrelationen der Messungen mit blockiertem Messrad sind ähnlich wie diejenigen der Seitenkraftmessungen und den Messungen mit konstantem Schlupf.

Die beste Korrelation im Vergleich mit den Texturmessungen ergab sich mit dem schweizerischen Pendel.

Die Messungen mit konstantem Schlupf ergaben etwas bessere Korrelationen mit beiden Pendeln. Im Hinblick auf die Makrotextur ergaben sich sogar schlechtere Korrelationen als mit den Seitenkraftmessungen. Der Vergleich mit den Spitzenreibungsmessern ergab ähnliche Resultate wie für die beiden anderen Gruppen und aus denselben Gründen.

#### 7.4 Zusammenfassung

Die besten Korrelationen der IVT-Geräte - ähnliche Messmethoden:

- SRM-Schlupf mit dem Norsemeter-Schlupf
- SRM-Block mit dem Norsemeter-wechselnder Schlupf
- Skiddometer-Schlupf mit dem schwedischen Skiddometer-Schlupf
- Skiddometer-Block mit dem Norsemeter-Maximum

Die besten Korrelationen der IVT-Geräte - verschiedene Messmethoden:

- SRM-Schlupf mit dem Norsemeter-wechselnder Schlupf
- SRM-Block mit dem SRM-Schlupf
- Skiddometer-Schlupf mit dem belgischen SCRIM

Skiddometer-Block mit dem französischen SCRIM

#### 7.5 Variabler Schlupf

Die Auswertungen zeigten den Wert von Messungen bei Spitzenreibung und erklären auch, warum die verschiedenen Spitzenreibungsmessungen der benutzten Geräte nicht gut übereinstimmen.

Für eine gegebene Fahrbahnoberfläche variiert die Spitzenreibung mit der Oberfläche und dem Messrad, aber auch mit dem Ober-

flächenzustand: nass, trocken, schneebedeckt etc.

Es zeigte sich, dass für dasselbe Oberflächen/Reifenpaar, die Spitze ebenfalls mit der Schlupfgeschwindigkeit variiert, immerhin ergab sich aber die Form einer Asymptote, die von Oberflächen/Reifenpaar abhängt.

8.6 Voraussage des Goldenen Wertes (GF60) mit einer Reibungsmessung

Zu den IVT-Geräten ist anzumerken, dass der SRM seither neu kalibriert wurde

Ergebnisse für IVT Geräte aus dem Versuch, wobei zu bemerken ist, dass für SRM und Skiddometer von einem Schlupf von 20% ausgegangen wurde, die Schlupfgeschwindigkeit wurde damit mit 12 km/h eingegeben, für die Pendel wurde die Schlupfgeschwindigkeit 10 km/h eingegeben.

Geräte	N	A	B	C	R
SRM-Block	42	0.022042	0.500253	0.082158	0.903
Skiddometer-Block	63	0.02634	0.504203	0.099195	0.895
SRM-Schlupf	46	0.141069	0.322557	0.07388	0.8305
Skiddometer-Schlupf	64	.029677	0.918477	-0.01362	0.9498
Pendel	62	0.043601	0.009531	0	0.913

*Tabelle 54: statistische Werte für die ETH-IVT Messgeräte am AIPCR-Experiment*

8.7 Voraussage des Goldenen Wertes (GF60) mit einer "Mikrotextur-" und einer Makrotexturmessung

In diesem Abschnitt werden zwei Makrotexturmessungen (MPD und MTD) mit sog. Ersatzmessungen für Mikrotextur (Reibungsmessungen bei tiefen Geschwindigkeiten) behandelt. Dazu wurden unter anderem die beiden Pendel (10 km/h Annahme und der Griptester bei 5 km/h) betrachtet.

Daraus ging unter anderem hervor, dass die Pendel bei einer kleineren Geschwindigkeit allenfalls die Mikrotextur besser umschreiben könnten.

Geräte	N	A	B	C	R
Pendel und MPD	62	0.043601	0.009531	0	0.913
Pendel und MTD	62	0.054077	0.009174	0	0.923

*Tabelle 55: statistische Werte des Pendels mit verschiedenen Texturmessungen*

Der Griptester korrelierte besser mit MPD, woraus man schliessen kann, dass eher konstante Messungen über grösseren Flächen eine bessere Messung ergeben.

Die Pendel korrelieren etwas besser mit MTD. Wie neuere Untersuchungen in Neuseeland zeigten, können Pendelmessungen relativ stark schwanken, evtl. wären also mehr Messpunkte pro Strecke zu empfehlen.

### 13.1.2 Schlusskommentar

Wie schon früher bemerkt, wurde das Experiment im Allgemeinen als Erfolg bezeichnet. Vor allem die Tatsache, dass kein spezielles Messverfahren bevorzugt wurde, sondern eine Harmonisierung angestrebt wurde, zeigte sich als Positivum.

Das zeigt sich nur schon daran, dass anschliessend ein ähnliches Experiment mit mobilen Ebenheitsmessern geplant wurde, das von den gemachten Erfahrungen profitieren wird.

Trotzdem blieb teilweise auch der Eindruck zurück, dass hier versucht wurde, etwas salopp ausgedrückt, Äpfel mit Orangen zu vergleichen. Der Nachweis, ob der IFI, wie vorgeschlagen, genügend sichere Daten liefert, ist dann auch noch ausstehend.

Der Versuch hat eine ausgezeichnete Datenbasis für vielfältige Analysen geliefert. Diese Grundlagen sollten nicht verloren gehen. Wie schon früher erwähnt, muss der IFI „unterhalten“ werden (Gerätedrift etc.). Ebenso müssen die Geräte regelmässig kalibriert werden, was ja durchaus auch im Sinne der Qualitätssicherung ist.

Ob die entsprechenden Regelungen auf internationaler Ebene „rechtzeitig“ eingeführt werden können, ist jedoch noch fraglich.

Dass ein internationaler Griffigkeitsindex auf einer kombinierten Griffigkeits- und Texturmessung beruhen sollte, wurde im Bericht verschiedentlich begründet. Dass das Modell aber beispielsweise auf offenporigen Belägen (noch) nicht anwendbar ist, weil hier ein Grossteil der Texturmesser nicht befriedigend eingesetzt werden können, ist ein Punkt der noch bereinigt werden muss.

Ein Vorteil des IFI ist, dass alle bisherigen Griffigkeitsmessverfahren beibehalten werden können und mit Hilfe einer Makrotexturmessung den IFI berechnen können. Damit können auch alte Datenbanken der einzelnen Gerätebetreiber beibehalten werden.

Wie gezeigt wurde, hat der Versuch nicht nur im Hinblick auf Griffigkeitsmessungen wichtige Grundlagen geschaffen, auch die Texturmessungen gaben wichtige Grundlagen für weitergehende Arbeiten in verschiedenen Normierungsgremien.

Ob und wann sich der IFI oder eine modifizierte Form davon in den internationalen Normierungsgremien durchsetzen wird, ist also zurzeit noch offen. Die weitergehende Forschungsarbeit in Belgien ist wichtig für die nächsten Schritte.

Für die nähere Zukunft können die folgenden Folgerungen gezogen werden:

- Die verschiedenen Institutionen werden ihre Griffigkeitsmessungen wie bis anhin weiterführen
- Die verschiedenen Institutionen können ihre Texturmessungen aufgrund des Versuches verbessern
- Texturmessungen werden im Zusammenhang mit Griffigkeitsmessungen zunehmend wichtiger. Tatsächlich werden in verschiedenen Ländern die Griffigkeitsmessungen unter Verkehr bereits in Kombination mit einer Makrotexturmessung durchgeführt.

Wie schon verschiedentlich erwähnt, nahm das IVT mit vier Geräten am Experiment teil: SRM (Schlupfmessung und blockiertes Messrad), Skiddometer (Schlupfmessung und blockiertes Messrad), Pendel und Ausflussmesser.

Das bedurfte eines ausserordentlichen Arbeitsaufwandes seitens der teilnehmenden Mess-equipe. Wie die Resultate im Bericht zeigen, kann nicht generell beurteilt werden, ob die Geräte gut, mittel oder schlecht abschnitten. Geht man von den erzielten Korrelationen aus, so „rangierten die“ Geräte je nach Analyse ganz unterschiedlich. Grundsätzlich kann folgendes angemerkt werden:

Der SRM war beim Experiment noch sehr neu. Kinderkrankheiten waren nicht auszuschliessen und aufgrund des Versuchs konnten auch zahlreiche Verbesserungen durchgeführt werden. Ob die beim Experiment gefundenen Umrechnungsfaktoren noch ihre Gültigkeit haben, konnte im Rahmen des Forschungsauftrages nicht abgeklärt abschliessend werden.

Mit dem Skiddometer konnten aufgrund des grossen Messaufwandes nicht immer die gewünschte Anzahl an Wiederholungsmessungen bei den einzelnen Geschwindigkeiten durchgeführt werden. Die Analyse in Kapitel 5.4, die sich mit den Unterschieden zwischen verschiedenen Durchgängen befasste, konnte somit nicht durchgeführt werden. Die verminderte Anzahl Fahrten und damit eine verminderte Anzahl an Vergleichsdaten mag auch die Korrelationen mit anderen Geräten beeinflusst haben. Zudem wird die Blockmessung beim Skiddometer manuell ausgelöst, das kann auf den relativ kurzen Sektionen einen Einfluss gehabt haben.

Wie der Bericht zeigte, wurden bei verschiedenen Geräten, die Schlupfmessungen durchführten, für die Analysen von einem Schlupf von 20% ausgegangen (der SRM hat rund 14%, der Skiddometer rund 16%). Inwieweit das die Qualität der Analysen beeinflusst hat, wird momentan untersucht.

Wie der Bericht zeigt, waren die Pendelmessungen ein wichtiges Element für verschiedene Abklärungen im Rahmen des Versuchs. Der Ausflussmesser mit seiner manuellen Zeitnahme erwies sich hingegen als nicht sensitiv genug für verschiedene Oberflächen.

Um den IFI zu erhalten, braucht man eine Texturmessung, wenn möglich eine Makrotexturmessung, welche die mittlere Profiltiefe ermittelt. Das IVT ist zurzeit nicht in der Lage eine solche Messung durchzuführen.

Für das IVT und die schweizerische Normierung ergaben sich die folgenden Schwerpunkte:

- Ablösung des Skiddometer durch den SRM
- Die bestehende Norm kann momentan weiterhin bestehen. Die Einführung eines IFI wird noch einige Zeit dauern und so wie der IFI im Augenblick konzipiert ist, steht es den Betreibern frei, ihre bisherigen Verfahren beizubehalten.
- Wie auch immer, die heutigen Grenzwerte und das IVT-Beurteilungs-Schema beruhen auf rund 280 Messungen auf Strassen, wie sie sich Ende der Siebziger Jahre präsentierten. In der Zwischenzeit hat sich das Belagsbild in der Schweiz geändert (z.B. neue Typen wie offenporige Beläge). Ein neues Schema zu erarbeiten, das vermehrt auf den heutigen Strassenverhältnissen beruht, wäre sicherlich ein sinnvolles Ziel für die Zukunft. Die heutige Norm schreibt Messwerte für Messungen mit blockiertem Messrad vor. Heute verfügt aber eine grosse Zahl von Fahrzeugen über ABS-Systeme. Es wäre deshalb zu überlegen, ob eine neue Norm und ein neues Beurteilungsschema zusätzlich nicht auch ABS-Werte enthalten sollten. Gerade in Bezug auf Abklärungen im Zusammenhang mit Unfällen könnte das wichtig und nützlich sein.
- Mobile Textur- und Ebenheitsmessenrichtungen werden in Zukunft immer wichtiger. Sei es ganz allgemein in Bezug auf das Management der Strassenerhaltung oder im Zusammenhang mit der Beurteilung der Griffigkeit. So sind etwa zahlreiche SCRIM-Geräte mit entsprechenden Messbalken ausgerüstet. es ist also auch denkbar, den SRM ähnlich aufzurüsten.