



# **Zusammenhang Textur und Griffigkeit von Fahrbahnen und Einflüsse auf die Lärmemission**

**Corrélation entre la texture et l'adhérence des chaussées et  
influences sur l'émission de bruit**

**Correlation between road texture and skid resistance of  
pavement and influences on noise**

**Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme IVT  
Prof. em. H.P. Lindenmann, ETH Zürich  
Dr. F. Schiffmann, IMC GmbH, vormals IVT  
F. Baumgartner, SNZ Ingenieure und Planer AG, vormals IVT**

**SACR AG, Zürich  
E. Kälin**

**Infralab SA, Lausanne  
R. Braber**

**Forschungsprojekt VSS 2009/703 auf Antrag des Schweizerischen  
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

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

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

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

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

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

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

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

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



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# **Zusammenhang Textur und Griffigkeit von Fahrbahnen und Einflüsse auf die Lärmemission**

**Corrélation entre la texture et l'adhérence des chaussées et  
influences sur l'émission de bruit**

**Correlation between road texture and skid resistance of  
pavement and influences on noise**

Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme IVT  
Prof. em. H.P. Lindenmann, ETH Zürich  
Dr. F. Schiffmann, IMC GmbH, vormals IVT  
F. Baumgartner, SNZ Ingenieure und Planer AG, vormals IVT

SACR AG, Zürich  
E. Kälin

Infralab SA, Lausanne  
R. Braber

**Forschungsprojekt VSS 2009/703 auf Antrag des Schweizerischen  
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

## Impressum

### Forschungsstelle und Projektteam

#### Projektleitung

Prof. em. H.P. Lindenmann,  
Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT) der ETH Zürich

#### Mitglieder

Dr. F. Schiffmann, IMC GmbH, vormals IVT  
F. Baumgartner, SNZ Ingenieure und Planer AG, vormals IVT  
Erhard Kälin, SACR AG  
Robert Braber, Infralab SA

### Federführende Fachkommission

Fachkommission 7: Erhaltungsmanagement (bis 5.9.2014)  
Fachkommission 5: Bau- und Geotechnik (ab 5.9.2014)

### Begleitkommission

#### Präsident

Luzia Seiler, ASTRA

#### Mitglieder

Hans Bär, bärconsulting, Chur  
Hans-Peter Beyeler, ASTRA  
Markus Grieder, ehemals TBA Basel Landschaft, Rünenberg  
Kurt Heutschi, EMPA  
Martin Horat, TBA Stadt Zürich  
Christophe Rohr, SdR Lausanne  
Gregor Schgvanin, BAFU

### Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen und Verkehrsfachleute (VSS)

### Bezugsquelle

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

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                                                   |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Impressum .....</b>                                                                            | <b>4</b>  |
| <b>Zusammenfassung .....</b>                                                                      | <b>7</b>  |
| <b>Résumé .....</b>                                                                               | <b>9</b>  |
| <b>Summary .....</b>                                                                              | <b>11</b> |
| <br>                                                                                              |           |
| <b>1 Einleitung .....</b>                                                                         | <b>13</b> |
| 1.1 Ausgangslage .....                                                                            | 13        |
| 1.2 Fragestellungen .....                                                                         | 13        |
| 1.3 Zielsetzungen .....                                                                           | 14        |
| 1.4 Auftrag und Beteiligte .....                                                                  | 14        |
| 1.5 Grundlagen .....                                                                              | 15        |
| 1.5.1 Frühere Erhebungen und Untersuchungen zum Fahrbahnzustand auf den<br>Nationalstrassen ..... | 15        |
| 1.5.2 Umfassende Erhebungen im Jahre 2009 .....                                                   | 16        |
| 1.5.3 Datengrundlagen .....                                                                       | 16        |
| 1.6 Erhebungs- und Auswertegrössen .....                                                          | 17        |
| 1.6.1 Textur .....                                                                                | 17        |
| 1.6.2 Griffigkeit .....                                                                           | 18        |
| 1.6.3 Lärmemission .....                                                                          | 19        |
| 1.6.4 Häufigkeiten der Deckschichtarten und Altersstruktur der Deckschichtgruppen .....           | 21        |
| 1.6.5 Zeitliche Entwicklung der Güte der Fahrbahneigenschaften .....                              | 21        |
| 1.7 Hinweise aus der Literatur .....                                                              | 22        |
| 1.7.1 Textur und Griffigkeit .....                                                                | 22        |
| 1.7.2 Textur und Lärmemissionen .....                                                             | 23        |
| 1.7.3 Griffigkeit und Lärmemissionen .....                                                        | 24        |
| <br>                                                                                              |           |
| <b>2 Methodik .....</b>                                                                           | <b>25</b> |
| 2.1 Auswertungen Einzelgrössen .....                                                              | 25        |
| 2.1.1 Datensätze .....                                                                            | 25        |
| 2.1.2 Bildung von Deckschichtgruppen .....                                                        | 25        |
| 2.1.3 Statistische Datenanalyse der Einzelgrössen .....                                           | 25        |
| 2.2 Analysen der Zusammenhänge .....                                                              | 26        |
| 2.2.1 Grundsatz .....                                                                             | 26        |
| 2.2.2 Regressionsanalyse .....                                                                    | 26        |
| 2.2.3 Pearson-Korrelation .....                                                                   | 27        |
| 2.2.4 Signifikanz einer Korrelation .....                                                         | 28        |
| <br>                                                                                              |           |
| <b>3 Ergebnisse .....</b>                                                                         | <b>29</b> |
| 3.1 Vorbemerkungen .....                                                                          | 29        |
| 3.1.1 Erkenntnisse aus den Pilotuntersuchungen (z.T. auch [30]) .....                             | 29        |
| 3.1.2 Auswertung Hauptdatensatz .....                                                             | 30        |
| 3.2 Auswertungen Einzelgrössen .....                                                              | 30        |
| 3.2.1 Deckschichten und Deckschichtgruppen .....                                                  | 30        |
| 3.2.2 Alter der Deckschichten für die einzelnen Deckschichtgruppen .....                          | 31        |
| 3.2.3 Verteilung der Zustandsdaten Textur .....                                                   | 33        |
| 3.2.4 Verteilung der Zustandsdaten Griffigkeit .....                                              | 35        |
| 3.2.5 Verteilung der Zustandsdaten Lärmemissionen .....                                           | 36        |
| 3.2.6 Prüfung der Zustandswerte auf Normalverteilung .....                                        | 38        |
| 3.3 Analysen der Zusammenhänge .....                                                              | 38        |
| 3.3.1 Korrelationen Hauptdatensatz .....                                                          | 38        |
| 3.3.2 Zusammenhänge bei den einzelnen Deckschichtgruppen .....                                    | 40        |
| 3.3.3 Texturprofiltiefe, Griffigkeit und Lärmemission und Alter der Deckschichten .....           | 49        |
| 3.3.4 Zusammenhänge in Abhängigkeit der Altersstruktur der Deckschichtgruppe .....                | 50        |

|          |                                                                     |            |
|----------|---------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4</b> | <b>Erkenntnisse .....</b>                                           | <b>52</b>  |
| 4.1      | Erkenntnisse aus den Auswertungen und Analysen .....                | 52         |
| <b>5</b> | <b>Folgerungen und Empfehlungen .....</b>                           | <b>55</b>  |
| 5.1      | Vorbemerkungen .....                                                | 55         |
| 5.2      | Folgerungen und Empfehlungen .....                                  | 55         |
|          | <b>Anhänge.....</b>                                                 | <b>57</b>  |
|          | <b>Literaturverzeichnis.....</b>                                    | <b>108</b> |
|          | <b>Projektabschluss .....</b>                                       | <b>110</b> |
|          | <b>Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen.....</b> | <b>113</b> |

## Zusammenfassung

Zur situativen Beurteilung der Qualität von Fahrbahnoberflächeneigenschaften und der damit verbundenen Belagswahl bei Erhaltungsmassnahmen sind Kenntnisse der Zusammenhänge zwischen der Textur, der Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche und deren Auswirkungen auf die Lärmemissionen grundlegende Voraussetzung.

Weltweit werden seit Jahren die Zusammenhänge zwischen der Textur und der Griffigkeit, oft auch als Rauheit bezeichnet, von verschiedenen Mischgutmixturen für Fahrbahnbeläge untersucht und in der Literatur darüber berichtet. Obwohl qualitativ die Zusammenhänge zwischen der Belagstextur und der Griffigkeit via die Einflüsse von Makro- und Mikrotextur der Fahrbahnoberfläche seit vielen Jahren bekannt sind und beschrieben wurden, fehlen quantitative Angaben weitgehend.

Von zentralen Interesse im Rahmen diese Forschungsvorhabens war einerseits der Zusammenhang Textur und Griffigkeit zwecks Ersatz der Griffigkeitsmessung durch Texturmessung und andererseits der Zusammenhang Textur und Lärmemission (Rollgeräusch am Belag) zur Beurteilung der Belagswahl je nach örtlichen Bedürfnissen des Lärmschutzes und unter Beachtung unterschiedlicher Lebensdauern bestimmter Beläge.

Als Datengrundlagen für die Durchführung der Forschungsarbeit dienten die Erhebungen und Auswertungen der im Jahre 2009 durch das Bundesamt für Strassen (ASTRA) durchgeführten, dritten Zustandserhebung und –bewertung der Schweizerischen Nationalstrassen. Bei dieser dritten Erhebung wurden nebst den Oberflächenschäden, der Längs- und Querebenheit, der Griffigkeit zusätzlich die Belagstextur und die Lärmemissionen netzweit für alle Nationalstrassen inkl. Rampen und Anschlüsse erfasst und auf 100m-Fahrstreifenintervalle ausgewertet. Die örtlich vorliegenden Belagsarten der Fahrbahnoberflächen stammen aus einem ASTRA-internen Belagskataster, worin nebst der Deckschichtart auch das Einbaujahr der zurzeit vorhandenen Schicht erkennbar ist. Als Messgeräte kamen für die Erhebung der Längs- und Querebenheit wiederum der ARAN, für die Griffigkeit der SKM, für die Texturmessung neu ein Profilometer-Messgerät und für die Lärmemissionen ein CPX-Messsystem zum Einsatz.

Aufgrund der grossen Datensätze und der vielfältigen Einflüsse an den verschiedensten Orten der Nationalstrassen wie Alter der Deckschichten, Verschiedenartigkeit der Deckschichten, unterschiedlichste Nutzungen der Strassenabschnitte, unterschiedlichste Witterungseinflüsse in den verschiedenen Regionen der Schweiz sowie unterschiedlichste Erhebungsbedingungen für Textur, Griffigkeit und Lärmemissionen musste erwartet werden, dass sich die einzelnen, zu untersuchenden Zusammenhänge nicht sehr deutlich ausgeprägt zeigen würden. Dass auch bei Aufspaltung der Gesamtdatensätze nach Deckschichtgruppen und nach Altersgruppen (Liegzeit der Deckschicht) sich ebenfalls nur ganz wenige Trends bei den Zusammenhängen nachweisen liessen, war indessen eher erstaunlich und unerwartet. Dennoch liessen sich einige interessante neue und zum Teil bestätigende Erkenntnisse gewinnen.

Der in der Literatur festgestellte, allerdings mehrheitlich qualitativ beschriebene, Zusammenhang zwischen der Griffigkeit und der Textur (Makrotextur), liess sich im Rahmen dieser Untersuchung teilweise ebenfalls bestätigen. Danach kann angenommen werden, dass die Griffigkeit bei zunehmender Texturprofilltiefe (Makrotextur) zunimmt. Die Bestätigung konnte quantitativ aber nur sehr schwach und damit sehr unsicher aufgrund schwacher Korrelationen nachgewiesen werden.

Aus der vorliegenden Untersuchung ist der interessante, in der Literatur selten beschriebene, direkte Zusammenhang zwischen den Lärmemissionen und der Griffigkeit sowohl bei Gesamtdatensatz als auch bei verschiedenen Teildatensätzen als zumindest einheitlich, wenn auch schwach und damit unsicher, mehrfach erkannt worden. Danach nehmen die Lärmemissionen mit zunehmender Griffigkeit ab.

Der in der Literatur häufig beschriebene Zusammenhang zwischen den Lärmemissionen und der Textur konnte im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nur teilweise und nur qualitativ erkannt werden, weil nur sehr schwache Korrelationen festgestellt wurden und weil sich bei den einzelnen Deckschichtgruppen teilweise unplausible und unerklärliche Abhängigkeiten zeigten.

Eher erstaunlich erweist sich die Feststellung, dass sowohl die Griffigkeit als auch die Textur in 45 Jahren über alle Deckschichten betrachtet sich nur relativ wenig verschlechtern. Damit direkt verbunden dürfte auch die geringe Verschlechterung der Lärmemissionen über die grosse Zeitspanne stehen. Diese Erkenntnisse müssen auch im Lichte der eingangs erwähnten Umstände betrachtet werden.

Aufgrund der Erkenntnisse hinsichtlich des schwachen und unsicheren Zusammenhangs Griffigkeit in Abhängigkeit der Textur (Makrotextur) kann die Texturprofilmessung bei bitumenhaltigen Deckschichten kein vollständiger Ersatz für die Griffigkeitsmessung darstellen. Die Texturmessung als Ersatz für Griffigkeitsmessungen bei Zement-betonbelägen und -deckschichten ist jedoch zu prüfen.

Aufgrund der sehr schwachen Korrelationen und damit sehr unsicheren Zusammenhängen sowie der vorhandenen Widersprüchlichkeiten lassen sich anhand der Ergebnisse keine generellen Aussagen zum Lärmverhalten via Textureigenschaften (Makrotextur) machen.

Die zum Teil widersprüchlichen Ergebnisse beim Zusammenhang Griffigkeit und Textur zwischen den Deckschichtgruppen AC, SMA und den Deckschichtgruppen ACMR und PA bedürfen weiterer Erklärungen und allfälliger Untersuchungen.

Aufgrund der Erkenntnisse wäre zu prüfen, ob partielle Auswertungen mit homogeneren Teildatensätzen zielführender zu quantitativ stärkeren und sichereren Aussagen führen könnten.

## Résumé

Afin de pouvoir évaluer, en fonction de la situation, la qualité des caractéristiques des surfaces de roulement ainsi que le choix de revêtement y relatif lors de mesures d'entretien, il est indispensable de connaître au préalable les corrélations entre la texture, l'adhérence des surfaces de roulement et leurs répercussions sur les émissions de bruit.

Depuis des années, les corrélations entre la texture et l'adhérence – souvent aussi appelée «rugosité» – des mélanges d'enrobés pour les revêtements de chaussées font l'objet d'études à l'échelle internationale et sont rapportées dans la littérature. Or, si sur le plan qualitatif les liens entre la texture du revêtement et l'adhérence via les influences de macrotextures et microtextures des surfaces de roulement sont connus depuis longtemps et ont été décrits, des données quantitatives font encore largement défaut.

Ce projet de recherche s'est concentré sur deux objectifs primordiaux. D'une part, il visait à analyser la corrélation entre la texture et l'adhérence afin de remplacer la mesure de l'adhérence par la mesure de la texture. D'autre part, il s'agissait d'étudier le lien entre la texture et l'émission de bruit (bruit de roulement sur le revêtement) afin d'évaluer le choix de revêtement en fonction des besoins locaux de la protection contre le bruit et en tenant compte des différentes durées de vie de revêtements donnés.

Les relevés et leur exploitation dans le cadre du relevé et de l'évaluation de l'état des routes nationales suisses, effectués pour la troisième fois par l'Office fédéral des routes (OFROU) en 2009, ont fourni les bases des données pour ce travail de recherches. Lors de ce troisième relevé, en complément des dégradations de surface, de la planéité longitudinale et transversale et de l'adhérence, la texture du revêtement et les émissions de bruit sur tout le réseau de routes nationales (rampes et jonctions comprises) ont été enregistrées et évaluées sur des intervalles de voie de circulation de 100 m. Les types de revêtement des surfaces de roulement existants localement sont issus d'un cadastre des revêtements interne à l'OFROU faisant état du type de couche de roulement et de l'année de mise en œuvre de la couche existant actuellement. S'agissant des appareils de mesure, nous avons utilisé à nouveau l'ARAN pour le relevé de la planéité longitudinale et transversale, le SKM pour l'adhérence et, pour la première fois, un profilomètre afin de mesurer les textures. Un système de mesure CPX a été mis en application pour les émissions de bruit.

Les jeux de données sont nombreux, les influences aux très divers endroits des routes nationales varient, les couches de roulement ont un certain âge et sont diverses, les utilisations des tronçons de route diffèrent beaucoup, les influences météorologiques dans les différentes régions de la Suisse sont des plus variées et les conditions de relevé pour la texture, l'adhérence et les émissions de bruit sont très distinctes. Il fallait dès lors s'attendre à ce que les corrélations analysées ne soient pas très nettement marquées. En revanche, il a été assez surprenant et inattendu de constater également que très peu de tendances se sont révélées, même en séparant l'ensemble des données par groupes de couches de roulement et par groupes d'âges (durée de service de la couche de roulement). Quelques nouveaux enseignements intéressants et partiellement concluants ont toutefois pu être obtenus.

La corrélation entre l'adhérence et la texture (macrotexture), qui a été mentionnée dans la littérature et assez largement décrite sur le plan qualitatif, a aussi été confirmée en partie dans le cadre de cette recherche. L'on peut alors supposer que l'adhérence augmente avec la profondeur du profil de texture (macrotexture). Cela a pu être démontré du point de vue quantitatif mais que très faiblement et ainsi avec très peu de certitude, les corrélations étant fragiles.

Lors de la présente étude, l'intéressante corrélation directe entre les émissions de bruit et l'adhérence – rarement décrite dans la littérature – pour l'ensemble des données, tout comme pour différentes données partielles, a été reconnue à plusieurs reprises comme

étant au moins homogène. Elle est cependant faible et par conséquent incertaine. Il en résulte que les émissions de bruit baissent à mesure que l'adhérence augmente.

Dans le cadre de la présente recherche, le rapport entre les émissions de bruit et la texture, souvent décrit dans la littérature, n'a pu être démontré qu'en partie et uniquement du point de vue qualitatif. En effet, les corrélations constatées ne sont que très faibles et des dépendances parfois improbables et inexplicables pour certains groupes de couches de roulement sont apparues.

Il a été plutôt étonnant de constater que l'adhérence, tout comme la texture, toutes couches de roulement confondues, ne se sont que relativement peu dégradées en 45 ans. La faible détérioration des émissions de bruit sur cette grande durée pourrait également y être directement liée. Ces enseignements doivent aussi être considérés à la lumière des circonstances mentionnées plus haut.

Ayant constaté le lien faible et incertain de l'adhérence avec la texture (macrotexture), la mesure de profils de textures pour les couches de roulement bitumineuses ne peut pas représenter un substitut total à la mesure de l'adhérence. Il faut cependant examiner le remplacement des mesures de l'adhérence par la mesure de textures pour les revêtements et couches de roulement en béton de ciment.

Etant donné les corrélations très fragiles et les rapports tout aussi peu certains qui en découlent, ainsi que les contradictions existantes, les résultats ne permettent pas d'énoncer des conclusions générales sur le comportement lié au bruit par le biais de caractéristiques de textures (macrotexture).

Certains résultats contradictoires sur le rapport de l'adhérence avec la texture entre les groupes de couches de roulement AC et SMA ainsi que les groupes de couches de roulement ACMR et PA doivent faire l'objet d'explications et éventuellement d'analyses complémentaires.

Au vu de ces enseignements, il faudrait examiner si en exploitant en partie des données partielles plus homogènes, l'on pouvait aboutir de manière plus ciblée à des conclusions solides plus nombreuses.

## Summary

In order to assess the quality of pavement surface characteristics for maintenance measures and type of surface layer it is necessary to recognize the correlations between texture, skid resistance of pavement surface and their impact on noise emissions.

International literature shows a variety of studies which describe findings regarding correlation between the pavement surface texture and skid resistance - often called "roughness" - of different types of pavement surface layers. Although the relationship between surface texture and skid resistance via influences from macro-textures and micro-textures have been known and described qualitatively, a quantitative determination is still not available.

This research project has focused on two main goals. The first goal was the analysis of correlation between texture and skid resistance to replace measurement of skid resistance by texture measurement. The second goal was to study the relationship between texture and tire-noise emission. This should enable to validate pavement surface layers regarding their tire-noise emission and durability.

The basis for this research is provided by the third pavement characteristics condition survey and assessment of Swiss national highway network from the Federal Roads Office (FEDRO) in 2009. This third survey included surface damage, longitudinal and transverse evenness, skid resistance as well as mean profile depths (macro-texture) and noise emission. The results consists of different aggregated datasets for each measured pavement surface characteristic in a separate raster of 100 m sections of all highways and highway ramps and access sections. Additionally, a dataset for all pavement layers including the age of the layer was provided by FEDRO. The survey was conducted with different measuring systems, such as ARAN for evenness and surface damage, SKM measuring system for skid resistance, laser profilometer for macro-texture and CPX measurement system for noise emission.

A weak relationship between different pavement surface characteristics were expectable, due to the large and inhomogeneous dataset and various influences (e.g. age and type of surface layer, different relevance of sections, different climate condition subject to geographical regions in Switzerland, different weather condition during data survey). However, it is surprising that - after splitting the dataset into different types of pavement surface layers and grouping with respect to the age - no strong correlation within the data could be found. Nevertheless, some new interesting findings have been obtained.

A weak correlation between skid resistance and texture (macro-texture) could be found in this research as well. It is mostly qualitatively described in literature that skid resistance increases with increasing mean profile depths (macro-texture).

The correlation between noise emissions and skid resistance – rarely described in the literature – could be found for dataset in total as well as for different parts of it. With this correlation the noise emissions decrease with increasing skid resistance. However, it is a weak correlation.

A correlation between noise emissions and texture, as it is often described in literature, was found. Indeed, the correlations were very small and at certain groups of pavement surface layers sometimes with improbable and inexplicable dependencies.

It was rather surprising that the deterioration of skid resistance as well as texture was relatively small within a period of 45 years. This small decrease of noise emission within the time period should be also associated with the inhomogeneous dataset. These findings should be regarded as weak due the mentioned data quality and various influences.

Measuring the pavement surface texture depth cannot be a total substitute for the measurement of skid resistance on asphalt pavement, because a weak and uncertain correlation between skid resistance and pavement surface texture has been found. However, the measurement of texture depth should be verified for replacing measurements of skid resistance on cement concrete pavement.

The results do not allow general conclusions about tire-pavement noise from pavement surface texture characteristics (macro-texture) due to weak correlations and contradictions.

Further analysis and investigation is needed to explain some contradictory results of correlation between skid resistance and pavement surface texture of surface course AC compared to SMA as well as surface course ACMR compared to PA.

It should be verified if partial analysis with more homogenous subsets of data could lead to stronger correlations and more solid conclusions.

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage

Zur situativen Beurteilung der Qualität von Fahrbahnoberflächeneigenschaften und der damit verbundenen Belagswahl bei Erhaltungsmassnahmen sind Kenntnisse der Zusammenhänge zwischen der Textur, der Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche und deren Auswirkungen auf die Lärmemissionen grundlegende Voraussetzung.

Während für die Zustandsmerkmale Oberflächenschäden, Längs- und Querebenheit und Griffigkeit sowohl separate und auch indexierte Bewertungsmassstäbe für die Qualität in den entsprechenden VSS-Normen vorliegen, fehlen diese zurzeit für die Textur. Die Bewertungsmassstäbe für Lärmimmissionen des Verkehrs sind in der Lärmschutzverordnung unter Einschluss von Grenzwerten definiert und festgelegt. Die Einflüsse verschiedener Belagsarten auf den Rollgeräuschanteil der Emission werden durch pauschale Zu- resp. Abschläge bei der Ermittlung der Emission berücksichtigt.

Weltweit werden seit Jahren die Zusammenhänge zwischen der Textur und der Griffigkeit, oft auch als Rauheit bezeichnet, von verschiedenen Mischgutmixturen für Fahrbahnbeläge untersucht und in der Literatur darüber berichtet. Obwohl qualitativ die Zusammenhänge zwischen der Belagstextur und der Griffigkeit via die Einflüsse von Makro- und Mikrotextur der Fahrbahnoberfläche seit vielen Jahren bekannt sind und beschrieben wurden, fehlen quantitative Angaben weitgehend. Ein quantitativer Zusammenhang zwischen der Textur und der Griffigkeit lässt sich immerhin theoretisch aufgrund der Angaben zur Makrotextur via mittlere Profiltiefe und Performanceindex und Fahrbahngriffigkeit via Seitenreibungswert und Performanceindex aufgrund der Angaben im COST354 Final Report herstellen.

Allerdings basiert dieser Zusammenhang nicht auf der gleichzeitigen Messung der beiden Grössen Makrotextur und Griffigkeit und kann lediglich einen Hinweis geben. Es erscheint grundsätzlich schwierig einen Zusammenhang zwischen Textur und Griffigkeit herzustellen, da die Makro- und Mikrotextur mit verschiedenen Messmethoden erhoben werden und vom Oberflächenzustand (nass, verschmutzt) und von den Materialkomponenten des für den Belag verwendeten Mischgutes abhängig sind.

Von zentralen Interesse im Rahmen diese Forschungsvorhabens ist einerseits der Zusammenhang Textur und Griffigkeit zwecks Ersatz der Griffigkeitsmessung durch Texturmessung und andererseits der Zusammenhang Textur und Lärmemission (Rollgeräusch am Belag) zur Beurteilung der Belagswahl je nach örtlichen Bedürfnissen des Lärmschutzes und unter Beachtung unterschiedlicher Lebensdauern bestimmter Beläge.

## 1.2 Fragestellungen

Als für die konkrete, praktische Belagswahl mit entscheidenden Beurteilungsgrundlagen gelten die Antworten auf die beiden folgenden zentralen Fragestellungen:

- Ist es möglich, die Griffigkeitsmessungen durch Texturmessungen zu ersetzen?
- Sind aufgrund von Ergebnissen aus Texturmessungen generelle Aussagen zum Lärmverhalten von Deckschichten möglich?

Für die Beantwortung dieser Fragen sind quantitative Kenntnisse der drei folgenden Zusammenhänge erforderlich:

- Zusammenhang zwischen der Griffigkeit und der Belagstextur von Fahrbahnbelägen
- Zusammenhang zwischen den Lärmemissionen (Rollgeräusch) und der Griffigkeit
- Zusammenhang zwischen den Lärmimmissionen und der Belagstextur

Diese Zusammenhänge sind redundant und sollen aus den Zustandserhebungen der Messungen der Grössen Griffigkeit (Seitenreibungsbeiwert), Textur (Mittlere Profiltiefe) und dem Rollgeräusch (CPX) auf den Schweizer Nationalstrassen im Jahr 2009 gesucht resp. ermittelt werden. Für die Interpretation und Beurteilung der Zusammenhänge sind die örtlich vorhandenen Kenntnisse bzgl. vorhandener Belagsart und Belagsalter von Bedeutung. Dazu wird der für die Nationalstrassen vorliegende Belagskataster des ASTRA verwendet. Zur örtlichen Identifikation sämtlicher Daten wird das räumliche Basisbezugssystem der Nationalstrassen (RBBS) eingesetzt.

### 1.3 Zielsetzungen

Gemäss dem bewilligten Forschungsgesuch und dem Forschungsauftrag waren bei der vorliegenden Forschungsarbeit die nachstehenden Ziele zu verfolgen:

- Erkennen von quantifizierten Zusammenhängen zwischen der Belagstextur und der Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen verschiedener Beläge.
- Analyse der Einflüsse und Auswirkungen von Veränderungen der Textur (und der Griffigkeit) auf die Lärmemissionen.
- Ableitung von Grundlagen für die Bewertung der Textur als allfälliges weiteres Zustandsmerkmal zur Gesamtbewertung von Fahrbahnzuständen.

Die dritte Zielsetzung war vor allem im Lichte der Fragestellung „kann ein Zusammenhang zwischen Textur und Griffigkeit so erkannt werden, dass die Erhebung der Textur als Ersatz für die Messung der Griffigkeit für die Zustandsbewertung der Fahrbahnoberfläche verwendet werden kann“, von besonderer Bedeutung.

### 1.4 Auftrag und Beteiligte

Nach Prüfung des VSS - Forschungsgesuches vom 23.11.2009 hat das Bundesamt für Strassen (ASTRA) folgendes beschlossen:

- Das Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT) der ETH Zürich wird in Zusammenarbeit mit den Firmen SACR, Zürich und Infralab SA, Lausanne mit der Durchführung des Projektes „Zusammenhang Textur und Griffigkeit von Fahrbahnen und Einfluss auf die Lärmemission“ beauftragt.
- Projektleiter: Prof. H. P. Lindenmann
- Als begleitende Kommission für diesen Forschungsauftrag wird die VSS – EK 7.11 „Eigenschaften der Fahrbahnoberflächen“ bezeichnet.  
Präsidentin: Frau Luzia Seiler
- Die Kosten dieser Forschungsarbeit sind auf CHF 140'800.- veranschlagt. Es wird ein Beitrag von 100 %, höchstens aber CHF 140'800.- gewährt. Dieses Projekt ist nicht mehrwertsteuerpflichtig. Die Stundenansätze sind für die ganze Vertragsdauer fest und nicht teuerungsbedingt.

Die Auftragserteilung erfolgte am 29. Dezember 2009. Die Durchführung des Forschungsauftrages gestaltete sich infolge verschiedener Umstände in Bezug auf die an der Forschung Beteiligten leicht anders als ursprünglich geplant.

Grundsätzlich konnte der Zeitplan infolge verschiedener personeller Veränderungen von Anstellungen der ehemals für die Durchführung des Forschungsauftrages vorgesehenen Beteiligten nicht eingehalten werden. Es betraf dies:

- Emeritierung von Prof. H. P. Lindenmann per 31.7.2011 an der ETH Zürich
- Ausscheiden von Herr Alain Jacot bei der Firma SACR, Stellenwechsel zum TBA Kt. Zürich
- Ausscheiden von Herr Frank Schiffmann beim IVT, Stellenwechsel zur Firma IMC, Zürich
- Ausscheiden von Frau Franziska Baumgartner am IVT, Stellenwechsel zu SNZ, Zürich
- Verzögerung bei der Bereitstellung und Lieferung des Pilotdatensatzes ASTRA ans IVT;
- Bereitstellung und Lieferung des Pilotdatensatzes für die Auswertungen: 28.10.2010
- Bereitstellung und Lieferung des Hauptdatensatzes für die Auswertungen: 14.09.2011

Diese Umstände führten dazu, dass die Forschungsarbeit zur Hauptsache, namentlich die Bearbeitung des grossen Datensatzes und die entsprechenden Auswertungen und Analysen, unter bleibender Leitung von Prof. Lindenmann in Zusammenarbeit mit Frau Baumgartner und Herrn Schiffmann erfolgen musste. Obgleich den zeitlichen Verzögerungen gelang es die Forschungsarbeit gemäss den Zielsetzungen fachlich ohne Einschränkungen durchzuführen.

## 1.5 Grundlagen

### 1.5.1 Frühere Erhebungen und Untersuchungen zum Fahrbahnzustand auf den Nationalstrassen

In den Jahren 2000 bis 2002 wurde die erste gesamtschweizerisch, netzweite Zustandserfassung und – Bewertung der Fahrbahnen der Nationalstrassen ZEB-NS des Bundesamtes für Strassen (ASTRA) unter Leitung des Institutes für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT) durchgeführt. Dabei wurden die Oberflächeneigenschaften Oberflächenschäden, Längs- und Querebenheit, Griffigkeit und das Unfallgeschehen von fünf Jahren erhoben und ausgewertet. Zudem erfolgten einige Stichprobenmessungen zur Tragfähigkeit des Oberbaus an ausgewählten Strassenquerschnitten [1].

Die Erhebungen und Auswertungen wurden gemäss den entsprechenden SN-Normen für die Visuelle Zustandserfassung SN 640 925b [2], der Längs- und Querebenheit SN 640 520 [3] und 640 521 [4], der Griffigkeit SN 640 510 [5] und SN 640 511(2009) [6] sowie der SN 640 016 [8] für die Auswertung des Unfallgeschehens durchgeführt. Als Messsysteme kamen für die Längs- und Querebenheit der ARGUS, für die Griffigkeit der SCRIM zum Einsatz. Die Stichprobenmessungen der Tragfähigkeit wurden mit einem FWD durchgeführt.

Im Jahre 2005 wurde eine weitere netzweite Erhebung und Untersuchung zum Fahrbahnzustand der Nationalstrassen durchgeführt, allerdings nur zu den Oberflächeneigenschaften Oberflächenschäden (visuell), Längs- und Querebenheit (ARAN). Die Ergebnisse wurden nicht veröffentlicht.

### 1.5.2 Umfassende Erhebungen im Jahre 2009

Im Jahre 2009 wurde die dritte Zustandserfassung und -bewertung der schweizerischen Nationalstrassen durch das ASTRA durchgeführt (ZEBNS09). Bei dieser dritten Erhebung wurden nebst den Oberflächenschäden, der Längs- und Querebenheit, der Griffigkeit zusätzlich die Belagstextur und die Lärmemissionen netzweit für alle Nationalstrassen inkl. Rampen und Anschlüsse erfasst und gemäss SN 640 510b ausgewertet. Hingegen wurde auf eine Untersuchung zum Unfallgeschehen verzichtet. Die örtlich vorliegenden Belagsarten der Fahrbahnoberflächen stammen aus einem ASTRA-internen Belagskataster. Die Auswertungen erfolgten wiederum nach den entsprechenden SN-Normen. Als Messgeräte kamen für die Erhebung der Längs- und Querebenheit wiederum der ARAN, für die Griffigkeit der SKM, für die Texturmessung neu ein Profilometer-Messgerät und für die Lärmemissionen ein CPX-Messsystem zum Einsatz. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden noch nicht veröffentlicht.

Für die vorliegende Forschungsarbeit Zusammenhang Textur und Griffigkeit von Fahrbahnen und Einflüsse auf die Lärmemission waren die Erhebungen zur Textur, Griffigkeit, Lärmemission und Belagsart relevant und wurden den Forschungsstellen durch das ASTRA zur Verfügung gestellt.

### 1.5.3 Datengrundlagen

Grundsätzlich standen von den Gesamterhebungen 2009 die für diese Untersuchung relevanten Daten zur Belagstextur, zur Griffigkeit und zu den Lärmemissionen des gesamten Nationalstrassennetzes (soweit erhoben) zur Verfügung. Diese Daten lagen in bereits auf 100m Intervalle aggregierten Mittelwerten vor. Die Belagsart konnte aus einem Belagskataster des ASTRA entnommen werden. Während die Erhebungsgrössen für die Belagstextur, die Griffigkeit und die Lärmemission fahrriktungsgetrennt und je Fahrstreifen vorliegen, ist dies für die Belagsart nicht durchgehend der Fall. Oft sind die Angaben zur Belagsart nur für den ganzen Fahrbahnquerschnitt vorhanden. Massgebend für die vorliegende Untersuchung ist jeweils natürlich die oberste Schicht des Belages, also die Deckschicht. Aus dem Belagskataster zeigten sich fast 60 verschiedene Deckschichtarten, so dass eine Zusammenfassung verwandter Deckschichtarten zu einer begrenzten Zahl von Deckschichttypen aufdrängte.

Die vier Grössen Belagstextur, Griffigkeit, Lärmemission und Deckschichttyp mussten schliesslich je 100m Intervall örtlich einander zugeordnet werden, um die beabsichtigten Auswertungen und Analysen durchführen zu können.

#### *Pilotdatensatz*

Zur Prüfung der vorgesehenen Auswerte- und Analysemethodik wurde ein kleiner Datensatz der N1 Genf - Bern und Zürich - St. Margreten von insgesamt 255 km Länge verwendet. Dabei standen die aggregierten Daten und die Daten der Belagsart für die Pilotauswertungen vollständig zur Verfügung.

#### *Hauptdatensatz*

Die vorliegende Auswertung und Analyse basiert auf einem sehr grossen Datensatz der Schweiz. Nationalstrassen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass verschieden genutzte Strassen im Gesamtdatensatz vorhanden sind, so die eigentlichen Autobahnen mit zwei richtungsgetrennten Fahrbahnen à zwei oder drei Fahrstreifen, zweistreifige Autostrassen sowie zweistreifige Gemischtverkehrsstrassen. Die Strassen liegen auch in ganz verschiedenen Regionen der Schweiz, wo die Witterungsverhältnisse und die Verkehrsbelastungen sehr unterschiedlich sind (Mittelland, Voralpen Alpengebiete mit den Passstrassen). Weiter ist zu beachten, dass die Deckschichten naturgemäss grosse

Unterschiede im Alter aufweisen und dass damit Zustandswerte bzgl. ihrer Eigenschaften Textur, Griffigkeit und Lärmemission je gleiche Deckschichtart ebenfalls naturgemäss variieren.

Weil aber die Fragen der Zusammenhänge vor allem bezüglich der unterschiedlichen Deckschichtarten bzw. Deckschichttypen von vorrangigem Interesse sind, war von Anfang an, auch unter Inkaufnahme der oben erwähnten Bedingungen, geplant, die Auswertungen für den Gesamtdatensatz nach den verschiedenen Belagstypen auf zu gliedern, mit dem Ziel, Tendenzen der Zusammenhänge erkennen zu können.

## 1.6 Erhebungs- und Auswertegrössen

### 1.6.1 Textur

Nach der europäischen Norm EN ISO 13473-5 (ISO 2009) [9] wird die Textur eines Fahrbahnbelauges als Abweichung einer Fahrbahnoberfläche von einer tatsächlich ebenen Fläche mit einer Texturwellenlänge kleiner als 0.5 m definiert. Sie trägt wesentlich zu Faktoren wie der Geräuschemission durch den Reifenkontakt, der Griffigkeit zwischen Reifen und Fahrbahn, dem Fahrkomfort, der Sprühhahnenbildung sowie dem Rollwiderstand und dem Verschleiss der Reifen bei. Die Textur hängt von den verwendeten Materialien und deren Eigenschaften ab. Des Weiteren spielen Einwirkungen aus Verkehr und Witterung bei der Änderung der Textur mit der Zeit eine wesentliche Rolle. Die Textur wird in die drei Bereiche Mikro-, Makro- und Megatextur unterteilt.

Die Textur einer Fahrbahnoberfläche kann mittels volumetrischer Methode, dem so genannten Sandfleckverfahren oder optisch mittels Profilometer gemessen werden. Für die Messung der Mikrotextur kommen Pendelmessgeräte wie der englische Skid Resistance Tester (SRT-Pendel) zum Einsatz.

Mit der Profilometer-Methode wird das Texturprofil mittels mechanischem, akustischem oder optischem Aufnehmer oder einer Videokamera erfasst [6]. Dabei gibt das Profilometer-System ein elektrisches Signal ab, das proportional zum Abstand zwischen einer Aufnehmer-Referenzebene und dem abgetasteten Oberflächenpunkt ist. Dabei sollen vorwiegend Werte für die Makrotextur gemessen werden. Die Makrotextur wird auch als Rauigkeit der Strasse bezeichnet und durch die Anordnung der Gesteinskörnungen gebildet. Massgebend sind die Korngrösse und die Kornverteilung. Sie hat charakteristische Texturwellenlängen zwischen 0.5 mm und 50 mm und weist damit Wellenlängen in derselben Grössenordnung wie die Reifenprofilelemente auf der Reifenaufstandsfläche auf [6].

Mit dem Profilometer-Verfahren wird die Profiltiefe PD erhoben bzw. die mittlere Profiltiefe MPD (Mean Profile Depth) bestimmt [7]. Im Gegensatz zur dreidimensionalen Texturtiefe ist die Profiltiefe zweidimensional. Die mittlere Profiltiefe MPD ergibt sich durch Subtraktion des durchschnittlichen Wertes vom Spitzenwert. Der durchschnittliche Wert ergibt sich durch das arithmetische Mittel aller Werte über die Grundlinie von 100 mm. Zusätzlich müssen die langwelligen Anteile durch Hochpassfiltrierung oder Steigungsunterdrückung der Grundlinie eliminiert werden. Die Grundlinie ist in zwei Hälften zu je 50 mm zu unterteilen. Der Spitzenwert berechnet sich als Mittelwert der zwei Spitzenwerte beider Hälften. Die mittlere Profiltiefe MPD wird mittels Transformationsgleichung in die geschätzte Texturtiefe ETD (Evaluated Texture Depth) umgerechnet, um die mittlere Texturtiefe MTD abschätzen zu können [6].

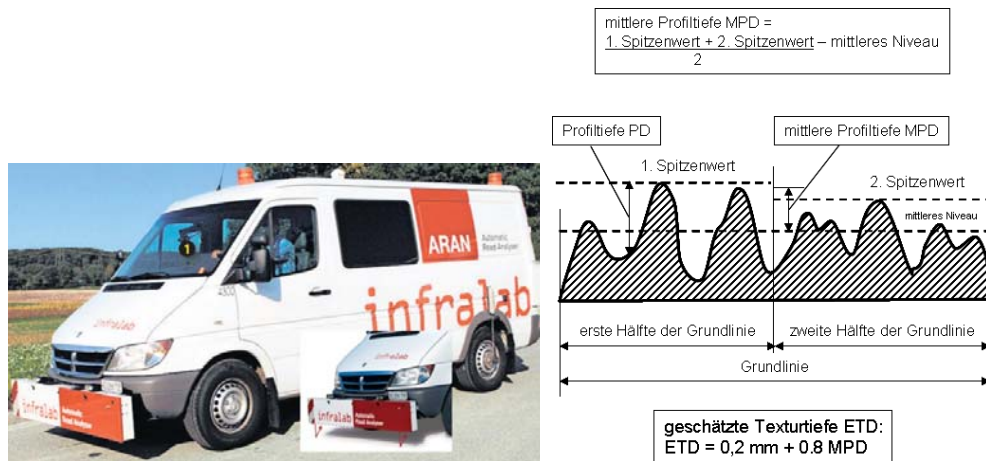


Abb.1 Profilometer-Messgerät (links)

Mittlere Profiltiefe MPDL (rechts)

## 1.6.2 Griffigkeit

Die Griffigkeit beschreibt den Reibungswiderstand zwischen Rad und Oberfläche, sie ist die massgebende Einflussgrösse für die Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn. Sie wird durch den Reibungsbeiwert  $\mu$  ausgedrückt. Dieser ist definiert als Quotient aus den auf die Fahrbahn übertragenen Horizontalkräften und den gleichzeitig wirkenden Normalkräften. In erster Linie werden bei der Kraftübertragung Antriebs- und Bremskräfte übertragen, sowie Seitenkräfte während der Kurvenfahrt. Entscheidend für die Grösse der Griffigkeit ist die Rauheit in der Kontaktfläche zwischen Fahrbahn und Reifen.

Die Griffigkeit einer Strassenoberfläche kann dynamisch mittels Skiddometer, Stuttgarter Reibungsmesser SRM oder SKM-Griffigkeitsmessgerät (Seitenkraft-Messverfahren) gemessen werden, wie auch statisch über die Textur mittels Pendelmessgerät, Sandfleckverfahren oder Ausflussmesser bestimmt werden.

### Griffigkeitsmessung mit SKM:

Das Verfahren mit dem SKM-Griffigkeitsmessgerät (Seitenkraft-Messverfahren) ist eine dynamische Methode zur Bestimmung der Nassgriffigkeit von Fahrbahnoberflächen [10]. Sie verwendet das Seitenkraftprinzip. Dabei wird ein spezielles, schmales Messrad verwendet, das in einem Winkel von  $20^\circ$  schräg zur Fahrtrichtung gestellt wird. Da kritische Griffigkeiten im Allgemeinen nur bei nasser Fahrbahn auftreten, wird die Fahrbahn unmittelbar vor dem Messrad angenässt, wodurch das Messrad über die nasse Fahrbahnoberfläche rutscht. Es wird bei definierter Sollgeschwindigkeit (40, 60, 80 km/h) und unter einer bekannten Vertikallast (Normalkraft  $F_z$ ) auf die Fahrbahnoberfläche aufgesetzt. Durch die Messung der Seitenreibungskraft  $F_y$  kann der Seitenreibungsbeiwert ermittelt werden [11].

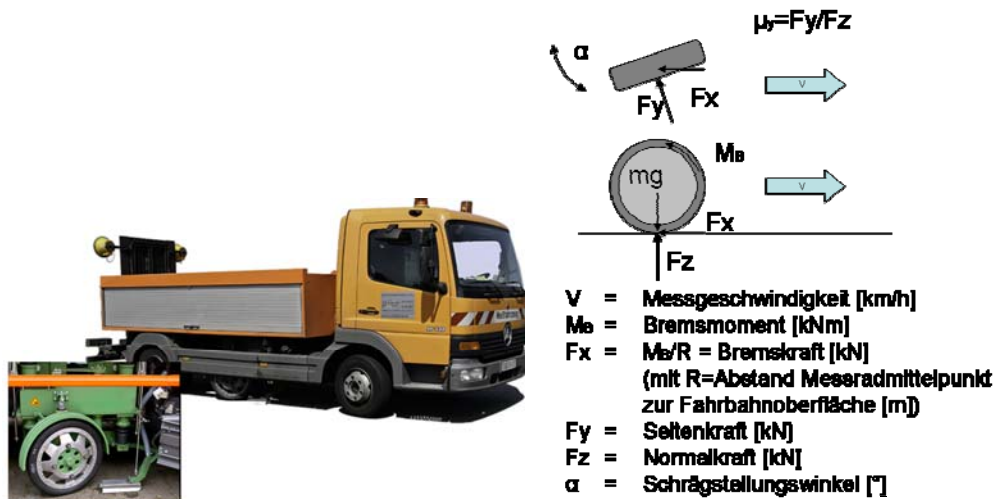


Abb.2 SKM-Messsystem

Messung Griffigkeit [5] 2014

Das Messrad ist ein profilloser, pneumatischer Schlauchreifen aus Naturkautschuk und wird rechts in der Radrollspur zwischen der Vorder- und Hinterachse des Fahrzeuges montiert. Das für die Annässung der Fahrbahn benötigte Wasser wird in einem Tank mitgeführt und über ein Schlauchsystem vor dem Messrad auf die Fahrbahn gebracht. Um dabei eine konstante Wasserfilmdicke von 0.5 mm zu erreichen, muss die Wasserversorgung mit einem Durchflussregelungsmechanismus ausgestattet sein, so dass die Wassermenge geschwindigkeitsabhängig dosiert werden kann. Die durch Reibung senkrecht zur Radachse entstehende, horizontale Kraft wird mit einer elektrischen Kraftmesszelle gemessen. Aus dem Verhältnis dieser gemessenen Seitenreibungskraft  $F_y$  zur Normalkraft  $F_z$  des Messrades bei einer vorgegebenen statischen Radlast von 200 kg wird der Seitenreibungsbeiwert  $\mu_{SKM}$  bzw.  $\mu_{SFC}$  (Sidewayforce Coefficient) ermittelt [11].

Dieser Seitenreibungsbeiwert  $\mu_{SKM}$  ist stark abhängig von der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit und von der Belagstemperatur. Diese Werte werden deshalb von Computersensoren im Fahrzeug gemessen und der Wert wird bei Abweichungen von der Sollgeschwindigkeit bzw. von der Bezugstemperatur von 20° C entsprechend korrigiert.

Für jeden Prüfabschnitt werden der durchschnittliche Seitenreibungsbeiwert für jeden Teilabschnitt, die durchschnittliche Messgeschwindigkeit sowie die Länge jedes Teilabschnittes gemessen. Die Länge der Teilabschnitte ist üblicherweise 20 m. Die korrigierten Messwerte werden anschliessend für fünf aufeinanderfolgende 20-m-Abschnitte gemittelt und ergeben den Mittelwert des 100-m-Abschnittes [11].

### 1.6.3 Lärmemission

Die Geräusche von Motorfahrzeugen lassen sich in Antriebs- und Rollgeräusche unterteilen. Aerodynamische Strömungsgeräusche werden zum Rollgeräusch gezählt, sind im Normalfall jedoch vernachlässigbar. Die Antriebsgeräusche haben ihren Ursprung im Motor, im Getriebe, in Nebenaggregaten sowie in der Ansaug- und Auspuffanlage. Sie sind abhängig vom Motortyp und dessen Betriebszustand, in erster Linie von der Drehzahl und zusätzlich von der Motorbelastung. Die Rollgeräusche ergeben sich aus dem Abrollvorgang des Reifens auf der Fahrbahn. Das Abrollgeräusch ist vom Fahrzeuggewicht, von der Reifenbreite, dem Reifenprofil, dem Fahrbahnbelag sowie der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängig [12].

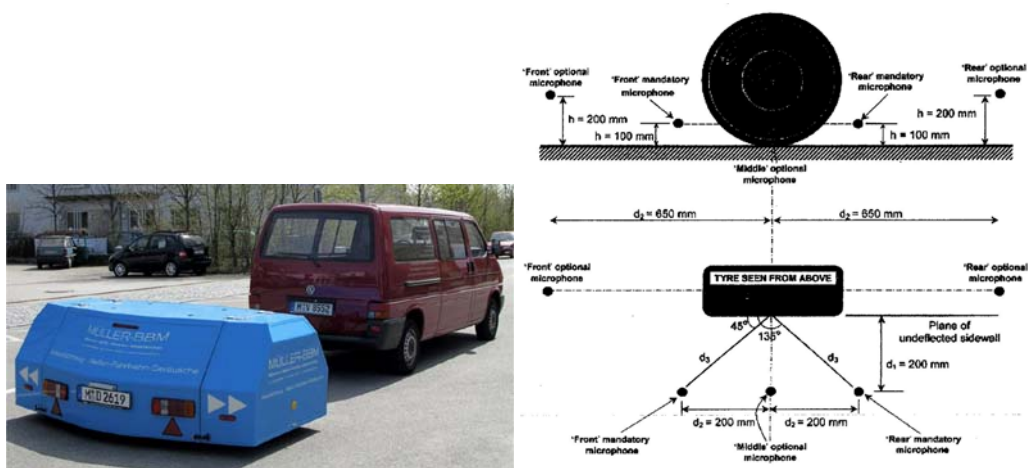
Die Anteile des Roll- und Antriebsgeräusches sind abhängig von der Geschwindigkeit. Bei tiefen Geschwindigkeiten dominiert das Antriebsgeräusch, bei hohen Geschwindigkeiten das Rollgeräusch. Innerorts dominiert damit das Antriebsgeräusch, ausserorts das Rollgeräusch [13].

Die relativ kleine Berührungsfläche zwischen Reifen und Fahrbahn ist der einzige direkte Kontakt zwischen Fahrzeug und Fahrbahn. Sie ist entscheidend für die Verkehrssicherheit und muss deshalb so ausgestaltet sein, dass grosse Kräfte unter allen Fahrbedingungen sicher übertragen werden können. Sie ist aber auch für die Umweltauswirkungen wie dem Treibstoffverbrauch oder den Lärmemissionen von zentraler Bedeutung.

Der Luftreifen reduziert das Rollgeräusch bereits stark. Beim Abrollen des Reifens wird dieser jedoch leicht in Schwingung versetzt, die zu einer Schallabstrahlung führt. Die Art und Intensität der Schwingungen ist dabei hauptsächlich von der Form und der Ausdehnung der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn abhängig. Bei der Geräuscentstehung kommt es sowohl zu mechanischer (Strukturschwingungen) wie auch aerodynamischer Schwingungsanregung (Kompressionsgeräusch, Horneffekt, Resonanzphänomene) [14]. Die Verteilung dieser Schallquellenanteile beim Reifen-Fahrbahn-Geräusch von Personenwagen wurde im „Handbuch Fahrzeugakustik“ [12] abgeschätzt. Der grösste Anteil des Rollgeräusches wird demnach durch die mechanische Schwingungsanregung verursacht. Eine wesentliche Reduktion des Reifen-Fahrbahn-Geräusches kann also nur durch Verminderung der Strukturschwingungen des Reifens erzielt werden. Diese Strukturschwingungen werden hauptsächlich durch die Makrotextur der Fahrbahn und die Reifenprofile verursacht.

### CPX-Verfahren

Bei der Close-Proximity Methode (CPX) wird der durchschnittliche, A-bewertete Schalldruckpegel des Reifen-Fahrbahn-Geräusches von zwei oder vier Referenzreifen gemessen. Die Reifen befinden sich in einem geschlossenen Messanhänger, dessen schalldämpfende Eigenschaften Störquellen wie das Motorengeräusch oder Geräusche anderer Fahrzeuge eliminiert (Abbildung). Die Schalldruckpegel der Reifen werden durch zwei vor und hinter den Reifen angebrachte Messmikrophone aufgezeichnet.



**Abb.3** links:CPX-Messgerät (Anhänger + Zugfahrzeug), rechts: Messprinzip [9]

Bei der dynamischen Reifen-Fahrbahn-Geräuschmessung wird mittels CPX-Methode der Schalldruckpegel kontinuierlich über eine längere Strecke erhoben. Die Mikrophonsignale

werden alle 125 Millisekunden aufgezeichnet und anschliessend über einen Abschnitt von 20 m energetisch gemittelt (Bundesamt für Strassen ASTRA 2010). Zusätzlich werden die Geschwindigkeit sowie GPS-Daten und die Lufttemperatur aufgezeichnet. Die gemessenen Schalldruckpegel der beiden Mikrophone pro Reifen werden arithmetisch gemittelt und ergeben den Pegel bei der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit. Mittels einfacher Korrektur wird dann der Schalldruckpegel bei Referenzgeschwindigkeit (50 km/h, 80 km/h, 110 km/h) berechnet. Dieser resultierende durchschnittliche Schalldruckpegel der zwei Messmikrophone pro Reifen bei Referenzgeschwindigkeit wird nach dem Normentwurf ISO/CD 11819-2 [15] als Ltr (Tyre/Road Sound Level) bezeichnet.

Um einen Wert für die akustische Belagsgüte zu erhalten, werden die Ltr der zwei bzw. vier Reifen in einen Index, den Close-Proximity Sound Index CPXI, umgerechnet. Dieser Wert ist repräsentativ für gemischten Verkehr. Bei Messsystemen mit zwei Reifen lautet die Umrechnungsformel nach ISO/CD 11819-2 [15]:

$$\text{CPXI} = 0.5 * \text{La} + 0.5 * \text{Ld} + 0.5 \text{ [dB]}$$

Die Werte La und Ld entsprechen dabei den Ltr der beiden Reifen.

#### 1.6.4 Häufigkeiten der Deckschichtarten und Altersstruktur der Deckschichtgruppen

Zur Übersicht und als Hilfe zur Beurteilung und Interpretation der Zusammenhänge wird der Datensatz einerseits nach Alter der Deckschichttypen ausgewertet und andererseits die Altersstrukturen der Deckschichtgruppen gebildet. Die Grundlagen dazu liefert der auf die Intervalle ausgelegte Hauptdatensatz, der je Intervall auch den Belagstyp (aus dem Belagskataster ASTRA) aufweist. Es ist dabei zu beachten, dass die Datengrundlagen bei Deckschichten, die älter als 30 Jahre sind, bzgl. Qualität und Genauigkeit erhebliche Unterschiede gegenüber neueren Deckschichten aufweisen können.

#### 1.6.5 Zeitliche Entwicklung der Güte der Fahrbahneigenschaften

Alle drei Grössen Textur, Griffigkeit und Lärmemission der Fahrbahnoberfläche verändern sich infolge verschiedenster Faktoren mit dem Fortlauf der Zeit. Generell nimmt das Qualitätsniveau (Güte) mit fortschreitender Zeit ab. Die Eigenschaften der Deckschichten der Fahrbahnoberflächen sind starken Beanspruchungen und Verschleiss durch den Verkehr (Lasten, Verkehrsmengen), Witterung, Chemischen Einwirkungen (Salz) und Temperaturunterschieden unterworfen. Dadurch werden die Textur, die Griffigkeit und die Lärmemission beeinflusst. Hauptsächlich die folgenden Gründe sind für die ungünstigen Veränderungen mit fortschreitendem Gebrauch verantwortlich [u.a.16]:

- Partikelverlust Deckschicht führt zu einer Veränderung der Makro - und Megatextur
- Die Kompaktierung (Verdichtung) des Belages durch den Verkehr bewirkt eine Veränderung der Makro- und Megatextur wie auch der Steifigkeit
- Die Mikrotextur wird durch das „Polieren“ der Reifen verändert
- Die Witterung, unterstützt durch Streusalz, verursacht mittels chemischer Prozesse eine Verwitterung der Oberfläche, wodurch Mikro- und Makrotextur beeinflusst werden

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wurden die momentan vorhandenen Zustände erfasst. Sie enthalten die ganze Bandbreite der guten bis schlechten Güteeigenschaften der Textur, Griffigkeit und der Lärmemission der verschiedensten Fahrbahnoberflächen der Nationalstrassen.

## 1.7 Hinweise aus der Literatur

Im Folgenden ist eine Auswahl von Erkenntnissen aus der Literatur zu den drei Zusammenhängen

- Textur und Griffigkeit
- Textur und Lärmemissionen und
- Griffigkeit und Lärmemission

zusammengestellt, soweit sie in einem relevanten Zusammenhang mit der vorliegenden Untersuchung stehen. Zu den Einzelgrössen Textur, Griffigkeit und Lärmemissionen und ihren Zusammenhängen zu andern Grössen besteht eine breite und umfangreiche Literatur.

### 1.7.1 Textur und Griffigkeit

Die Zusammenhänge Textur und Griffigkeit und Griffigkeit in Funktion der Textur wurden schon mehrfach untersucht.

- Im Bericht Measurement of Skidding Resistance and Surface Texture and Use of Results in United Kingdom von 1990 [17] werden Messverfahren und Messresultate von SKM und Profilometer untersucht. Dabei wird der Zusammenhang zwischen Griffigkeit und Textur bestätigt, allerdings nur qualitativ. Es wird festgestellt, dass eine starke Korrelation zwischen der Makrotextur und der prozentualen Abnahme der Griffigkeit im Geschwindigkeitsbereich zwischen 50 und 130km/h besteht.
- Im Bericht COST 354 Performance – Indicators for Roadpavement on Motorways and Primary Roads [18] werden Griffigkeitswerte (SFC) resp. Texturwerte (MPD) je in einer Performance-Indexskala zwischen 5 (schlecht) und 0 (gut) quantitativ angegeben. Durch Verknüpfung der beiden Grössen über die gemeinsame Indexierung kann – zumindest theoretisch – der Zusammenhang zwischen Griffigkeit und Textur quantitativ bestimmt werden (vgl. Anhang 1[31]).
- In der prEN ISO 13473-1:2003 werden die Bereiche der Textur, Mega-, Makro- und Mikrotextur, und die signifikant erwarteten Auswirkungen qualitativ angegeben. Dabei zeigt sich, dass die Makrotextur (Texturwellenlänge 50mm bis 0.5mm) und die Mikrotextur (Texturwellenlänge < 0.5mm bis 0.001mm) einen günstigen Einfluss auf die Griffigkeit haben, Unebenheiten und Megatextur (Texturwellenlänge > 50mm) jedoch einen ungünstigen. Der Texturtyp Makrotextur wird durch die Profiltiefen (MPD), der Texturtyp Mikrotextur durch die Schärfe und Rauheit der einzelnen Gesteinskörner charakterisiert. Die Zusammenhänge werden qualitativ angegeben.

## 1.7.2 Textur und Lärmemissionen

Der Zusammenhang Textur und Lärmemission wurde mehrfach untersucht und ist in der Literatur entsprechend dokumentiert.

- Im Bericht Textureinfluss auf die akustischen Eigenschaften von Strassenoberflächen von Müller [19] ist festgehalten, dass die Makro und die Megatextur die Geräuschemissionen der Strasse bestimmen. Es wird jedoch nur ein qualitativer Zusammenhang angegeben.
- Im Forschungsbericht Einfluss der Fahrbahntextur auf das Fahrbahn-Reifen-Geräusch zeigt Beckenbauer [20] ebenfalls den qualitativen Zusammenhang von Textur und Belagslärmemission. Er stellt grundsätzlich fest, dass offeneporige Deckschichten (Porous Asphalt) die geringsten Reifen-Fahrbahngeräusche verursachen. Zusätzlich konnte festgestellt werden, dass die Einflüsse der Makro- und Megatextur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch (Vorbeifahrgeräusche) unterhalb von 1200 Hz Frequenzbereichen massgeblich sind. Einen quantitativen Zusammenhang zwischen Texturkenngrössen und Vorbeifahrgeräusch liess sich nicht herleiten. Dies wird auch im Arbeitspapier FGSV Textureinfluss auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken [21] bestätigt.
- Gemäss Handbuch der Akustik von Zeller [12] sind verschiedene Faktoren für die Geräuschemission massgebend, nämlich Strukturschwingungen, Kompressionsgeräusch, Horneffekt und Resonanzphänomene. Dabei haben die Strukturschwingungen, welche hauptsächlich durch die Makrotextur verursacht werden, den weitaus grössten Anteil von 60 bis 80 % am Gesamtgeräusch Reifen-Fahrbahn.
- Im Bericht Interaktion zwischen Reifen und Fahrbahn - Zielkonflikte und Optimierungsmöglichkeiten aus strassenbaulicher Sicht - schlagen Litzka und Haberl [14] vor, grundsätzlich zwei Arten von Deckschichten zu unterscheiden: die offeneporige Fahrbahndeckschicht und die texturoptimierte, dichte Fahrbahnschicht. Offenporig bedeutet grobe Gesteinskörnung und Hohlraumgehalte 22 bis 28 % des eingebauten Mischgutes. Auf der Fahrbahn stellt sich damit nur ein dünner Wasserfilm bei Regen ein, was günstig ist für die Verkehrssicherheit. Gleichzeitig erhöht sich der Schallabsorptionsgrad, was zu niedrigeren Lärmemissionen führt. Besonders wirksam ist dies bei Strassen die mit hohen Geschwindigkeiten befahren werden, wo das Reifen-Fahrbahngeräusch dominiert. Bei den texturoptimierten Fahrbahndeckschichten wird die Wellenlänge und die Texturtiefe begrenzt. Da die Beläge generell mit zunehmender Korngrösse lauter werden, lässt sich die Optimierung durch akustisch günstige, kleine Korngrössen von 8 bis 4mm erreichen. Nachteile dieser Fahrbahndeckschichten können ungenügende Griffigkeiten bei hohen Fahrgeschwindigkeiten sein. Die Anwendung beschränkt sich deshalb eher auf Strassen innerorts, wo geringere Durchschnittsgeschwindigkeiten vorliegen.
- Im Bericht Bewertung der Nahfeld – Geräuschemissionen österreichischer Fahrbahndeckschichten zeigen Litzka und Haberl [22] dass bei neuen Belägen die Unterschiede der Lärmemission zwischen offeneporigen und dichten Fahrbahndeckschichten gross ist (bis 6 dB(A)), dass der Geräuschpegelanstieg bei offeneporigen Fahrbahndeckschichten, welche mit hohen Geschwindigkeiten befahren werden, mit zunehmendem Alter aber viel stärker ist als bei den dichten Fahrbahndeckschichten. Der grösste Anteil der Anstiege ergibt sich in den ersten fünf Jahren. Nach 10 und mehr Jahren Alter bestehen nur noch geringe Unterschiede in der Nahfeld – Geräuschemission (ca. 1 dB(A)).
- Im Bericht Arbeitspapier W2 der FGSV Textureinfluss auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken [21] sind die optischen Messtechnikverfahren der Nahfeldmethode (Close Proximity) beschrieben, die es ermöglichen, die Oberflächen-texturen im kompletten Wellenlängenbereich berührungslos, schnell und mit hoher Genauigkeit nach Triangulations- oder Streifenlichtprojektionsverfahren zu erfassen. Dabei wird die mittlere Profiltiefe MPD bestimmt, die nach ISO 13473 [9] als Differenz zwischen dem arithmetischen Mittel der zwei Spitzenwerte der beiden Grundlinienhälften von 50mm Länge und dem mittleren Niveau über der gesamten Grundlinie des 100mm langen Einzelabschnittes ermittelt wird. Zur verfeinerten Beschreibung von akustisch günstigen Bereichen der Texturparameter wurden zusätzlich zur mittleren Texturtiefe die drei weiteren Grössen Texturproftiefe TD und der Gestaltungsfaktor

GF eingeführt. Danach lassen sich geräuscharme Fahrbahndeckschichten feiner bzgl. ihrer lärmindernden Wirkung beurteilen.

### 1.7.3 Griffigkeit und Lärmemissionen

In der einschlägigen Literatur wird der Zusammenhang zwischen Griffigkeit und Lärmemissionen kaum direkt behandelt und beschrieben. Die Behandlung des Zusammenhanges erfolgt praktisch ausschliesslich durch Beschreibung der Griffigkeit über die Makro- und Mikrotextur und Verknüpfung der Makrotextur zur Lärmemission. Dies deshalb, weil insbesondere bei höheren Fahrgeschwindigkeiten, wo das Rollgeräusch dominiert, die Makrotextur für das Reifen-Fahrbahngeräusch verantwortlich ist. Eine gute Makrotextur, d.h. grobe Gesteinskörnung ergänzt durch Offenporigkeit, ist bei höheren Fahrgeschwindigkeiten in diesem Fall denn auch günstig sowohl für eine einwandfreie Wasserverdrängung und damit massgebend für genügende Griffigkeit, hat aber auch positive Auswirkung auf die Lärmemission durch verstärkte Schallabsorption.

Im umgekehrten Fall, d.h. bei kleineren Fahrgeschwindigkeiten, z.B. innerorts, sind geringere Griffigkeitsanforderungen gestellt, hingegen spielen hier dominant die Lärmemissionen eine wichtige Rolle. Fahrbahndeckschichten mit feiner Gesteinskörnung kombiniert mit Offenporigkeit sind hier relevant. Hier ist allerdings die Lärmemission nicht mehr vorherrschend durch das Reifen-Fahrbahngeräusch hervorgerufen, sondern es spielt bei tieferen Fahrgeschwindigkeiten das Motorengeräusch eine mitentscheidende Rolle. In diesem Falle war der Zusammenhang zwischen Griffigkeit und Lärmemission von weniger grossem Interesse im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen.

## 2 Methodik

### 2.1 Auswertungen Einzelgrössen

#### 2.1.1 Datensätze

Die aus der Erhebung ZEBNS09 stammenden Daten sind grundsätzlich je Auswertegrösse auf 100m-Intervalle aggregierte Daten, welche durch das ASTRA in dieser Form für die Untersuchungen der vorliegenden Forschungsarbeit zur Verfügung gestellt wurden. Die folgende Tabelle zeigt die Umfänge des Ausgangsdatsatzes [24], des in der Untersuchung verwendeten Pilotdatsatzes [23] und des Hauptdatsatzes, welcher nach Bereinigung (vgl. Anhang 3) verwendet wurde.

**Tab. 1** Ausgangsdatsatz, Pilotdatsatz und Hauptdatsatz der vorliegenden Untersuchung

|                        | Textur | Griffigkeit | Lärmemission | Deckschichten | Deckschichtgruppen |
|------------------------|--------|-------------|--------------|---------------|--------------------|
| <b>Ausgangsdatsatz</b> | 72'913 | 70'345      | 57'673       | 59            | -                  |
| <b>Pilotdatsatz</b>    | 4'000  | 4'000       | 4'000        | 27            | 4                  |
| <b>Hauptdatsatz</b>    | 36'350 | 36'350      | 36'350       | 59            | 7                  |

#### 2.1.2 Bildung von Deckschichtgruppen

Infolge der Verwandtschaft von Mischgütern und des strukturellen Aufbaus bestimmter Deckschichten wurden verschiedene Deckschichten zu Deckschichtgruppen zusammengefasst. Damit liessen sich die Auswertungen übersichtlicher gestalten und die Analyse und Interpretation der Ergebnisse vereinfachen. Aus den 59 verschiedenen Deckschichten wurden schliesslich 7 Deckschichtgruppen gebildet.

#### 2.1.3 Statistische Datenanalyse der Einzelgrössen

Die verwendeten Datensätze der Einzelgrössen Textur, Griffigkeit und Lärmemission wurden zum Erkennen der Struktur der Datengesamtheit und deren Eignung für die Bildung der gesuchten Zusammenhänge je einzeln einer statistischen Analyse unterzogen. Dabei wurden die Häufigkeitsverteilungen der Gesamtheit der Daten und je Deckschichtgruppe mit Mittelwerten, Varianzen, Schiefen und relevanten Quantilen bestimmt und auf Normalverteilung geprüft.

Aufgrund der sehr grossen Variabilität der Alter der Deckschichten und der Altersstrukturen der Deckschichtgruppen wurden zusätzlich in Ergänzung zum Forschungsprogramm die Grösse Alter der Deckschichten ausgewertet mit der Absicht, das Alter bei der Beurteilung der Ergebnisse mit einbeziehen zu können.

## 2.2 Analysen der Zusammenhänge

### 2.2.1 Grundsatz

Kern der vorliegenden Untersuchungen sind die Analysen der drei Zusammenhänge

- Griffigkeit in Abhängigkeit der Textur
- Lärmemission in Abhängigkeit der Griffigkeit und
- Lärmemission in Abhängigkeit der Textur

mit dem Ziel die Hauptfragen der Forschungsarbeit zu beantworten.

Dazu wurden die Daten Textur, Griffigkeit resp. Lärmemission, Griffigkeit und Lärmemission, Textur gleicher Intervalle zur Bildung der entsprechenden Datenpaare einander zugeordnet. Dies erfolgt einerseits für die Gesamtdatensätze und je einzeln für die Datensätze der sieben Deckschichtgruppen.

Zur Bewertung der Zusammenhänge wurden Regressionsanalysen mit linearen und exponentiellen Ansätzen vorgenommen und die Güte der Zusammenhänge mit statistischen Verfahren geprüft. Dabei wurden

- das Bestimmtheitsmass des Zusammenhangs (Trendgerade) und
- der Korrelationskoeffizient nach Pearson (lineare Korrelation)

berechnet. Das Verfahren Pearson wird angewendet, weil im vorliegenden Fall die Datenreihen intervallskaliert sind.

### 2.2.2 Regressionsanalyse

Die Regressionsanalyse wird verwendet, um den Zusammenhang zwischen einer abhängigen und einer oder mehreren unabhängigen Variablen zu quantifizieren. Besteht ein linearer Zusammenhang zwischen den zu untersuchenden Variablen, so wird von einer linearen Regression der abhängigen Variablen  $y$  von der unabhängigen Variablen  $x$  gesprochen. Der linearen Regression liegt folgende Gleichung zugrunde:

$$y_i = a * x_i + b$$

Mittels linearer Regression werden die Parameter  $a$  und  $b$  nach der Methode der kleinsten Quadrate geschätzt. Diese Methode minimiert die Quadratsumme der Differenzen zwischen den aus der Regression berechneten Zielwerte und den tatsächlichen Werten der Zielgrösse  $y$ . Diese Differenzen werden Residuen genannt (Nipp et al. 2002[25]):

$$e_i = y_i^0 - y_i$$

Dabei wird mit  $y_i$  der Schätzwert von der tatsächlichen Grösse  $y_i^0$  berechnet, wobei:

$$y_i^0 = a * x_i + b + e_i$$

Als Resultat der Regressionsanalyse muss stets die Güte des Modells betrachtet werden. Diese wird durch den Wert  $R^2$ , dem Bestimmtheitsmass, definiert.  $R^2$  kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen und misst, wie gut sich die Werte der abhängigen Variablen tatsächlich anhand der Werte aus den erklärenden Variablen herleiten lassen. Eine Faustregel, ab welchem  $R^2$  eine

Regressionsgleichung als gut zu bewerten ist, gibt es nicht. Es gilt, je näher das Bestimmtheitsmass bei 1 liegt, desto besser ist das verwendete Regressionsmodell [26].

### 2.2.3 Pearson-Korrelation

Der Korrelationskoeffizient nach Pearson ist eine dimensionslose Masszahl für die Stärke und Richtung des linearen Zusammenhangs zwischen zwei mindestens intervallskalierten Variablen. Er wird mit „r“ bezeichnet und kann Werte zwischen -1 und +1 annehmen. Das Vorzeichen beschreibt dabei die Richtung des Zusammenhangs, der Betrag die Stärke der Korrelation zweier Variablen. Bei  $r = 1$  besteht eine perfekt positive Korrelation, die Punkte liegen im Streudiagramm alle auf einer Geraden von links unten nach rechts oben. Bei  $r = -1$  liegt eine perfekt negative Korrelation vor, die Punkte des Streudiagramms liegen alle auf einer Geraden von links oben nach rechts unten. Besteht zwischen zwei Variablen eine perfekte Korrelation, kann aus dem Wert einer Variablen eindeutig der Wert der anderen Variablen berechnet werden. Bei  $r = 0$  ist kein linearer Zusammenhang zwischen den zu prüfenden Variablen gegeben, es ist jedoch trotzdem möglich, dass ein anderer, nichtlinearer Zusammenhang besteht. Liegt der Korrelationskoeffizient  $r$  zwischen 0 und 1 bzw. 0 und -1, ist ein möglicher Zusammenhang mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit vorhanden. Je näher der Betrag von  $r$  bei 0 liegt, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit für einen linearen Zusammenhang [26].

Der Korrelationskoeffizient  $r$  wird gemäss folgender Definition berechnet [27]:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{S_x S_y}$$

wobei  $N$  die Stichprobengrösse,  $\bar{x}$  und  $\bar{y}$  die Mittelwerte und  $S_x$  und  $S_y$  die jeweiligen Standardabweichungen der Variablen  $x$  und  $y$  sind.

Als zusätzlicher Wert wird oft das Quadrat des Korrelationskoeffizienten  $r^2$ , das als Bestimmtheitsmass bezeichnet wird, berechnet. Es gibt an, welcher prozentuale Anteil der Varianz (Streuung) der einen Variablen durch die Streuung der anderen Variablen erklärt werden kann [28].

Ob ein Zusammenhang bei einem bestimmten Betrag von  $r$  als gross oder klein angesehen werden kann, hängt stark von den Daten ab. Allgemein gültige Grenzen von  $r$  gibt es nicht. Die Wahrscheinlichkeit eines Zusammenhangs zwischen zwei Variablen hängt im Wesentlichen von der Höhe des Korrelationskoeffizienten sowie der Grösse der Stichprobe  $n$  ab. Bei einem Betrag von  $r$  zwischen 0 und 1 bzw. 0 und -1 kann nicht automatisch ein statistischer Zusammenhang gefolgert werden. Dies trifft nur zu, wenn der berechnete Korrelationskoeffizient signifikant ist. Dies kann mit der Berechnung der Signifikanz überprüft werden [26].

Grundsätzlich gilt die Bedingung der Normalverteilung der Daten für eine Korrelationsanalyse nach Pearson, da bei nicht normalverteilten Variablen die Resultate der Korrelation ungenau sein können. Dies ist aber nur der Fall, falls die Grundgesamtheit der Daten normalverteilt ist, die Stichprobe jedoch nicht und deshalb

Ausreisser enthält. Wenn die Stichprobe die wahre Verteilung der Grundgesamtheit in guter Näherung wiedergibt und die Grundgesamtheit der Daten tatsächlich nicht normalverteilt ist, dann handelt es sich bei den Extremwerten nicht um Ausreisser, sondern um Eigenschaften der Grundgesamtheit. In diesem Fall liefert die Korrelationsanalyse richtige Ergebnisse über den Zusammenhang zweier oder mehrerer Variablen [29]. Die Prüfung auf Normalverteilung zeigt, ob dies bei den vorliegenden Daten der Fall ist. Die Korrelationsanalyse nach Pearson kann, wenn das zutrifft, verwendet werden.

#### 2.2.4 Signifikanz einer Korrelation

Neben der Berechnung der Korrelation sollte jeweils auch die Signifikanz mittels Signifikanztests ausgewiesen werden. Die Signifikanz ist ein Wert, welcher den systematischen Zusammenhang zwischen zwei Variablen beschreibt. Dadurch kann festgestellt werden, ob ein Zusammenhang rein zufällig sein könnte oder mit grosser Wahrscheinlichkeit tatsächlich vorliegt. Der Signifikanzwert ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die beiden Variablen nicht miteinander korreliert sind. Ein Signifikanzwert von 0 für ein Variablenpaar bedeutet also, dass die Variablen mit einer Wahrscheinlichkeit von 0 % vollkommen unkorreliert sind. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein Zusammenhang zwischen den Variablen besteht. Oftmals wird in der Statistik eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % oder 1 % gewählt. Eine Irrtumswahrscheinlichkeit von kleiner als 1 % bedeutet, dass die berechnete Korrelation (in dieser Höhe und bei dieser Stichprobengrösse) in weniger als 1 % der Fälle rein zufällig auftritt. Die Signifikanz ist abhängig von der Höhe der Korrelation sowie von der Stichprobengrösse. Bei sehr kleinen Stichproben muss die Korrelation sehr hoch sein, damit sie signifikant ist. Kleine Korrelationen hingegen können bei sehr grossen Stichproben signifikant werden [26].

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Vorbemerkungen

#### 3.1.1 Erkenntnisse aus den Pilotuntersuchungen (z.T. auch [30])

##### *Einschränkungen aufgrund der Datengrundlagen:*

Die Erhebungen der drei Grössen Textur, Griffigkeit und Lärmemissionen wurden nicht gleichzeitig und zeitgleich durchgeführt. Allerdings dürften die diesbezüglichen Unterschiede gering sein, mit Ausnahme des Witterungseinflusses. Textur und Griffigkeit verändern sich wesentlich erst über mittlere bis längere Zeiträume. Die davon beeinflussten Lärmemissionen deshalb auch.

##### *Einschränkungen aufgrund ungenauer Belagsreferenzierungen:*

Die aus dem Belagskataster ASTRA entnommenen, örtlichen Angaben zum Belagstyp sind zum überwiegenden Teil aktuell, kurzfristige durch Belagserneuerungen erfolgte Veränderungen sind nicht berücksichtigt.

Im Weiteren sind Ungenauigkeiten der Referenzierung bei den Aufgliederungen der Daten nach Autobahnen (2- und 3 streifige Richtungsfahrbahnen, Autostrassen und Gemischtverkehrsstrassen) nicht auszuschliessen.

##### *Aussagekraft:*

Die Aussagekraft der Daten ist jedoch unter den folgenden Bedingungen gültig und zweckmässig:

- Die Referenzierungen der Grössen Textur, Griffigkeit, Lärmemission und Belagstyp sind je Intervall zum überwiegendsten Teil genau. Damit lassen sich grundlegende Erkenntnisse zu den gesuchten Zusammenhängen Textur und Griffigkeit, Lärmemission und Textur und Lärmemission und Griffigkeit suchen resp. auswerten.
- Die Auswertungen mit dem Pilotdatensatz liessen die Machbarkeit und Zulässigkeit der Analysen ausweisen, indem die Pilotauswertungen zur Bildung der Zusammenhänge erfolgreich durchgeführt werden konnte und sich plausible, vorläufige Ergebnisse zeigten.
- Die Auswertungen mit dem Pilotdatensatz deuteten darauf hin, dass die gesuchten Zusammenhänge in ihren Ausprägungen eher schwach ausfallen würden. Als einer von verschiedenen Gründen wurde die grosse Verschiedenheit der Alter der Deckschichten vermutet.
- Aus den Auswertungen mit dem Pilotdatensatz zeigt sich, dass die Grösse Alter der Deckschichten für die Beurteilung und Interpretation der Ergebnisse eine wichtige Bedeutung haben könnte.

##### *Gliederung und Aufsplittung des Hauptdatensatzes:*

- Aufgrund der Erkenntnisse der Pilotauswertungen erwies sich die Aufgliederung der Daten nach Deckschichttypen und einer Zusammenfassung in Deckschichtgruppen als unumgänglich für die Beurteilung und Interpretation der Ergebnisse.
- Infolge der grossen Datenmengen und der Unsicherheiten bei den örtlichen Abgrenzungen musste auf die Auswertung und Analyse der Daten nach den verschiedenen Anlagetypen Autobahnen, Autostrassen und Gemischtverkehrsstrassen verzichtet werden.

### 3.1.2 Auswertung Hauptdatensatz

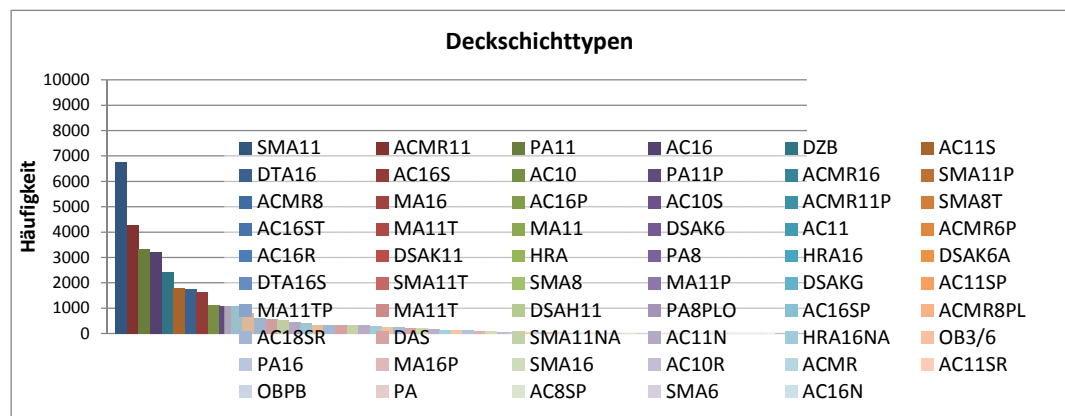
Der Hauptdatensatz wurde wie folgt ausgewertet:

- Auswertung der Einzelgrößen Textur, Griffigkeit, Lärmemissionen und Deckschichten bzgl. Häufigkeit und Normalverteilung der Daten.
- Analyse der Zusammenhänge Textur und Griffigkeit, Lärmemissionen und Textur und Lärmemissionen und Griffigkeit für die Gesamtdaten (alle Deckschichten zusammen)
- Analyse der Zusammenhänge aufgegliedert nach den 7 Deckschichtgruppen; Relevanzen der Zusammenhänge (Regression) und Korrelationen
- Texturprofiltiefe, Griffigkeit und Lärmemission in Funktion zum Alter der Deckschichtgruppe

## 3.2 Auswertungen Einzelgrößen

### 3.2.1 Deckschichten und Deckschichtgruppen

Der Hauptdatensatz enthält die folgenden Arten und Umfänge der Deckschichten:

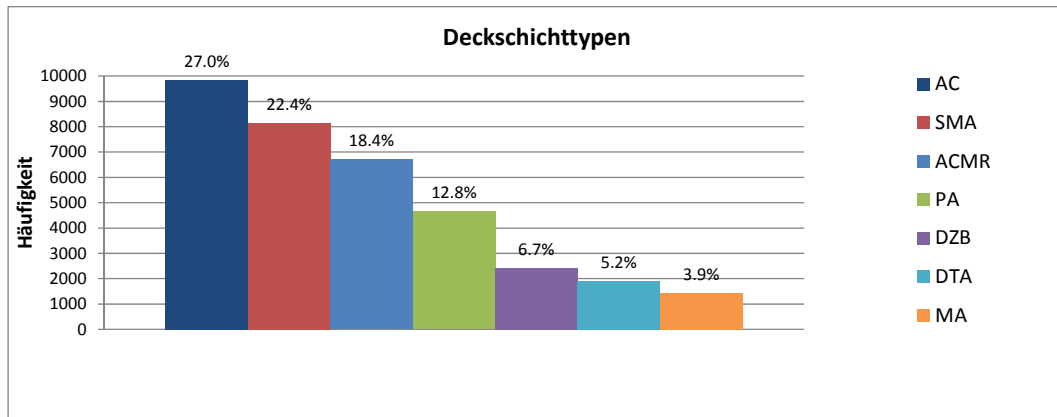


**Abb.4** Deckschichten des Hauptdatensatzes

Die verschiedenen Deckschichten wurden wie folgt zu Deckschichtgruppen zusammengefasst:

- Alle Asphaltbetone AC (inkl. unterschiedlicher Bitumensorten z.B. AC11S)
- Alle Splittmastixasphalte SMA
- Alle Rauasphalte ACMR
- Alle offenporige Asphalte PA (Drainasphalt)
- Alle bewehrte Zementbetondecken DZB
- Alle Decken mit Teer-Asphalt DTA
- Alle Gussasphalte MA

Damit ergeben sich folgende Häufigkeiten und Anteile der 7 Deckschichtgruppen:



**Abb.5** Häufigkeiten und Anteile der Deckschichtgruppen am Hauptdatensatz

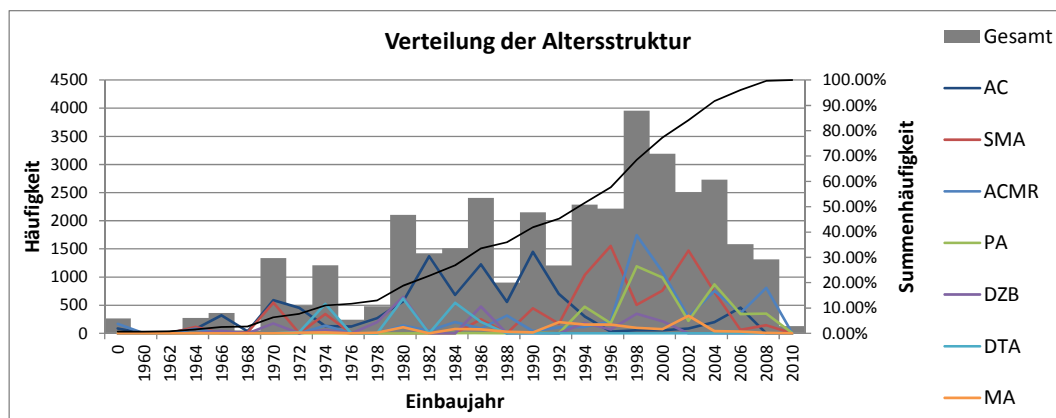
Die Abbildung zeigt:

- Die grössten Zahlen von Deckschichten sind die dichten Asphaltschichten Asphaltbeton und Splittmastixasphalt mit rund der Hälfte aller Beläge auf Autobahnen.
- Die neueren Splittmastixasphalte sind aber mit rund 22 % bereits stark vertreten. Es folgen mit auch fast einem Fünftel die Rauhasphalte. Noch rund 5 % relativ alte Deckschichten bestehen aus Teerasphalt.
- Die offenenporigen Drainasphalte haben einen geringeren Anteil von 12.8 %
- Zementbetondecken sind nur noch mit 6.7 % Anteil vorhanden.
- Die vor allem auf Brücken angewendeten Gussasphalte machen einen sehr kleinen Teil mit rund 4 % an der Gesamtlänge aus.

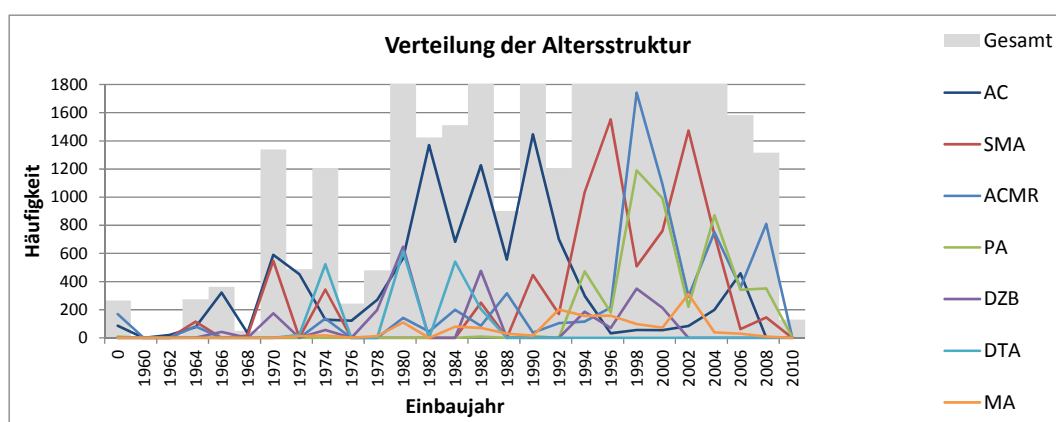
Zur Entwicklungen der Qualität der Auswertegrössen im Laufe der Zeit lassen sich keine direkten Aussagen aus den Datengrundlagen gewinnen, weil für die entsprechenden Intervalle jeweils nur eine Messung aus der einen Untersuchung ZEBNS09 vorliegen und die Texturmessung und die Messung der Lärmemission erstmals netzweit vorliegt. Eine Verwendung der früheren Daten der Griffigkeit ist infolge unterschiedlich verwendeter Messsysteme nicht direkt möglich. Hingegen lassen sich die Qualitätseigenschaften nach Alter der Deckschichten auswerten.

### 3.2.2 Alter der Deckschichten für die einzelnen Deckschichtgruppen

Die nachfolgenden Auswertungen zeigen die Verteilungen der Altersstrukturen für die Gesamtheit aller Deckschichten und je Deckschichtgruppe:



**Abb.6** Verteilung der Altersstrukturen der Deckschichtgruppen



**Abb.7:** Altersstrukturen aller Deckschichten und je Deckschichtgruppe

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Häufigkeiten der Deckschichten je Deckschichtgruppe nach Alter.

**Tab. 2** Häufigkeiten der Alter der Deckschichten für die einzelnen Deckschichtgruppen

| Alter Deckschicht | Gesamt | AC   | SMA  | ACMR | PA   | DZB  | DTA  | MA   | Rest |
|-------------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| unbekannt (0)     | 266    | 86   | 0    | 168  | 10   | 0    | 0    | 0    | 2    |
| Einbau bis 1970   | 2046   | 1041 | 678  | 81   | 0    | 219  | 0    | 0    | 27   |
| 1971 bis 1980     | 4528   | 1540 | 345  | 280  | 0    | 905  | 1160 | 152  | 146  |
| 1981 bis 1990     | 8391   | 5282 | 696  | 686  | 21   | 476  | 745  | 195  | 290  |
| 1991 bis 2000     | 12856  | 1142 | 4023 | 3270 | 2836 | 819  | 0    | 686  | 80   |
| 2001 bis 2002     | 2501   | 85   | 1472 | 293  | 221  | 0    | 0    | 311  | 119  |
| 2003 bis 2004     | 2732   | 200  | 733  | 752  | 870  | 0    | 0    | 39   | 138  |
| 2005 bis 2006     | 1584   | 458  | 63   | 359  | 342  | 0    | 0    | 30   | 332  |
| 2007 bis 2008     | 1316   | 1    | 145  | 809  | 351  | 0    | 0    | 10   | 0    |
| 2009 bis 2010     | 130    | 1    | 0    | 4    | 5    | 0    | 0    | 0    | 120  |
| Anzahl            | 36350  | 9836 | 8155 | 6702 | 4656 | 2419 | 1905 | 1423 | 1254 |

Die Abbildungen und Tabelle zeigen:

- Gesamthaft wurden 3636.7 km Fahrstreifen der Nationalstrassen erfasst und bezüglich Deckschichttyp und Deckschichtalter ausgewertet. Mitunter waren es 3180 km bitumenhaltige Fahrstreifenintervalle und 242 km Zementbetonfahrstreifen.
- Rund 50 % der Fahrbahnen waren im Auswertezeitpunkt jünger als 20 Jahre und die andern 50 % waren älter. Es sind auch 20 % der Gesamtheit älter als 30 Jahre, darin enthalten sind fast alle Deckschichten der Deckschichtgruppe AC.

Bezüglich Altersstruktur gibt es grosse Unterschiede bei den einzelnen Deckschichtgruppen:

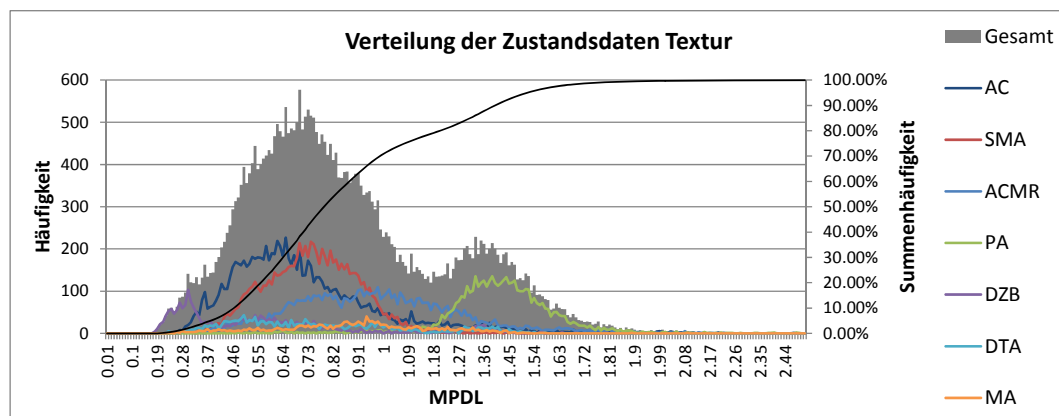
- Der grösste Anteil der AC ist 30 Jahre alt und älter.
- Die SMA, PA und ACMR sind im Durchschnitt erst 10 bis 12 Jahre alt.
- Die MA werden seit rund 40 Jahren vor allem auf Brücken eingebaut, ihr Anteil an der Gesamtlänge ist deshalb eher klein. Der grösste Anteil davon ist im Durchschnitt ca. 25 Jahre alt.
- Zementbetonbeläge wurden hauptsächlich in vier Perioden 1970, 1980, 1986 und 1998 eingebaut und erneuert, mit rund 20, 90, 50 und 80 km Länge.

Die Deckschichten AC älter als 30 Jahre sind im Bezug auf die Datengrundlage (Genauigkeit, Qualität) generell nicht vergleichbar mit den neueren Deckschichten.

Die stark unterschiedlichen Altersstrukturen der verschiedenen Deckschichtgruppen haben wesentliche Einflüsse auf die Eigenschaften der Textur, Griffigkeit und damit der Lärmemissionen bei den einzelnen Deckschichtintervallen. Sie können aber nur grob bei der Beurteilung der Zusammenhänge einbezogen werden, weil für eine genauere Betrachtung eine vertiefte Analyse nötig wäre, welche den Rahmen dieser Forschungsarbeit gesprengt hätte.

### 3.2.3 Verteilung der Zustandsdaten Textur

Die folgende Abbildung und Tabelle zeigen die statistischen Grössen der Verteilungen der Auswertegrösse Textur (Mittlere Profiltiefe MPDL [mm]):



**Abb.8** Verteilung der Zustandsdaten Textur

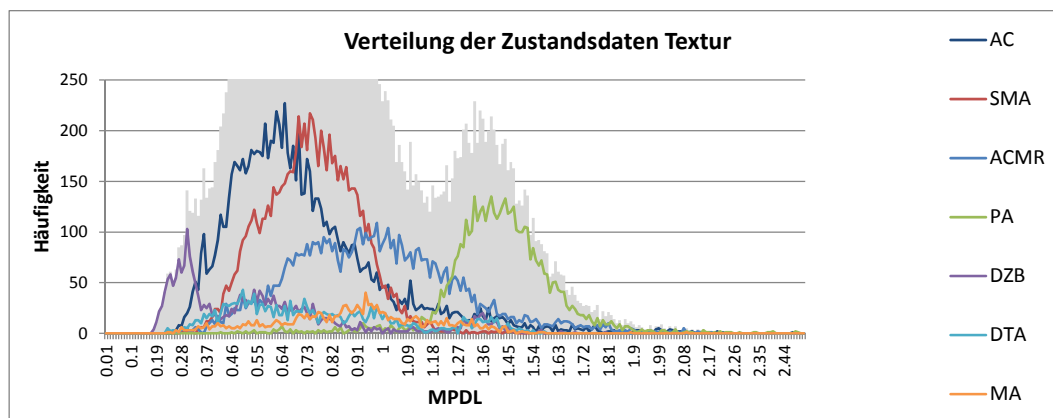


Abb.9 Verteilung der Zustandsdaten Textur

Tab. 3 Statistische Werte der Zustandsdaten der Textur

| MPDL-Wert          | Gesamt | AC     | SMA    | ACMR  | PA     | DZB   | DTA    | MA    | Rest  |
|--------------------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|
| Mittelwert         | 0.86   | 0.72   | 0.74   | 0.96  | 1.41   | 0.56  | 0.76   | 0.88  | 0.85  |
| Q85                | 1.31   | 0.96   | 0.91   | 1.25  | 1.58   | 0.85  | 1.10   | 1.18  | 1.28  |
| Q15                | 0.51   | 0.46   | 0.55   | 0.67  | 1.26   | 0.26  | 0.44   | 0.58  | 0.52  |
| Median             | 0.78   | 0.65   | 0.73   | 0.94  | 1.41   | 0.49  | 0.70   | 0.90  | 0.74  |
| Mode               | 0.69   | 0.64   | 0.73   | 0.97  | 1.32   | 0.29  | 0.49   | 0.93  | 0.62  |
| Standardabweichung | 0.366  | 0.325  | 0.173  | 0.298 | 0.198  | 0.336 | 0.313  | 0.280 | 0.383 |
| Varianz            | 0.134  | 0.106  | 0.030  | 0.089 | 0.039  | 0.113 | 0.098  | 0.079 | 0.147 |
| Kurtosis           | 9.090  | 58.561 | 20.602 | 0.955 | 5.015  | 0.699 | -0.489 | 0.940 | 9.672 |
| Schiefe            | 1.308  | 4.501  | 1.482  | 0.644 | -0.167 | 1.210 | 0.641  | 0.156 | 1.868 |
| Minimum            | 0.17   | 0.24   | 0.27   | 0.26  | 0.41   | 0.17  | 0.22   | 0.22  | 0.26  |
| Maximum            | 8.30   | 8.30   | 3.77   | 2.92  | 2.80   | 1.79  | 1.57   | 2.71  | 4.56  |
| Anzahl             | 36350  | 9836   | 8155   | 6702  | 4656   | 2419  | 1905   | 1423  | 1254  |

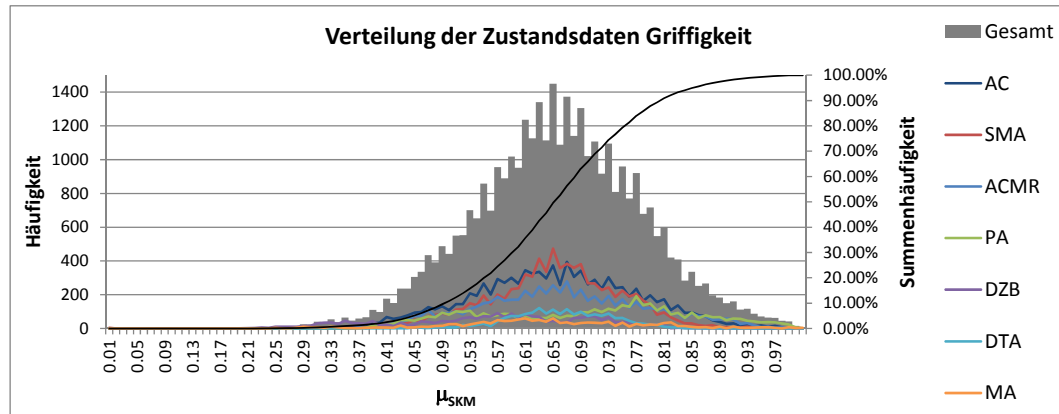
Abbildung und Tabelle zeigen:

- Die mittlere Profiltiefe aller Intervalle der Deckschichten mit einem Mittelwert von 0.86 mm liegt im Performancebewertungsbereich mittel [17]. Naturgemäß haben die Deckschichtgruppen PA (1,4 mm) und ACMR (0.96 mm) bessere Werte und die dichteren Deckschichten AC (0.72 mm) und SMA (0.74mm) tiefere. Diese Mittelwerte liegen noch im Bewertungsbereich ausreichend.
- Die Zementbetonbeläge weisen einen Mittelwert von 0.56 mm auf, der als kritisch bewertet wird. Hier gibt es auch wenige Intervalle mit sehr geringen (Min = 0.17 mm) Profiltiefen. Die Profiltiefen sind aber erwartungsgemäss bei Zementbetonoberflächen geringer.

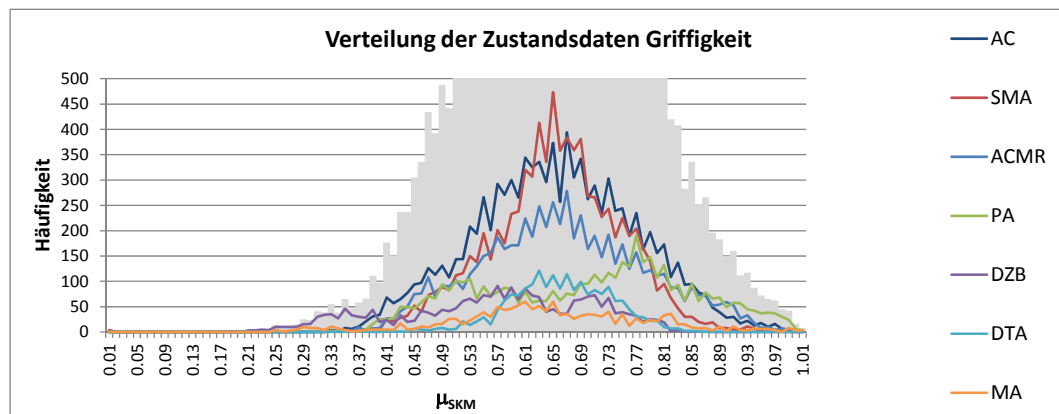
Auch hier haben die stark unterschiedlichen Altersstrukturen grosse Einflüsse auf die Verteilung der Texturwerte bei den einzelnen Deckschichtgruppen. So ergibt sich aus den Altersstrukturen, dass die Deckschichten PA und ACMR deutlich kürzere Alter ausweisen als die AC und SMA.

### 3.2.4 Verteilung der Zustandsdaten Griffigkeit

Die folgende Abbildung und Tabelle zeigen die statistischen Grössen der Verteilungen der Auswertegrösse Griffigkeit  $\mu_{SKM}$  [-]:



**Abb.10** Verteilung der Zustandsdaten Griffigkeit



**Abb.11** Verteilung der Zustandsdaten Griffigkeit

**Tab. 4** Statistische Werte der Zustandsdaten der Griffigkeit

| $\mu_{SKM}$ -Wert  | Gesamt | AC     | SMA    | ACMR   | PA     | DZB    | DTA    | MA     | Rest   |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Mittelwert         | 0.65   | 0.64   | 0.64   | 0.65   | 0.69   | 0.55   | 0.65   | 0.63   | 0.68   |
| Q85                | 0.77   | 0.77   | 0.74   | 0.79   | 0.84   | 0.70   | 0.73   | 0.79   | 0.78   |
| Q15                | 0.52   | 0.52   | 0.54   | 0.53   | 0.50   | 0.38   | 0.58   | 0.50   | 0.58   |
| Median             | 0.65   | 0.64   | 0.64   | 0.65   | 0.71   | 0.57   | 0.65   | 0.63   | 0.68   |
| Mode               | 0.64   | 0.66   | 0.64   | 0.66   | 0.76   | 0.56   | 0.62   | 0.64   | 0.68   |
| Standardabweichung | 0.121  | 0.117  | 0.094  | 0.121  | 0.150  | 0.139  | 0.072  | 0.142  | 0.100  |
| Varianz            | 0.015  | 0.014  | 0.009  | 0.015  | 0.022  | 0.019  | 0.005  | 0.020  | 0.010  |
| Kurtosis           | 0.066  | -0.313 | 0.084  | -0.437 | -0.936 | -0.628 | 0.263  | 0.262  | -0.052 |
| Schiefte           | -0.085 | 0.026  | -0.127 | 0.121  | -0.127 | -0.377 | -0.233 | -0.126 | -0.242 |
| Minimum            | 0.17   | 0.32   | 0.30   | 0.31   | 0.30   | 0.17   | 0.34   | 0.24   | 0.30   |
| Maximum            | 1.00   | 1.00   | 0.98   | 0.99   | 1.00   | 0.85   | 0.87   | 1.00   | 0.95   |
| Anzahl             | 36350  | 9836   | 8155   | 6702   | 4656   | 2419   | 1905   | 1423   | 1254   |

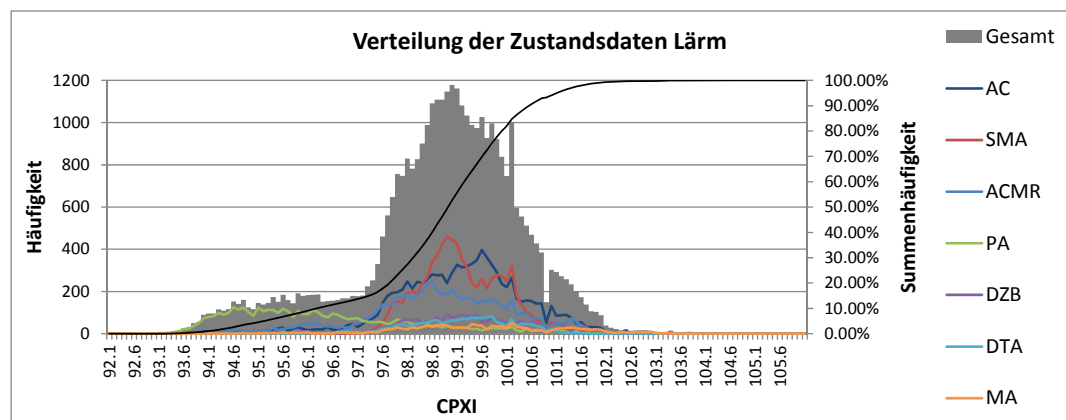
Die Abbildung und Tabelle zeigen:

- Die Griffigkeit aller Intervalle der Deckschichten mit einem Mittelwert von 0.65 liegt im Performancebewertungsbereich gut [10][17]. Alle Mittelwerte der einzelnen Deckschichtgruppen liegen in diesem Bereich. Die Zementbetondeckschichten weisen einen etwas tieferen Mittelwert von 0.55 auf, welcher immer noch bei der Bewertung mittel bis gut ist.
- In der Gesamtheit aller Intervalle weisen mehr als 85% der Intervalle Griffigkeitswerte von mehr als 0.55 auf, was als mittel bis gut taxiert wird. Lediglich etwa 1-2 % kritische Griffigkeitswerte von kleiner 0.35 traten auf. Dabei wurden zwei Minimalwerte von 0.17 bei einem Intervall auf einer Betonfahrbahn und ein Wert von 0.24 auf einem Gussasphaltintervall gemessen. Diese Werte sind als gefährlich einzustufen.

Auch hier haben die stark unterschiedlichen Altersstrukturen Einflüsse auf die Verteilung der Griffigkeitswerte bei den einzelnen Deckschichtgruppen. Es ist zu beachten, dass mit zunehmendem Alter die Griffigkeit grundsätzlich abnimmt. So zeigt sich aus den Altersstrukturen, dass die Deckschichten PA und ACMR deutlich kürzere Alter ausweisen als die AC und SMA.

### 3.2.5 Verteilung der Zustandsdaten Lärmemissionen

Die folgende Abbildung und Tabelle zeigen die statistischen Größen der Verteilungen der Auswertegröße Lärmemissionen CPXI [dB(A)]:



**Abb.12** Verteilung der Zustandsdaten Lärmemission

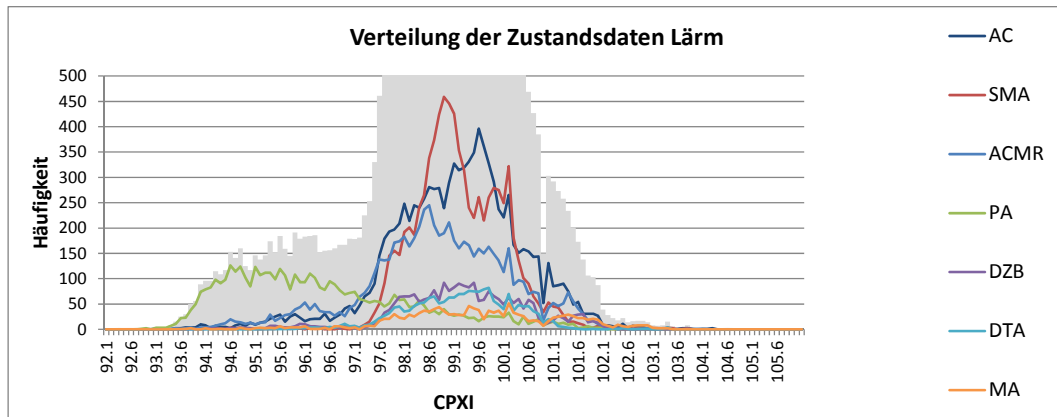


Abb.13 Verteilung der Zustandsdaten Lärmemission

Tab. 5 Statistische Werte der Zustandsdaten der Lärmemission

| CPXI-Wert                 | Gesamt | AC     | SMA    | ACMR   | PA     | DZB    | DTA    | MA     | Rest   |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>Mittelwert</b>         | 98.61  | 98.96  | 99.03  | 98.58  | 96.26  | 99.09  | 99.08  | 99.45  | 99.35  |
| <b>Q85</b>                | 100.15 | 100.30 | 100.00 | 100.10 | 98.30  | 100.45 | 100.22 | 101.25 | 101.00 |
| <b>Q15</b>                | 97.20  | 97.70  | 98.15  | 97.25  | 94.40  | 97.90  | 97.95  | 97.90  | 97.75  |
| <b>Median</b>             | 98.80  | 99.05  | 98.95  | 98.60  | 95.90  | 99.10  | 99.15  | 99.40  | 99.20  |
| <b>Mode</b>               | 98.80  | 99.45  | 98.70  | 98.40  | 94.65  | 99.30  | 99.60  | 98.60  | 97.70  |
| <b>Standardabweichung</b> | 1.660  | 1.348  | 0.926  | 1.500  | 1.859  | 1.334  | 1.070  | 1.626  | 1.508  |
| <b>Varianz</b>            | 2.754  | 1.816  | 0.857  | 2.249  | 3.456  | 1.779  | 1.145  | 2.642  | 2.275  |
| <b>Kurtosis</b>           | 0.767  | 1.308  | 2.535  | 0.449  | -0.104 | 0.974  | 0.497  | 0.308  | -0.048 |
| <b>Schiefte</b>           | -0.739 | -0.523 | -0.059 | -0.419 | 0.738  | -0.478 | -0.084 | -0.280 | 0.252  |
| <b>Minimum</b>            | 92.65  | 92.95  | 93.60  | 92.95  | 92.65  | 93.95  | 95.55  | 93.50  | 94.60  |
| <b>Maximum</b>            | 104.15 | 104.15 | 103.65 | 103.80 | 101.95 | 102.15 | 103.25 | 103.25 | 103.95 |
| <b>Anzahl</b>             | 36350  | 9836   | 8155   | 6702   | 4656   | 2419   | 1905   | 1423   | 1254   |

Die Abbildungen und die Tabelle zeigen:

- Die Lärmemissionswerte aller Intervalle der Deckschichten weisen Mittelwerte zwischen 96.2 und 99.4 dB(A) auf. Die kleine Differenz von 3.2 dB(A) weist auf eine gewisse Homogenität der Lärmemissionen hin.
- Erstaunlich klein sind die Differenzen zwischen den jüngeren Deckschichten ACMR und den in der Altersstruktur deutlich älteren Deckschichten AC und SMA.
- Einen deutlich tieferen Emissionsmittelwert (96.2 dB(A)) weisen die offenporigen PA Deckschichten auf.
- Die Zementbetondecken sowie die älteren noch vorhandenen Teerasphalt- und Gussasphaltdeckschichten weisen die ungünstigsten Emissionsmittelwerte auf. Die Differenzen von nur 1 bis 2 dB(A) sind jedoch erstaunlich gering.

Auch hier haben die stark unterschiedlichen Altersstrukturen Einflüsse auf die Verteilung der Emissionswerte bei den einzelnen Deckschichtgruppen. Es ist zu beachten, dass mit zunehmendem Alter gerade bei den offenporigen Deckschichten die Qualität der Lärmreduktion grundsätzlich abnimmt.

### 3.2.6 Prüfung der Zustandswerte auf Normalverteilung

Für diese Prüfung auf Normalverteilung wird der Kolmogorov-Smirnov-Test verwendet. Dieser testet, ob die Daten der Grundgesamtheit einer Stichprobe mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % normalverteilt sind.

**Tab. 6** Ergebnisse Prüfung der Zustandswerte auf Normalverteilung

| Nullhypothese                                                                      | Test               | Signif. | Entscheidung           |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------|------------------------|
| Die Verteilung von MPDL ist normal mit Mittelwert 0.86 und Standardabw. 0.366      | Kolmogorov-Smirnov | 0.05    | Nullhypothese ablehnen |
| Die Verteilung von $\mu$ SKM ist normal mit Mittelwert 0.65 und Standardabw. 0.121 | Kolmogorov-Smirnov | 0.05    | Nullhypothese ablehnen |
| Die Verteilung von CPXI ist normal mit Mittelwert 98.61 und Standardabw. 1.660     | Kolmogorov-Smirnov | 0.05    | Nullhypothese ablehnen |

Die Abbildungen zur Prüfung der Zustandswerte auf Normalverteilung enthält Anhang 4.

Die Prüfung auf Normalverteilung zeigt:

- Die Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Test zeigen, dass die Grundgesamtheit aller drei Größen Texturprofilltiefe, Griffigkeit und Lärmemission aufgrund der vorliegenden Stichproben nicht normalverteilt sind.
- Im weiteren deuten Schiefe und Kurtosis aller Verteilungen zudem darauf hin, dass sowohl die Stichproben als auch die Grundgesamtheiten nicht der Normalverteilung folgen.
- Sind sowohl die Stichprobe als auch die Grundgesamtheit nicht normalverteilt, kann die Pearson-Korrelationsanalyse angewendet werden.

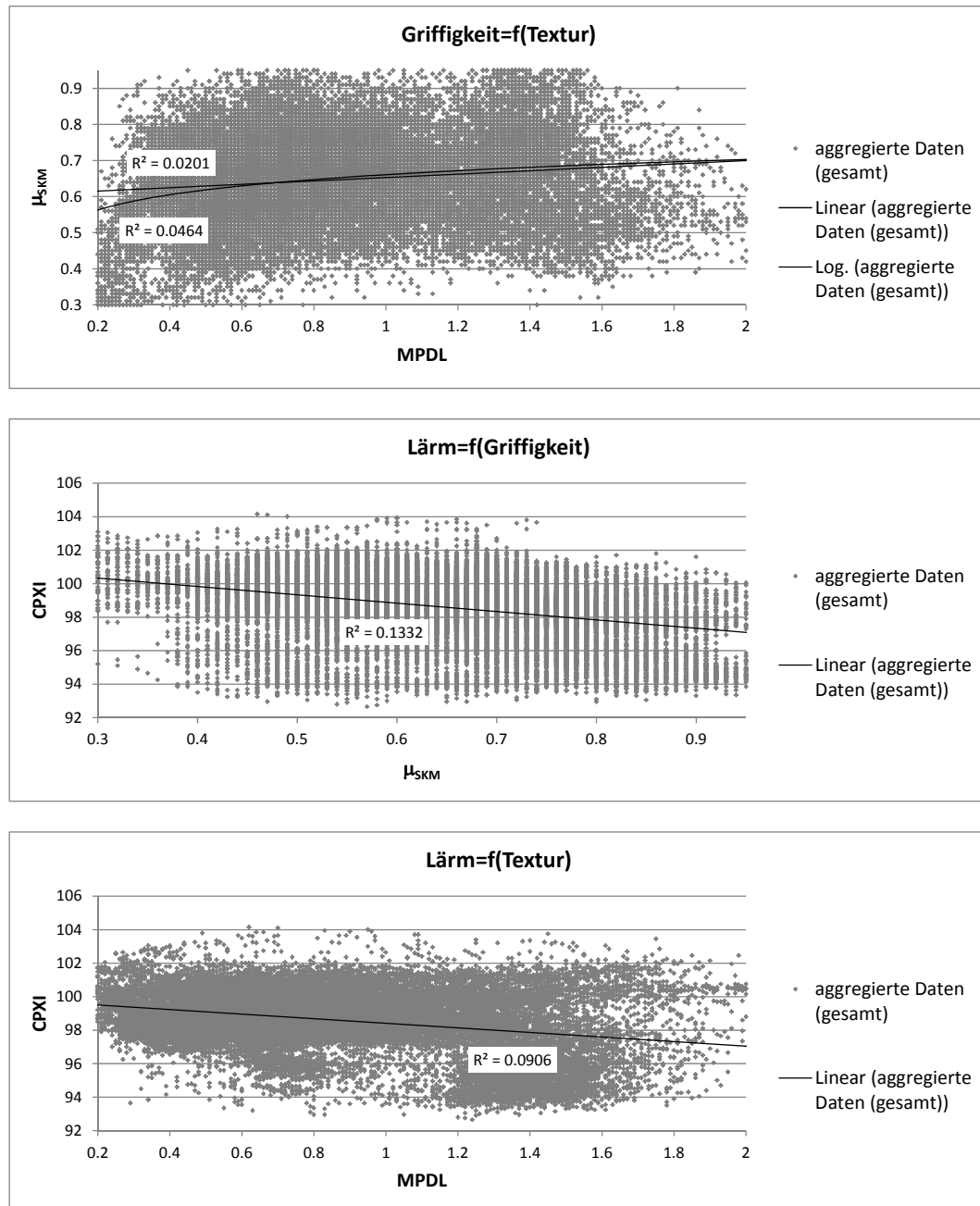
## 3.3 Analysen der Zusammenhänge

### 3.3.1 Korrelationen Hauptdatensatz

Die folgende Abbildung zeigt die Zusammenhänge

- Griffigkeit in Abhängigkeit zur Texturprofilltiefe der Fahrbahnoberfläche
- Lärmemission Fahrbahn in Abhängigkeit zur Griffigkeit der Fahrbahn
- Lärmemission Fahrbahn in Abhängigkeit zur Texturprofilltiefe

über alle Intervalle mit verschiedensten Deckschichten und Alter der Deckschichten sowie die Güte der Zusammenhänge.



**Abb.14** Zusammenhänge der Daten des Hauptdatensatzes

Die Abbildungen zeigen:

- Grundsätzlich bestehen bei allen Zusammenhängen gemessen an den Regressionskoeffizienten der linearen und der exponentiellen Regressionen nur leichte Trendabhängigkeiten. Die Pearsonkorrelationen bestätigen die unsicheren Zusammenhänge, weist jedoch etwas stärkere Korrelationen aus.

Im Einzelnen ergibt sich folgendes Bild:

- Der Zusammenhang Griffigkeit in Funktion der Textur (Makrotextur) ist sehr gering und unsicher. Der Trend wonach mit zunehmender Texturprofilltiefe auch zunehmende

Griffigkeitswerte vorhanden sind ist plausibel. Dieser Trend wird auch in der Literatur bestätigt.

- Der Zusammenhang Lärmemission in Funktion der Griffigkeit ist etwas besser. Der Trend zeigt mit zunehmender Griffigkeit eine Abnahme der Lärmemissionen. In der Literatur wird dieser Zusammenhang so nicht dargestellt.
- Der Zusammenhang Lärmemission in Funktion der Textur (Makrotextur) ist sehr gering und sehr unsicher. Der Trend wonach mit zunehmender Texturproftiefe (Makrotextur) die Lärmemissionen abnehmen ist plausibel. Es ist aus der Literatur bekannt, dass openporige Deckschichten geringere Lärmemissionen aufweisen als dichte.
- Es ist zu vermuten, dass bei eher schnell befahrenen Strassen (Autobahnen) die Makrotextur der Textur die Griffigkeit stärker beeinflusst als die Mikrotextur.
- Bei den Ergebnissen dieser Zusammenhänge ist zu beachten und berücksichtigen, dass bei der Gesamtheit des Hauptdatensatzes die verschiedensten Deckschichtarten mit enthalten sind, welche im Texturbereich und damit im Lärmemissionsverhalten sehr unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Dadurch können sich deutlichere Ausprägungen in die eine Richtung und die andere Richtung bei einzelnen Deckschichtarten beeinflussen resp. ausgleichen, so dass die Zusammenhänge gesamthaft weniger starke Abhängigkeiten zeigen.
- Im Weiteren sind grundsätzlich die grossen Bandbreiten der Alter der Deckschichten zu beachten, welche bei den einzelnen Deckschichtengruppen stark variieren. So ist z.B. der Altersbereich der Teer-Asphalt Deckschichten und der Asphaltbetone deutlich grösser als bei den Splittmastixasphalten und den Drainasphalten.

Gesamthaft können folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

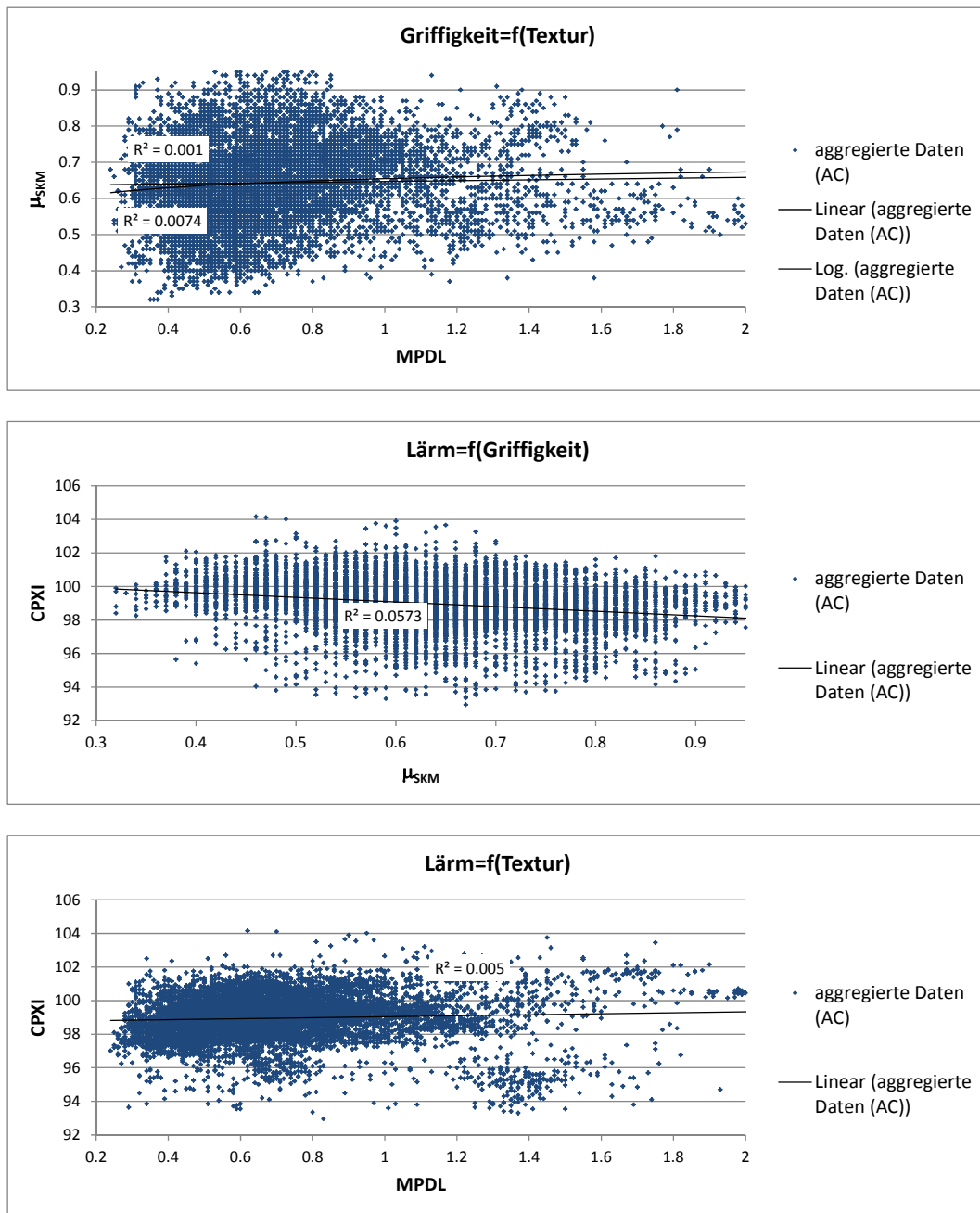
- Die Daten des Hauptdatensatzes vermögen einerseits nur geringe Abhängigkeiten erkennen lassen, andererseits sind die Trends der Zusammenhänge aber ersichtlich und plausibel.
- Die Abhängigkeit der Griffigkeit von der Texturproftiefe (Makrotextur) ist kaum nachweisbar. Auch der Zusammenhang Emissionen in Funktion der Texturproftiefe ist nicht gesichert. Beide Zusammenhänge zeigen jedoch plausible Trends, indem bei zunehmender Textur die Griffigkeit zunimmt und die Lärmemissionen abnehmen.
- Folgerichtig wird zudem aufgrund dieser Umstände der Zusammenhang Abnehmende Lärmemissionen bei zunehmender Griffigkeit, etwas stärker, allerdings ebenfalls nur unsicher, ausgewiesen.

In den folgenden Abschnitten werden nun die Resultate der Untersuchungen zu den Zusammenhängen der einzelnen Deckschichtgruppen aufgezeigt (Ziffer 3.3.2). Im Weiteren werden zur Klärung der Fragen die Ergebnisse Textur in Funktion des Belagsalters für verschiedenen Deckschichtgruppen (Ziffer 3.3.39) und die Ergebnisse Griffigkeit in Funktion der Textur (Ziffer 3.3.4) beleuchtet.

### 3.3.2 Zusammenhänge bei den einzelnen Deckschichtgruppen

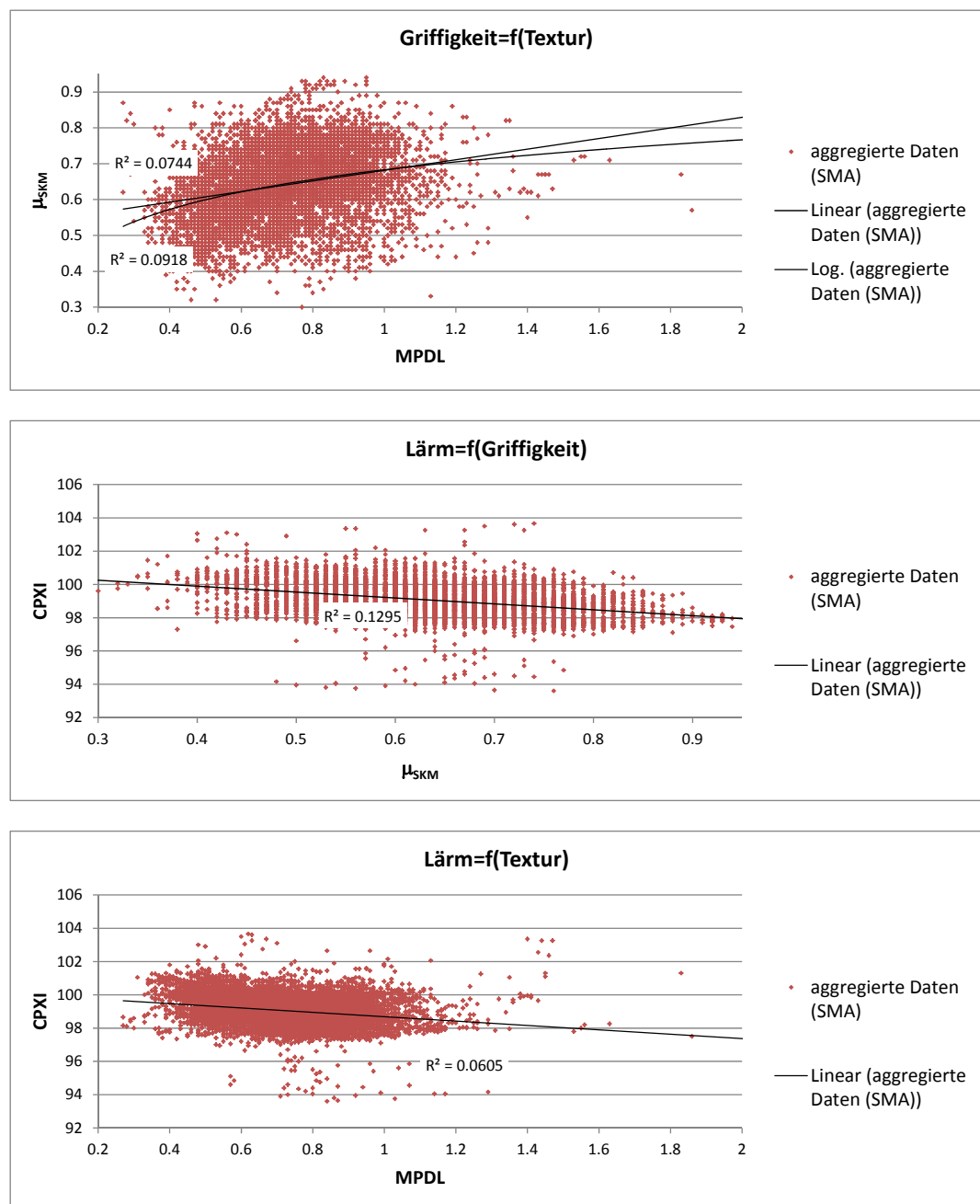
Im Folgenden sind die Ergebnisse der Analysen der Zusammenhänge für die Deckschichtgruppen AC, SMA, ACMR, PA, DTA, MA und DZB aufgezeigt.

## Asphaltbetone AC



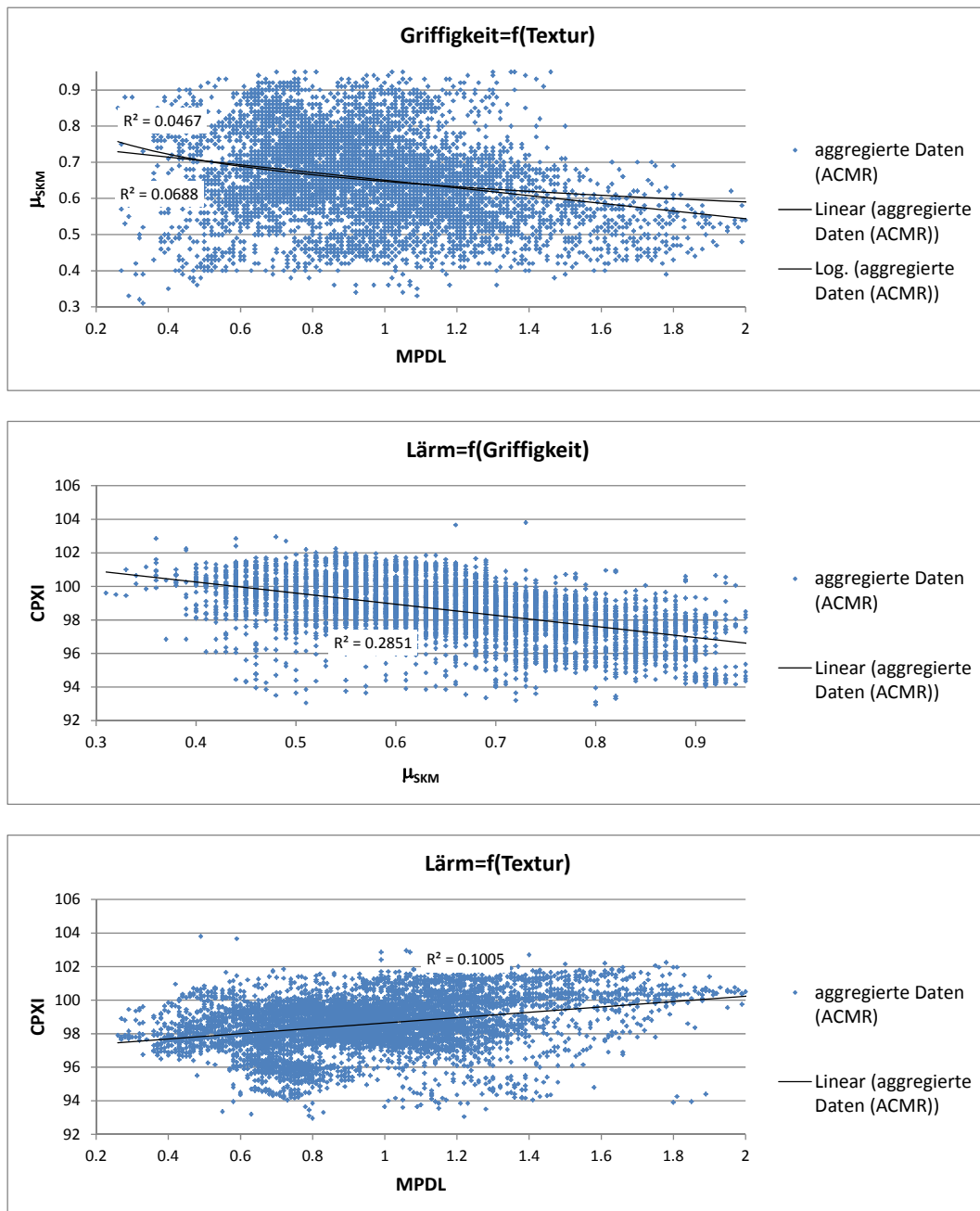
**Abb.15** Asphaltbetone AC

## Splittmastixasphalte SMA



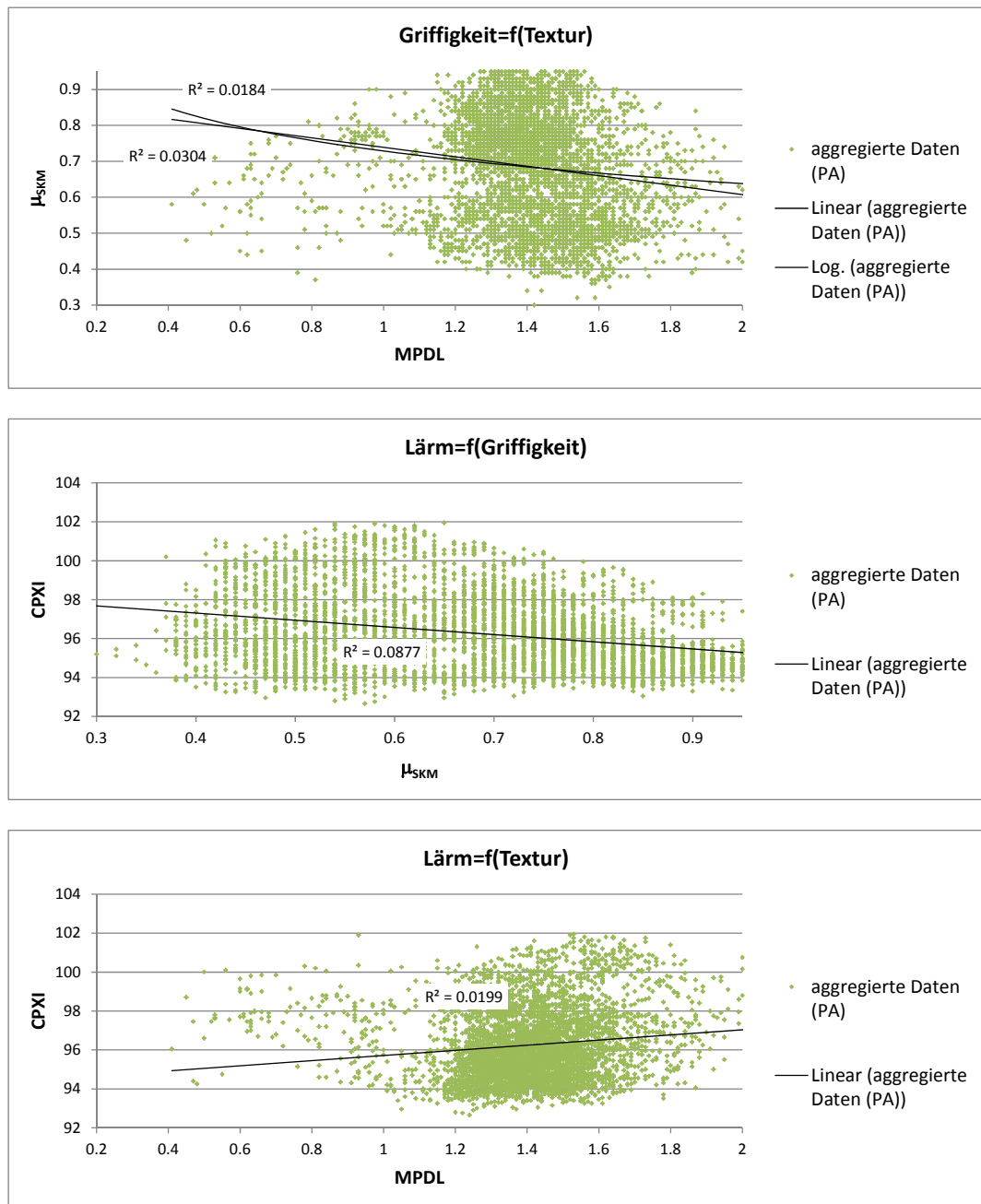
**Abb.16** Splittmastixasphalte SMA

## Rauhasphalte ACMR



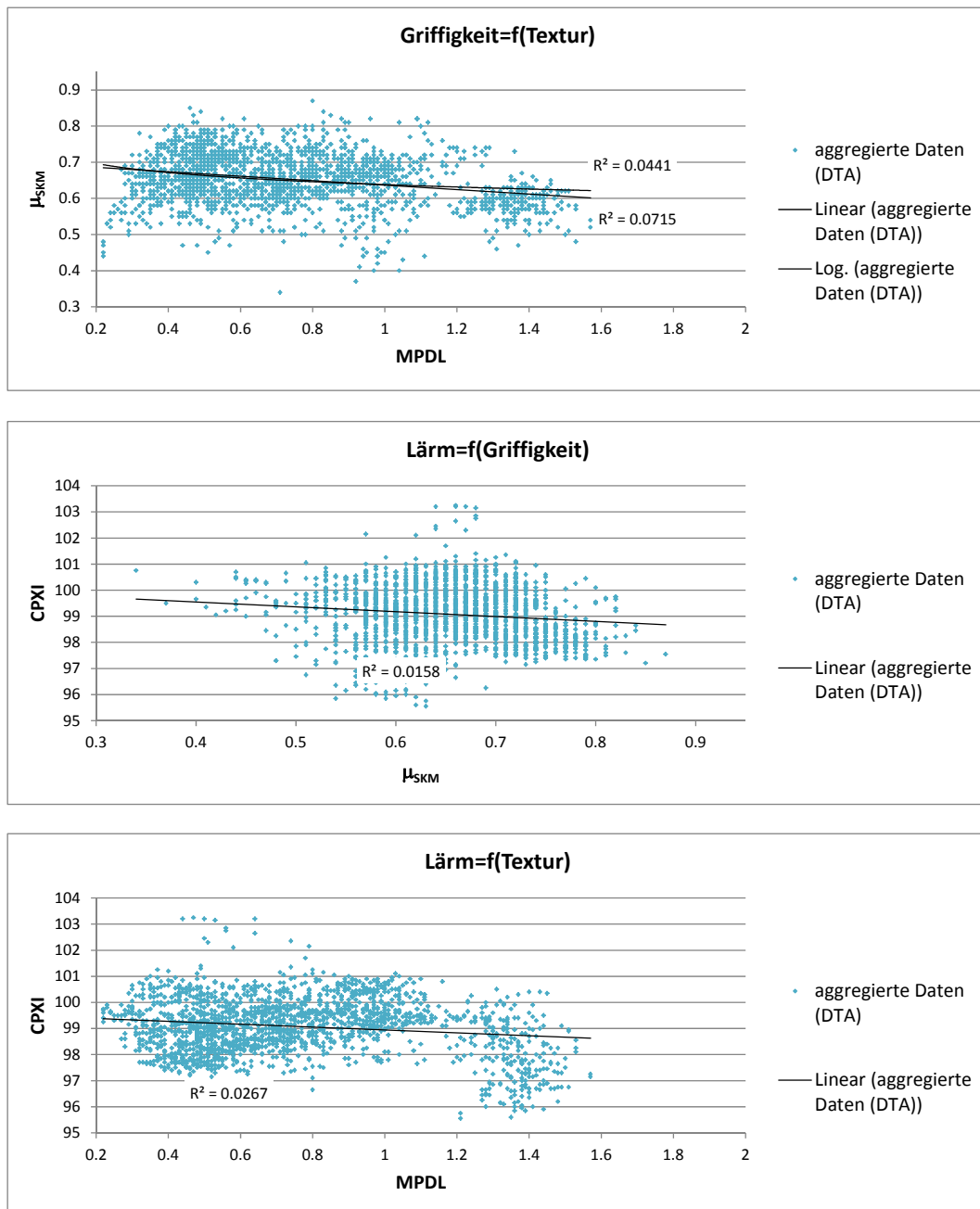
**Abb.17** Rauhasphalte ACMR

### Offenporige Asphalte PA (Drainasphalte)



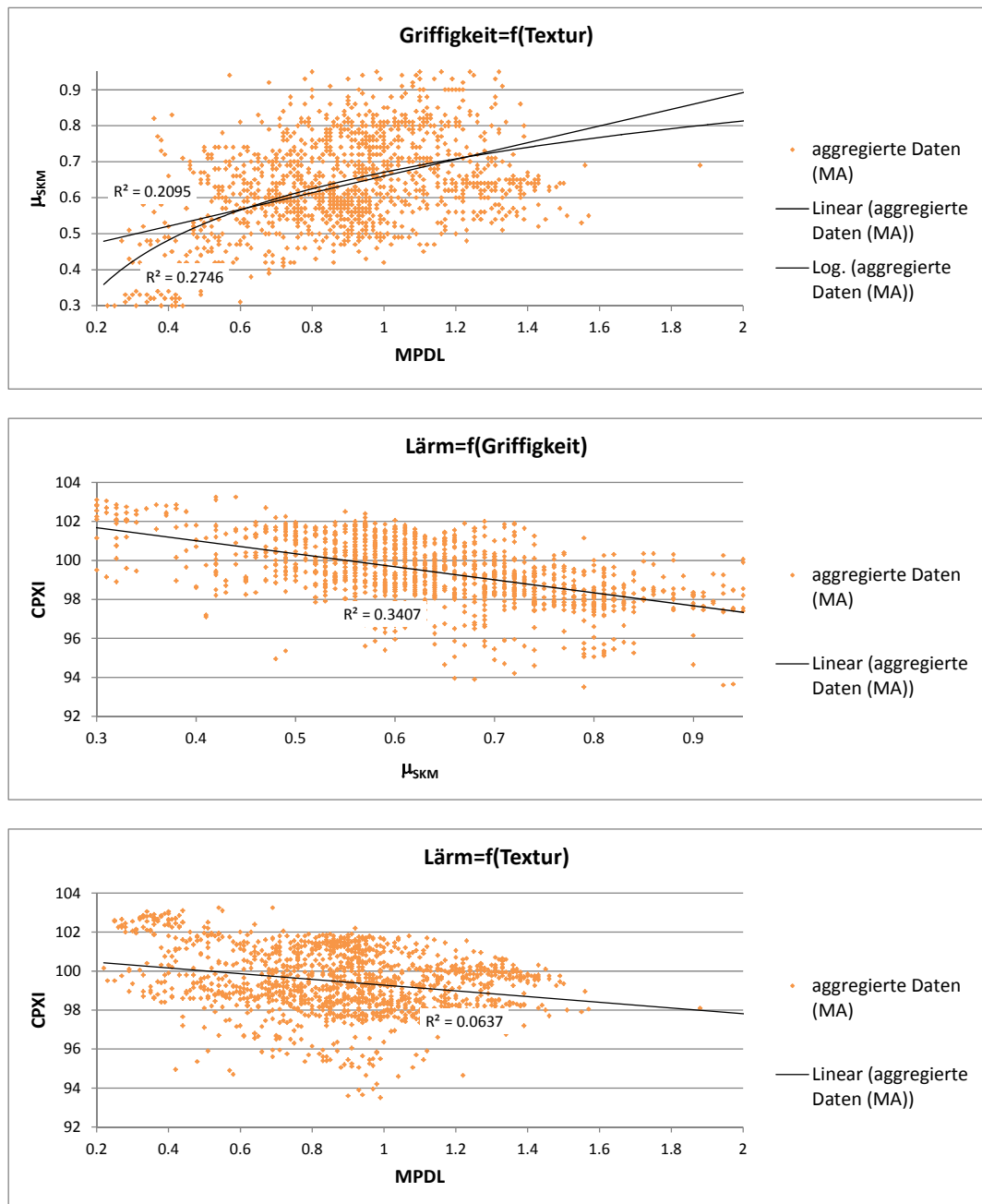
**Abb.18** Offenporige Asphalte PA (Drainasphalte)

## Teer-Asphalte DTA



**Abb.19** Teer-Asphalte DTA

## Gussasphalte MA



**Abb.20** Gussasphalte MA

## Zementbetondecken DZB

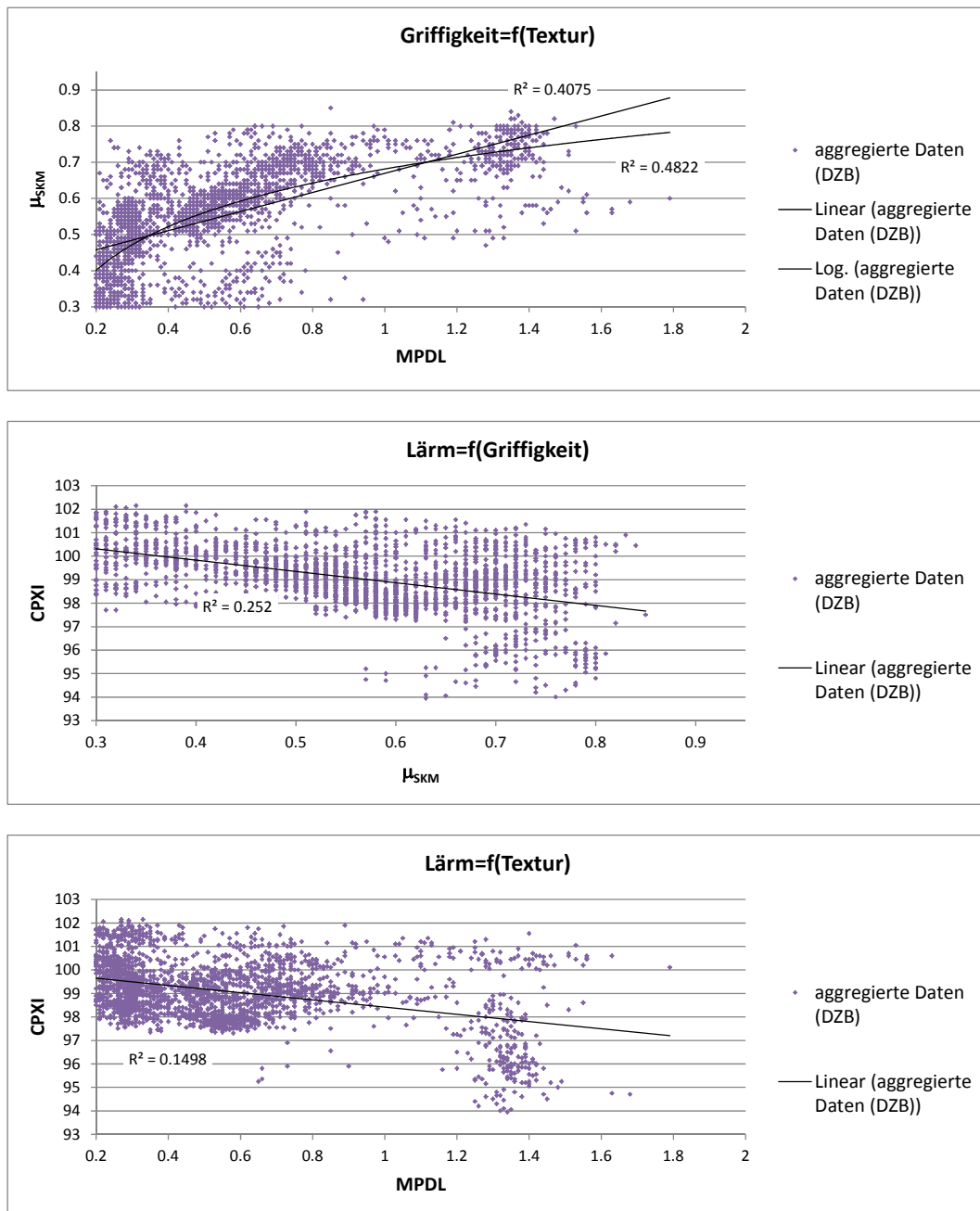


Abb.21 Zementbetondecken DZB

**Tab. 7** Relevanzen der Zusammenhänge (Korrelationen)

| Korrelationen                                    | Gesamt  | AC      | SMA     | ACMR    | PA      | DZB     | DTA     | MA      | Rest    |
|--------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b><math>\mu\text{SKM}=f(\text{MPDL})</math></b> |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Pearson                                          | 0.1395  | 0.0320  | 0.2728  | -0.2623 | -0.1743 | 0.6384  | -0.2674 | 0.4577  | 0.0466  |
| R2                                               | 0.0195  | 0.0010  | 0.0744  | 0.0688  | 0.0304  | 0.4075  | 0.0715  | 0.2095  | 0.0022  |
| <b><math>\text{CPXI}=f(\text{MPDL})</math></b>   |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Pearson                                          | -0.2996 | 0.0704  | -0.2459 | 0.3169  | 0.1411  | -0.3871 | -0.1634 | -0.2525 | 0.3961  |
| R2                                               | 0.0898  | 0.0050  | 0.0605  | 0.1005  | 0.0199  | 0.1498  | 0.0267  | 0.0637  | 0.1569  |
| <b><math>\text{CPXI}=f(\mu\text{SKM})</math></b> |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Pearson                                          | -0.3652 | -0.2393 | -0.3598 | -0.5340 | -0.2962 | -0.5020 | -0.1257 | -0.5837 | -0.2589 |
| R2                                               | 0.1334  | 0.0573  | 0.1295  | 0.2851  | 0.0877  | 0.2520  | 0.0158  | 0.3407  | 0.0670  |

Die Ergebnisse der Analyse der Zusammenhänge und deren Relevanzen ergeben folgende Erkenntnisse:

- Generell über alle Deckschichtgruppen betrachtet, können praktisch keine Zusammenhänge erkannt werden, mit Ausnahme der Zementbetondeckschichten, welche schwache bis mittlere Abhängigkeiten aufweisen. Dabei ist – wie eingangs erwähnt – zu berücksichtigen, dass sowohl die vorhandenen Deckschichten sehr verschiedene Alter aufweisen und auch die Deckschichtgruppen unterschiedliche Altersstrukturen und damit Durchschnittsalter enthalten.
- Es besteht ein einheitlicher über alle Deckschichtgruppen – allerdings nicht sehr eng und je Deckschichtgruppe unterschiedlich starker – Zusammenhang zwischen der Lärmemission und der Griffigkeit auf der Fahrbahn. Mit zunehmender Griffigkeit nehmen die Lärmemissionen ab.
- Die Analyse ergibt keinen einheitlichen Zusammenhang zwischen der Lärmemission und der Texturproftiefe bei den verschiedenen Deckschichtgruppen. Auch unter Berücksichtigung des Texturproftiefeniveaus (Mittelwerte je Deckschichtgruppe) ist keine Tendenz erkennbar. Immerhin zeigen die dichten Beläge eine ähnliche Abhängigkeit – schwache, tendenzielle Abnahme Lärmemissionen mit zunehmender Texturproftiefe - wie beim Zusammenhang Lärmemission und Griffigkeit. Die offenenporigen Beläge (PA und ACMR) hingegen weisen bei Zunahme der Texturproftiefe eine unplausible Zunahme der Lärmemissionen aus. Wie weit dies in Verbindung mit dem Texturtiefeniveau steht bleibt unbekannt.
- Eine gegensätzliche Abhängigkeit zwischen der Griffigkeit und der Texturproftiefe liegt bei den verschiedenen Deckschichtgruppen vor. Die tendenziellen Zusammenhänge sind indessen sehr schwach. Während bei den dichten Deckschichtgruppen bei zunehmender Texturproftiefe eine Zunahme der Griffigkeit vorliegt, zeigen die offenenporigen Beläge eine abnehmende Griffigkeit. Wie weit auch hier allenfalls eine Verbindung mit dem Texturtiefeniveau besteht ist unbekannt.

Unerklärlich bleiben folgende Feststellungen aus der Analyse der Daten:

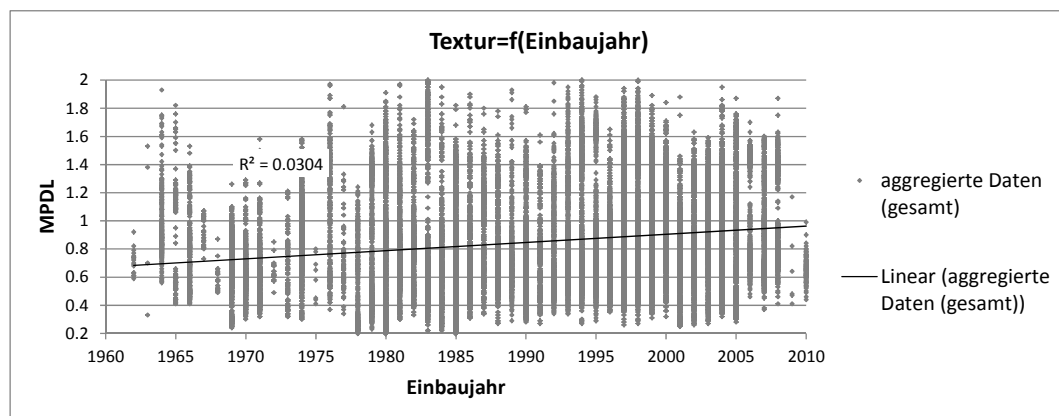
- Wieso nimmt bei den Deckschichtgruppen ACMR und PA bei der Zunahme von MPDL die Griffigkeit  $\mu\text{SKM}$  ab?
- Wieso nimmt bei den Deckschichtgruppen ACMR und PA bei der Zunahme von MPDL die Lärmemission CPXI zu?
- Könnte dies mit dem Verlust an positiver Wirkung bei fortgeschrittenem Alter von ACMR und PA zusammenhängen, weil bekannt ist [ASTRA. Lärmbericht je Jahr], dass nach einer gewissen Anzahl Jahre die Wirkung verloren geht. Die Durchschnittsalter der ACMR und PA sind höher.
- Könnte das auch so bei der Griffigkeit sein, dass offenenporige Beläge die guten Eigenschaften der Makrotextur verlieren und damit die Griffigkeit nach einer gewissen Zeit auch teilweise verloren geht?

Zur Beurteilung dieser Fragen wurden die folgenden Auswertungen und Analysen durchgeführt:

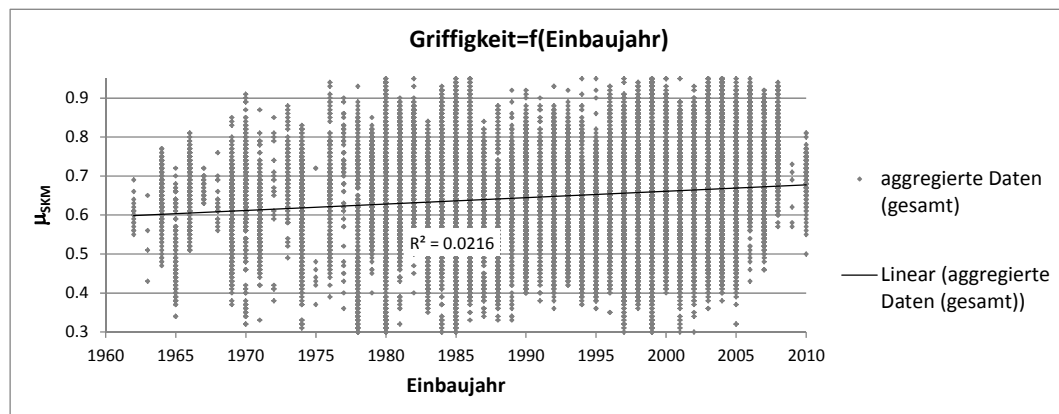
- Gesamtdatensatz: Abhängigkeit der Texturprofiltiefe, der Griffigkeit und der Lärmemission vom Einbaujahr (Alter) der Deckschicht
- Datensätze der einzelnen Deckschichtgruppen: Abhängigkeit der Texturprofiltiefe, der Griffigkeit und der Lärmemission vom Einbaujahr (Alter) der Deckschicht (Abb. im Anhang 5)
- Gesamtdatensatz: Zusammenhänge zwischen Griffigkeit und Textur, Lärmemissionen und Textur und Lärmemissionen und Griffigkeit für bestimmte Altersstrukturen der Deckschichten
- Datensätze der einzelnen Deckschichtgruppen: Zusammenhänge zwischen Griffigkeit und Textur, Lärmemissionen und Textur und Lärmemissionen und Griffigkeit für bestimmte Altersstrukturen der Deckschichten (Abbildungen im Anhang 5)

### 3.3.3 Texturprofiltiefe, Griffigkeit und Lärmemission und Alter der Deckschichten

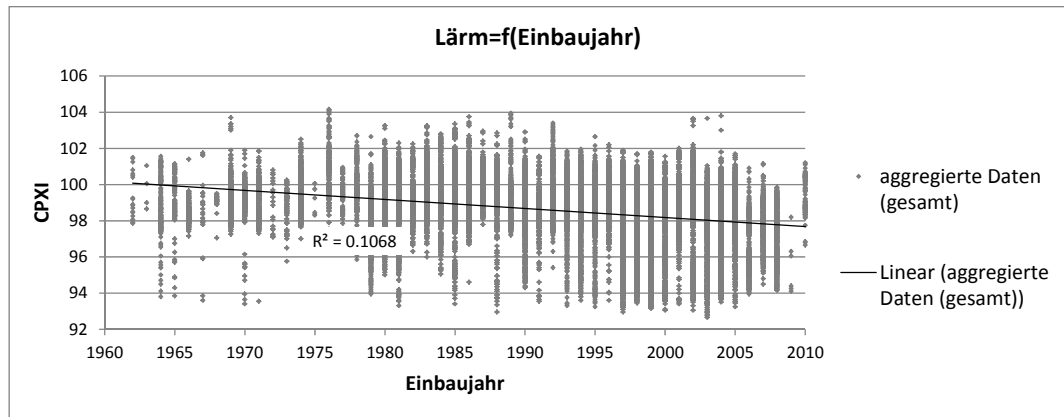
Die folgenden drei Abbildungen zeigen die Abhängigkeiten der Texturprofiltiefe, Griffigkeit und Textur vom Einbaujahr (Alter) der Deckschicht.



**Abb.22** Texturprofiltiefe in Funktion des Einbaujahrs (Alter) der Deckschicht



**Abb.23** Griffigkeit in Funktion des Einbaujahrs (Alter) der Deckschicht



**Abb.24** Lärmemission in Funktion des Einbaujahrs (Alter) der Deckschicht

Die Abbildungen in Anhang 5 zeigen:

- Textur und Griffigkeit haben keinen Zusammenhang mit dem Alter der Deckschichten. Dabei ist zu beachten, dass die verschiedenen Deckschichtgruppen stark unterschiedliche Altersstrukturen aufweisen.
- Einen allerdings schwachen und unsicheren Trend zeigt sich bei den Lärmemissionen, indem mit abnehmendem Einbaujahr (Alter) die Lärmemissionen abnehmen. Die Differenz innerhalb von 45 Jahren beträgt lediglich 2 dB(A). auch hier ist zu berücksichtigen, dass die verschiedenen Deckschichtgruppen stark unterschiedliche Altersstrukturen aufweisen.
- Die Analyse je Deckschichtgruppe (Abbildungen im Anhang 5) ergab für die Deckschichtgruppen AC und SMA mit einem Einbauzeitspektrum von über 40 Jahren keine Abhängigkeit.
- SMA mit hohem Alter sind bzgl. Lärmemission ähnlich wie neuere SMA (siehe Anhang 5).
- Ältere ACMR haben im Mittel grössere Lärmemissionen als jüngere ACMR (siehe Anhang 5).

### 3.3.4 Zusammenhänge in Abhängigkeit der Altersstruktur der Deckschichtgruppe

Zur weiteren Klärung der zwischenzeitlich sich eröffneten Fragen wurden die Zusammenhänge Griffigkeit und Textur, Lärmemissionen und Griffigkeit und Lärmemissionen und Textur nach ihren Altersstrukturen für die Altersgruppen (Liegezeit Deckschicht) > 45 Jahre, > 35 Jahre, > 25 Jahre, > 15 Jahre, 12 Jahre, 10 Jahre, 8 Jahre und 5 Jahre näher analysiert. Die Auswertung betraf jeweils sowohl den Gesamtdatensatz als auch die Datensätze der einzelnen Deckschichtgruppen.

Sämtliche Abbildungen zu diesen Ergebnissen sind im Anhang 5 zusammengestellt.

Aus diesen Auswertungen und Analysen ergeben sich folgende Erkenntnisse:

Aus den Datensätzen aller Deckschichten zusammen zeigen sich bei allen Altersgruppen praktisch keine Abhängigkeiten, mit Ausnahme schwacher Zusammenhänge Lärmemissionen in Abhängigkeit der Griffigkeit bei den jüngeren Altersgruppen 8, 10 und 12 Jahre Liegezeit der Deckschichten. Hier bestätigt sich der Trend, wonach mit zunehmender Griffigkeit die Lärmemissionen abnehmen.

Bei den einzelnen Deckschichtgruppen sind einerseits keine bis sehr schwache Abhängigkeiten und andererseits keine einheitlichen Trends bei den Zusammenhängen erkennbar. Ausnahme bildet die Deckschichtgruppe ACMR. Hier ist bei allen Altersgruppen eine mehr oder weniger deutliche, tendenzielle Abhängigkeit der Lärmemission von der Griffigkeit zu erkennen. Mit zunehmender Griffigkeit nehmen die Lärmemissionen ab. Der bereits mehrfach erkannte Trend bestätigt sich hier für die Deckschichtgruppe ACMR.

Bei den älteren Zementbetondeckschichten (> 45 Jahre, > 35 Jahre und > 25 Jahre Liegezeit) zeigen sich schwache bis mittel starke Abhängigkeiten beim Zusammenhang Lärmemission und Griffigkeit. Mit zunehmender Griffigkeit nehmen auch hier die Lärmemissionen ab. Dieser bereits früher erkannte Trend wird hier bestätigt.

## 4 Erkenntnisse

### 4.1 Erkenntnisse aus den Auswertungen und Analysen

Im Folgenden sind die aus den Auswertungen und Analysen hervorgegangenen Erkenntnisse zusammengestellt:

1. Die im Datensatz der Gesamtdaten festgestellten Einzelwerte bei der Textur, der Griffigkeit und den Lärmemissionen haben naturgemäss eine grosse Streubreite, sind doch die sehr unterschiedlichen Arten und Alter von Deckschichten und die zeitliche Entwicklung derer Oberflächeneigenschaften sehr verschieden.

Von grundsätzlichem Interesse sind sowohl die Mittelwerte (Durchschnitt) als auch die Minimalwerte (95 % Quantil). Dabei zeigt sich folgendes:

Die Mittelwerte der Texturprofiltiefe MPDL (Makrotextur) mit 0.8 mm und mit mehr als 85 % der Deckschichten höher als 0.5 mm liegen für das Drainagevermögen im günstigen Texturbereich [vgl.8]. Eine ähnliche Bewertung bestätigt auch [30].

Die Mittelwerte der Griffigkeit mit 0.65 als auch die Minimalwerte (95 % Quantil) zeigen ein gutes Griffigkeitsniveau auf den Nationalstrassen.

Während der Mittelwert der Lärmemission der Fahrbahnen über alle Erhebungsintervalle bei rund 98.6 dB(A) liegt und die Mittelwerte der einzelnen Deckschichten relativ geringe Unterschiede von maximal etwa 2 dB(A) ausweisen, zeigen erwartungsgemäss die offenporigen Asphalte einen deutlich tieferen Emissionsmittelwert von ca. 96.2 dB(A).

2. Es zeigen sich zwar bei allen drei Zusammenhängen Griffigkeit - Textur, Lärmemissionen - Griffigkeit und Lärmemissionen - Textur quantitative Zusammenhänge, welche aber mehrheitlich schwach sind und deshalb die Abhängigkeiten als sehr unsicher bewertet werden müssen. Dabei kann festgestellt werden, dass die Zusammenhänge bei den Zementbetonfahrbahndecken deutlicher sind als bei den bitumenhaltigen Deckschichten.
3. Beim Zusammenhang Griffigkeit und Textur zeigt sich ein heterogenes Bild bzgl. Abhängigkeit Griffigkeit und Texturprofiltiefe. Während beim Gesamtdatensatz und bei den dichten Belägen (AC, SMA, MA) die Tendenz mit zunehmender Texturprofiltiefe nimmt die Griffigkeit zu vorliegt, zeigt sich bei den Deckschichten PA und ACMR die entgegengesetzte, allerdings sehr schwache, Abhängigkeit. Eine mögliche Erklärung für die nur schwache Abhängigkeit können die Rezepturänderung (Hohlraumgehalt) und die anfänglichen Schwierigkeiten beim Einbau sein.
4. Aufgrund des bei den Deckschichten uneinheitlichen Zusammenhangs Griffigkeit in Abhängigkeit der Textur (Makrotextur) lässt sich die Griffigkeitsmessung nicht durch die Texturmessung (Mittlere Profiltiefe Makrotextur) allein ersetzen.
5. Ein durchwegs erkennbarer Zusammenhang zwischen der Lärmemission und der Griffigkeit liess sich sowohl im Gesamtdatensatz als auch zum Teil deutlich und zum Teil weniger deutlich bei den einzelnen Deckschichtgruppen erkennen. Der Trend ist einheitlich, die Richtung der Abhängigkeit homogen. Der Zusammenhang

zeigt, dass mit zunehmender Griffigkeit die Lärmemissionen abnehmen, was in dieser Weise bisher kaum festgehalten wurde (Literatur) und als durchaus günstig bewerten werden könnte. Allerdings lässt sich die Abhängigkeit im Rahmen der vorliegenden Untersuchung technisch nicht plausibel erklären, weil sie offenbar mit den spezifischen, materialtechnischen Eigenschaften der Mischgüter und den entsprechenden Einbauverfahren der verschiedenen Deckschichten stehen. Es wäre möglich, dass durch den Bindemittelanteil, die Gesteinsexposition und der korrespondierende Hohlraum die Zusammenhänge erklärbar machen können.

6. Auch der Zusammenhang Lärmemission und Textur erweist sich bei Betrachtung der verschiedenen Deckschichtgruppen als uneinheitlich. Während beim Gesamtdatensatz mit zunehmender Texturprofiltiefe die Lärmemission abnimmt und das auch bei den dichteren Deckschichten SMA und MA zutrifft, erweisen sich die ACMR und PA entgegengesetzt.

Diese Gegensätzlichkeit hat sich auch bereits beim Zusammenhang Griffigkeit und Textur gezeigt.

7. Werden die Zusammenhänge Griffigkeit und Textur und Lärm und Textur zusammen betrachte zeigt sich mit Ausnahme der Deckschichtgruppen ACMR und PA ein einheitlich Bild, wonach mit zunehmender Textur die Griffigkeit zunimmt und die Lärmemission abnehmen. Dass die Lärmemissionen auch mit zunehmender Griffigkeit abnehmen, unterstützt die Erkenntnis, dass gute Texturen (Makrotextur) sowohl einen günstigen Einfluss auf die Griffigkeit als auch auf die Lärmemissionen haben. Dabei muss zusätzlich auch die Altersentwicklung bei der Beurteilung einbezogen werden.

Diese Erkenntnis zeigt sich infolge der gegensätzlichen Abhängigkeiten bei den Deckschichtgruppen ACMR und PA nicht, was u. a. vermutlich mit den Einflüssen des Zusammenwirkens von Makro- und Mikrotextur stehen könnte. Diesen Einflüssen und Wechselwirkungen konnte im Rahmen der vorliegenden Untersuchung aus Aufwandgründen nicht vertieft weiter nachgegangen werden.

8. Bei den Zementbetondecken zeigten sich alle drei Zusammenhänge deutlich ausgeprägter und als bei den bitumenhaltigen Deckschichten. Die Korrelationen von 0.63, 0.50 und 0.40 bei den drei Zusammenhängen Griffigkeit - Textur, Lärmemissionen - Griffigkeit und Lärmemissionen - Textur fallen besser aus. Die Zusammenhänge Lärmemissionen in Funktion der Textur und in Funktion der Griffigkeit zeigen, dass sowohl mit zunehmender Textur als auch mit zunehmender Griffigkeit die Lärmemissionen abnehmen. Der Zusammenhang Griffigkeit und Textur weist eine relativ gute Korrelation aus und bestätigt erwartungsgemäss, dass bei Betonfahrbahnen mit zunehmender Textur die Griffigkeit wächst. Die Datengrundlage bei den Betonfahrbahnen sind unsicher, weil in der neueren Zeit verschiedene Betonfahrbahnen eine neue bitumenhaltige Deckschicht erhielten. Meist stammen die Daten der Betonfahrbahnen von 2000 und früher.
9. Altersabhängigkeiten bei Griffigkeit, Textur und Lärmemissionen: Während beim Gesamtdatensatz (alle Deckschichtgruppen zusammen) praktisch keine Abhängigkeit der Griffigkeit bzw. der Textur vom Alter der Deckschichten (Liegezeit) vorliegt, zeigt sich bei den Lärmemissionen ein schwacher Trend, wonach die Lärmemissionen mit zunehmendem Alter der Deckschichten zunehmen. Werden die Abhängigkeiten vom Alter nach Altersgruppen (> 45, > 35, > 25, > 15, 12, 10, 8 und 5 Jahre Liegezeit) betrachtet kann folgendes festgehalten werden:

Ein schwacher Zusammenhang kann bei den Lärmemissionen in Abhängigkeit der Griffigkeit bei den jüngeren Altersgruppen 8, 10 und 12 Jahre Liegezeit der Deckschichten erkannt werden.

Hier bestätigt sich der Trend, wonach mit zunehmender Griffigkeit die Lärmemissionen abnehmen. Über alle Altersgruppen hinweg zeigt sich dieser Zusammenhang bei der Deckschichtgruppe der ACMR. Bei den älteren Zementbetondeckschichten (> 45 Jahre, > 35 Jahre und > 25 Jahre Liegezeit) zeigen sich schwache bis mittel starke Abhängigkeiten beim Zusammenhang Lärmemission und Griffigkeit. Mit Zunehmender Griffigkeit nehmen auch hier die Lärmemissionen ab. Dieser bereits früher erkannte Trend wird hier bestätigt. Technisch plausible Erklärungen dazu fehlen weitgehend.

10. Aufgrund der grossen Datensätze und der vielfältigen Einflüsse auf die einzelnen Daten wie Alter der Deckschichten, Verschiedenartigkeit der Deckschichten, unterschiedlichste Nutzungen der Strassenabschnitte, unterschiedlichste Witterungseinflüsse in den verschiedenen Regionen der Schweiz sowie unterschiedlichste Erhebungsbedingungen für Textur, Griffigkeit und Lärmemissionen musste erwartet werden, dass sich die einzelnen, zu untersuchenden Zusammenhänge nicht sehr deutlich zeigen würden. Dass auch bei Aufsplittung der Gesamtdatensätze nach Deckschichtgruppen und nach Altersgruppen (Liegezeit der Deckschicht) sich ebenfalls nur ganz wenige Trends bei den Zusammenhängen nachweisen lassen, ist indessen eher erstaunlich und unerwartet. Die dabei zum Teil festgestellten Widersprüchlichkeiten liessen sich im Rahmen dieser Forschungsarbeit aus Aufwandgründen nicht weiter vertieft untersuchen. Entsprechend konnten nicht alle Erkenntnisse erklärt werden.

Die Erhebung der Datensätze war grundsätzlich darauf ausgerichtet, die Zustände der Grössen Textur, Griffigkeit und Nahfeld-Lärmemission zu erfassen um das Qualitätsniveau dieser Fahrbahneigenschaften der Nationalstrassen beurteilen zu können. Die hier durchgeführte Folgeuntersuchung war zum damaligen Zeitpunkt gar nicht geplant gewesen.

## 5 Folgerungen und Empfehlungen

### 5.1 Vorbemerkungen

Die Bearbeitung grosser Datensätze wie der vorliegende ist mit grossem Aufwand verbunden und entsprechend schwerfällig. Die Vermischung der unterschiedlichen Eigenschaften bei einer grossen Anzahl verschiedenster Deckschichten einerseits und die grosse Streuung bei den Erhebungsbedingungen führen zwangsläufig zur Vermischung der gesuchten Auffälligkeiten.

Die durchgeführten Auswertungen waren diesen Umständen stark ausgesetzt.

Aufgrund der grossen Datensätze und der vielfältigen Einflüsse auf die einzelnen Daten wie Alter der Deckschichten, Verschiedenartigkeit der Deckschichten, unterschiedlichste Nutzungen der Strassenabschnitte, unterschiedlichste Witterungseinflüsse in den verschiedenen Regionen der Schweiz sowie unterschiedlichste Erhebungsbedingungen für Textur, Griffigkeit und Lärmemissionen musste erwartet werden, dass sich die einzelnen, zu untersuchenden Zusammenhänge nicht sehr deutlich zeigen würden.

Dass auch bei Aufsplittung der Gesamtdatensätze nach Deckschichtgruppen und nach Altersgruppen (Liegezeit der Deckschicht) sich ebenfalls nur ganz wenige Trends bei den Zusammenhängen nachweisen lassen, ist indessen eher erstaunlich und unerwartet.

### 5.2 Folgerungen und Empfehlungen

Aufgrund der Beurteilung der Erkenntnisse lassen sich folgende Folgerungen aus der Forschungsarbeit ziehen:

1. Der in der Literatur festgestellte, allerdings mehrheitlich qualitativ beschriebene, Zusammenhang zwischen der Griffigkeit und der Textur (Makrotextur), liessen sich im Rahmen dieser Untersuchung teilweise ebenfalls bestätigen. Danach kann angenommen werden, dass die Griffigkeit bei zunehmender Texturproftiefe (Makrotextur) zunimmt. Die Bestätigung konnte quantitativ aber nur sehr schwach und damit sehr unsicher aufgrund schwacher Korrelationen nachgewiesen werden.
2. Aus der vorliegenden Untersuchung ist der interessante, in der Literatur selten beschriebene, direkte Zusammenhang zwischen de Lärmemissionen und der Griffigkeit sowohl bei Gesamtdatensatz als auch bei den verschiedenen Deckschichtgruppen als zumindest einheitlich, wenn auch schwach und damit unsicher, mehrfach erkannt worden. Danach nehmen die Lärmemissionen mit zunehmender Griffigkeit ab. Die Ergebnisse liessen sich indessen im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen nur teilweise plausibel interpretieren bzw. erklären.
3. Der in der Literatur häufig beschriebene Zusammenhang zwischen den Lärmemissionen und der Textur konnte im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nur teilweise und nur qualitativ erkannt werden, weil nur sehr schwache Korrelationen festgestellt wurden und weil sich bei den einzelnen Deckschichtgruppen teilweise unplausible und unerklärliche Abhängigkeiten zeigten.
4. Auch über grosse Zeiträume betrachtet, zeigten sich praktisch keine Verschlechterungen der drei Grössen Textur, Griffigkeit und Lärmemission. Sie können deshalb aufgrund der ausgewerteten Daten der vorliegenden Untersuchung als nachhaltig gut bewertet werden.

5. Aufgrund der Erkenntnisse hinsichtlich des schwachen und unsicheren Zusammenhangs Griffigkeit in Abhängigkeit der Textur (Makrotextur) kann die Texturprofilmessung bei bitumenhaltigen Deckschichten kein vollständiger Ersatz für die Griffigkeitsmessung darstellen. Die Texturmessung als Ersatz für Griffigkeitsmessungen bei Zementbetonbelägen und -deckschichten ist jedoch zu prüfen.
6. Aufgrund der sehr schwachen Korrelationen und damit sehr unsicheren Zusammenhängen sowie der vorhandenen Widersprüchlichkeiten lassen sich anhand der Ergebnisse keine generellen Aussagen zum Lärmverhalten via Textureigenschaften (Makrotextur), wie angestrebt, machen.
7. Die zum Teil widersprüchlichen Ergebnisse beim Zusammenhang Griffigkeit und Textur zwischen den Deckschichtgruppen AC, SMA und den Deckschichtgruppen ACMR und PA bedürfen weiterer Erklärungen und allfällige Untersuchungen.
8. Für die Untersuchung der Zusammenhänge, wie dies im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit versucht wurde, wäre es grundsätzlich nötig, die Erhebungen der einzelnen Größen einerseits zeitlich zu koordinieren und andererseits die Messmethoden aufeinander abzustimmen.
9. Für die weitere Bestimmung der Zusammenhänge und Abhängigkeiten ist zu empfehlen, die in einzelnen europäischen Normen beschriebenen Mess- und Erhebungsverfahren so besser aufeinander auszulegen, dass die Möglichkeiten zum Erkennen der gesuchten Zusammenhänge gesteigert werden könnte.
10. Zur Klärung der gesuchten Abhängigkeiten wäre im Vorfeld in einer vertieften Untersuchung die benötigte Datengrundlage näher zu analysieren.
11. Die Abgrenzung der Texturbereiche zur Identifikation der Lärmemissions- und Griffigkeitseigenschaften sollte Gegenstand einer Neubeurteilung werden.

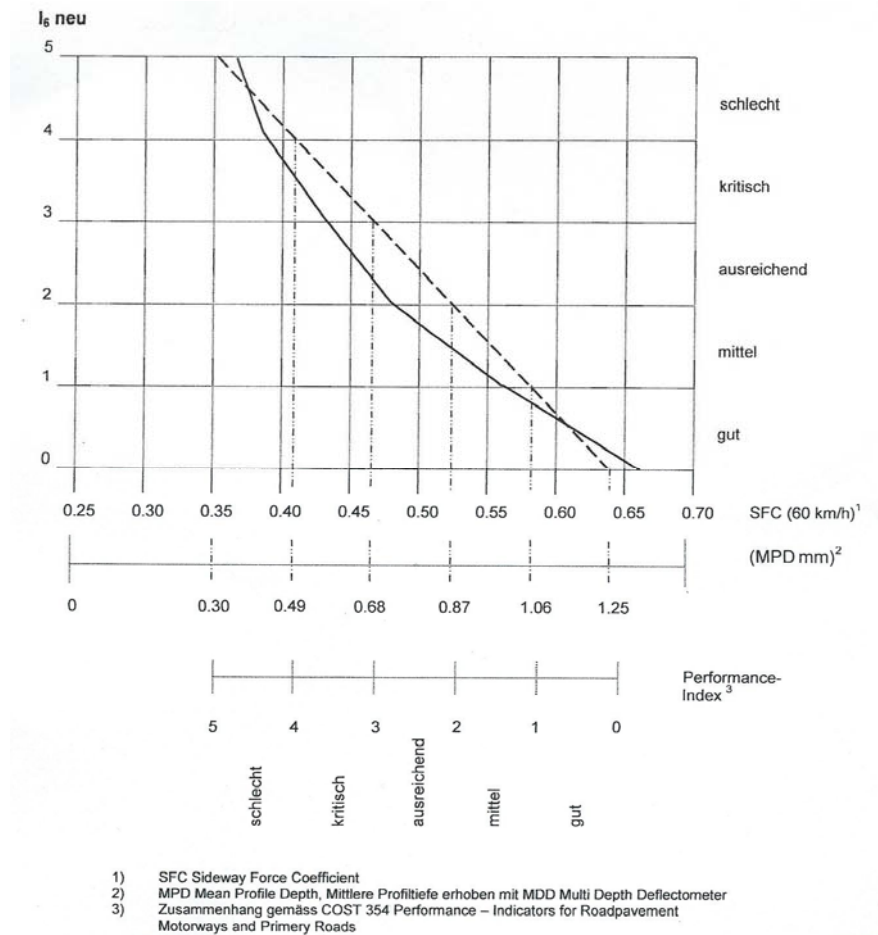
## Anhänge

|            |                                                                                  |           |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>I</b>   | <b>Zusammenhang Textur und Griffigkeit.....</b>                                  | <b>59</b> |
| I.1        | Zusammenhang zwischen Textur und Griffigkeit [COST 354].....                     | 59        |
| I.2        | Theoretischer Zusammenhang SFC und MPD [17].....                                 | 59        |
| <b>II</b>  | <b>Daten der Deckschichten .....</b>                                             | <b>60</b> |
| II.1       | Materialbezeichnungen Deckschichten .....                                        | 60        |
| II.2       | Liste Deckschichten (unaufbereitete Daten 79).....                               | 61        |
| <b>III</b> | <b>Vorgehen beim Aufbereiten bzw. Bereinigen der Daten.....</b>                  | <b>62</b> |
| <b>IV</b>  | <b>Prüfung auf Normalverteilung .....</b>                                        | <b>63</b> |
| <b>V</b>   | <b>Ausführliche Auswertungen .....</b>                                           | <b>64</b> |
| V.1        | Griffigkeit, Textur, Lärmemission in Funktion des Einbaujahres.....              | 64        |
| V.1.1      | Griffigkeit in Abhängigkeit von Textur (Gesamtdaten) .....                       | 64        |
| V.1.2      | Lärm in Abhängigkeit von Griffigkeit (Gesamtdaten) .....                         | 67        |
| V.1.3      | Lärm in Abhängigkeit von Textur (Gesamtdaten) .....                              | 69        |
| V.1.4      | Abhängigkeiten für Deckschichttypen für Einbaujahre bis 1970.....                | 71        |
| V.1.5      | Abhängigkeiten für Deckschichttypen für Einbaujahre 1971-1980 .....              | 74        |
| V.1.6      | Abhängigkeiten für Deckschichttypen für Einbaujahre 1981-1990 .....              | 78        |
| V.1.7      | Abhängigkeiten für Deckschichttypen für Einbaujahre 1991-2000 .....              | 83        |
| V.1.8      | Abhängigkeiten für Deckschichttypen für Einbaujahre 2001/2002 .....              | 88        |
| V.1.9      | Abhängigkeiten für Deckschichttypen für Einbaujahre 2003/2004 .....              | 92        |
| V.1.10     | Abhängigkeiten für Deckschichttypen für Einbaujahre 2005/2006 .....              | 95        |
| V.1.11     | Abhängigkeiten für Deckschichttypen für Einbaujahre 2007/2008 .....              | 99        |
| V.2        | Zusammenhänge in Abhängigkeit der Altersstruktur und der Deckschichtgruppen..... | 102       |

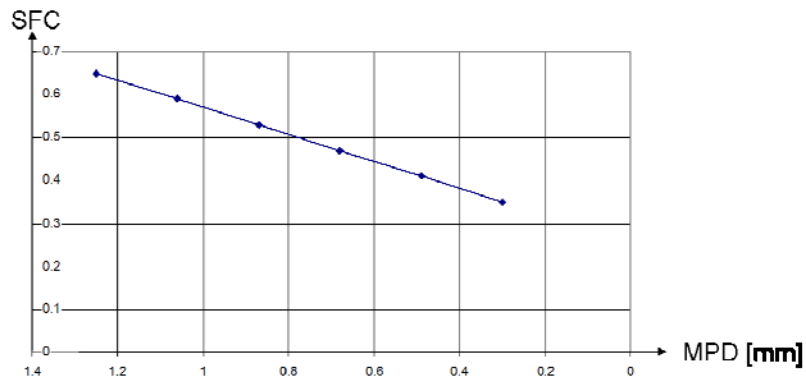


# I Zusammenhang Textur und Griffigkeit

## I.1 Zusammenhang zwischen Textur und Griffigkeit [COST 354]



## I.2 Theoretischer Zusammenhang SFC und MPD [17]



## II Daten der Deckschichten

### II.1 Materialbezeichnungen Deckschichten

| Kategorie                        | Anzahl | Bezeichnung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|----------------------------------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Schicht</b>                   | 4      | Deckschicht<br>Binderschicht<br>Tragschicht<br>Ausgleichsschicht                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Materialsorte</b>             | 15     | AC Asphaltbeton AC<br>ACB Asphaltbeton ACB<br>ACMR Rauhasphalt<br>ACT Asphaltbeton ACT<br>TA Teerasphaltbeton (alt)<br>X unbekannt<br>ACVTL Asphaltbeton für dünne oder sehr dünne Schichten<br>HRA Hot Rolled Asphalt<br>MA Gussasphalt<br>COA Oberflächenbehandlung<br>PA Offenporiger Asphalt<br>SMA Splittmastixasphalt<br>RES Rasen, Erde, Sand<br>BE Beton<br>MB Mikrobeton |
| <b>Bindemittel</b>               | 8      | B Bitumen (B)<br>PB Polymermod. Bitumen (PmB)<br>T Teer (T)<br>X unbekannt<br>TB Teerbitumen (TB)<br>KU Kunststoff<br>OB Ohne Binder<br>CEM Portlandzement (CEM I)                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Mischgutttyp</b>              | 6      | X unbekannt<br>S S (starke Beanspruchung)<br>NR nichtrelevant<br>H H (sehr starke Beanspruchung)<br>N N (normale Beanspruchung)<br>L L (leichte Beanspruchung)                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Komponente</b>                | 6      | X nicht spezifiziert<br>RX Remix<br>TR Trinidad<br>KS Kunststoff, Polymere<br>AR Armiert<br>NA Naturasphalt                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Gesamtanzahl Schichttypen</b> | 115    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

## II.2 Liste Deckschichten (unaufbereitete Daten 79)

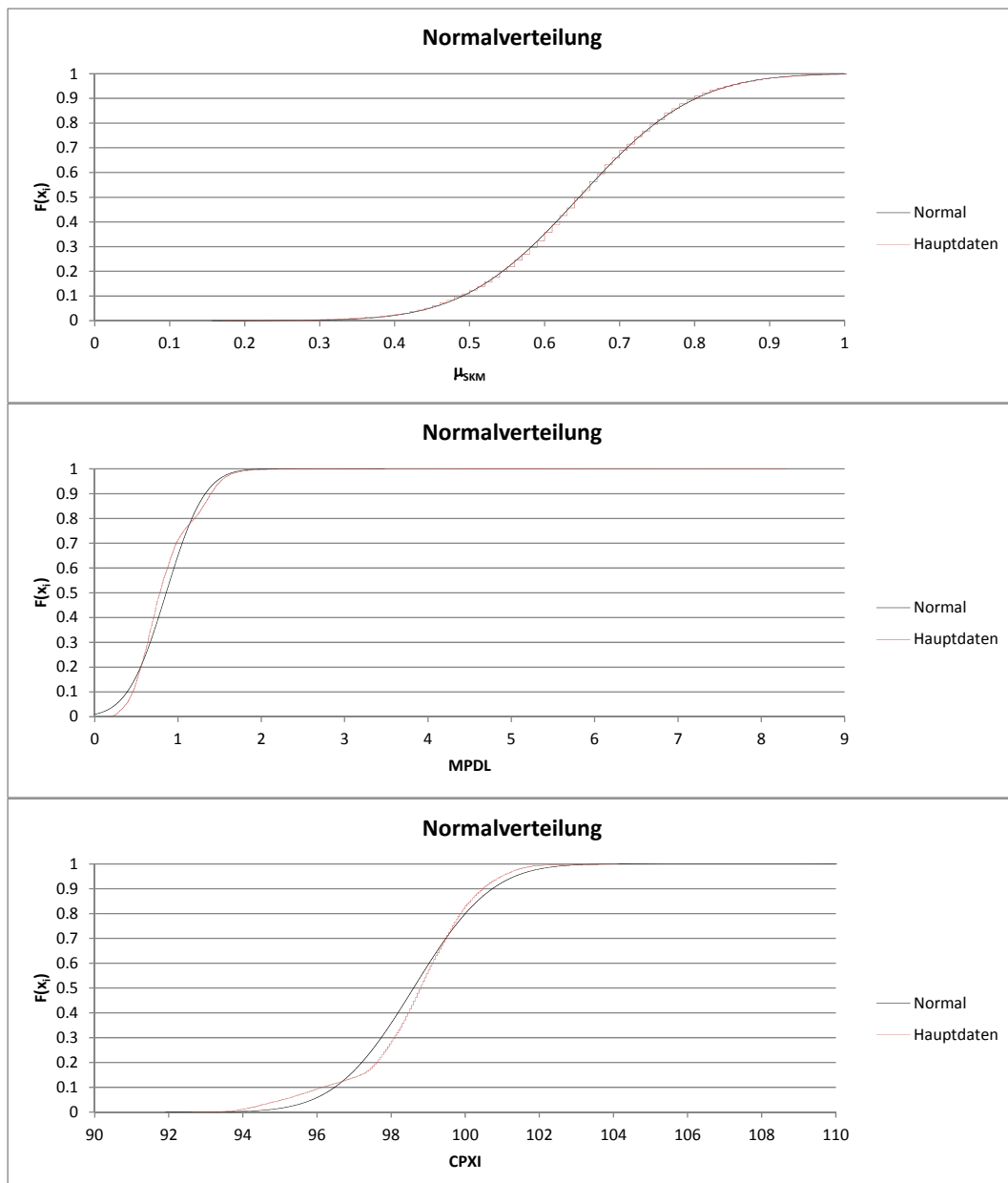
| Schicht-Typ                                                                | Schicht        | Schichtsorte              | Bindemittel                | Körnung             | Mischguttyp          | Besondere Komponente    |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------|---------------------------|----------------------------|---------------------|----------------------|-------------------------|
| [AC10] AC 10, Deckschicht                                                  | DE Deckschicht | AC Asphaltbeton AC        | B Bitumen (B)              | 10 Körnung 10 alt   | X unbekannt          | X nicht spezifiziert    |
| [AC10R] AC 10, Remixing, Deckschicht                                       | DE Deckschicht | AC Asphaltbeton AC        | B Bitumen (B)              | 10 Körnung 10 alt   | X unbekannt          | RX Remix                |
| [AC10S] AC 10S, Deckschicht                                                | DE Deckschicht | AC Asphaltbeton AC        | B Bitumen (B)              | 10 Körnung 10 alt   | S S (starke Beanspru | X nicht spezifiziert    |
| [AC11] AC 11, Deckschicht                                                  | DE Deckschicht | AC Asphaltbeton AC        | B Bitumen (B)              | 11 Körnung 11       | X unbekannt          | X nicht spezifiziert    |
| [AC11ST] AC 11S, mit Trinidad, Deckschicht                                 | DE Deckschicht | AC Asphaltbeton AC        | B Bitumen (B)              | 11 Körnung 11       | S S (starke Beanspru | TR Trinidad             |
| [AC16] AC 16, Deckschicht                                                  | DE Deckschicht | AC Asphaltbeton AC        | B Bitumen (B)              | 16 Körnung 16       | X unbekannt          | X nicht spezifiziert    |
| [AC16P] AC 16, PmB, Deckschicht                                            | DE Deckschicht | AC Asphaltbeton AC        | B Bitumen (B)              | 16 Körnung 16       | X unbekannt          | KS Kunststoff, Polymere |
| [AC16R] AC 16, Remixing, Deckschicht                                       | DE Deckschicht | AC Asphaltbeton AC        | B Bitumen (B)              | 16 Körnung 16       | X unbekannt          | RX Remix                |
| [AC16SP] AC 16S, PmB, Deckschicht                                          | DE Deckschicht | AC Asphaltbeton AC        | B Bitumen (B)              | 16 Körnung 16       | S S (starke Beanspru | KS Kunststoff, Polymere |
| [AC16SR] AC 16S, Remixing, Deckschicht                                     | DE Deckschicht | AC Asphaltbeton AC        | B Bitumen (B)              | 16 Körnung 16       | S S (starke Beanspru | RX Remix                |
| [AC16ST] AC 16S, mit Trinidad, Deckschicht                                 | DE Deckschicht | AC Asphaltbeton AC        | B Bitumen (B)              | 16 Körnung 16       | S S (starke Beanspru | TR Trinidad             |
| [AC18SR] AC 18S, Remixing, Deckschicht                                     | DE Deckschicht | AC Asphaltbeton AC        | B Bitumen (B)              | 18 Körnung 18 alt   | S S (starke Beanspru | RX Remix                |
| [AC22S] AC 22S, Deckschicht                                                | DE Deckschicht | AC Asphaltbeton AC        | B Bitumen (B)              | 22 Körnung 22       | S S (starke Beanspru | X nicht spezifiziert    |
| [AC3] AC 3, Deckschicht                                                    | DE Deckschicht | AC Asphaltbeton AC        | B Bitumen (B)              | 3 Körnung 3         | X unbekannt          | X nicht spezifiziert    |
| [AC6] AC 6, Deckschicht                                                    | DE Deckschicht | AC Asphaltbeton AC        | B Bitumen (B)              | 6 Körnung 6         | X unbekannt          | X nicht spezifiziert    |
| [ACMR] Rauhasphalt, Deckschicht                                            | DE Deckschicht | ACMR Rauhasphalt          | B Bitumen (B)              | X unbekannt         | NR nichtrelevant     | X nicht spezifiziert    |
| [ACMR6P] Rauhasphalt 6, PmB, Deckschicht                                   | DE Deckschicht | ACMR Rauhasphalt          | PB Polymermod. Bitumen (Pm | 6 Körnung 6         | NR nichtrelevant     | KS Kunststoff, Polymere |
| [DA] Asphaltbeton, Deckschicht                                             | DE Deckschicht | AC Asphaltbeton AC        | B Bitumen (B)              | X unbekannt         | X unbekannt          | X nicht spezifiziert    |
| [DE] Deckschicht                                                           | DE Deckschicht | X unbekannt               | X unbekannt                | X unbekannt         | X unbekannt          | X nicht spezifiziert    |
| [DSA] Dünnschichtasphalt armiert, Deckschicht                              | DE Deckschicht | ACVTL Asphaltbeton für dü | B Bitumen (B)              | X unbekannt         | NR nichtrelevant     | X nicht spezifiziert    |
| [DSAH11] Heissmikro Dünnschicht 0/11, Deckschicht                          | DE Deckschicht | ACVTL Asphaltbeton für dü | B Bitumen (B)              | 10 Körnung 10 alt   | NR nichtrelevant     | AR Armiert              |
| [DSAK11] Kaltmikro Dünnschicht 0/11, Deckschicht                           | DE Deckschicht | ACVTL Asphaltbeton für dü | B Bitumen (B)              | 10 Körnung 10 alt   | NR nichtrelevant     | AR Armiert              |
| [DSAK3] Kaltmikro Dünnschicht 0/3, Deckschicht                             | DE Deckschicht | ACVTL Asphaltbeton für dü | B Bitumen (B)              | 3 Körnung 3         | NR nichtrelevant     | AR Armiert              |
| [DSAK6] Kaltmikro Dünnschicht 0/6, Deckschicht                             | DE Deckschicht | ACVTL Asphaltbeton für dü | B Bitumen (B)              | 6 Körnung 6         | NR nichtrelevant     | AR Armiert              |
| [DSAK6A] Armierte Dünnschicht 0/6 (kalt)                                   | DE Deckschicht | ACVTL Asphaltbeton für dü | B Bitumen (B)              | 6 Körnung 6         | NR nichtrelevant     | AR Armiert              |
| [DSAKG] Dünnschichtasphalt kalt, Bindemittel gemäss Lieferant, Deckschicht | DE Deckschicht | ACVTL Asphaltbeton für dü | B Bitumen (B)              | X unbekannt         | NR nichtrelevant     | AR Armiert              |
| [DTA11] TA (alt) 11, Deckschicht                                           | DE Deckschicht | TA Teerasphaltbeton (alt) | TB Teerbitumen (TB)        | 10 Körnung 10 alt   | X unbekannt          | X nicht spezifiziert    |
| [DTA16] TA (alt) 16, Deckschicht                                           | DE Deckschicht | TA Teerasphaltbeton (alt) | TB Teerbitumen (TB)        | 16 Körnung 16       | X unbekannt          | X nicht spezifiziert    |
| [DTA16S] TA (alt) 16S, Deckschicht                                         | DE Deckschicht | TA Teerasphaltbeton (alt) | TB Teerbitumen (TB)        | 16 Körnung 16       | S S (starke Beanspru | X nicht spezifiziert    |
| [HRA] HRA, Deckschicht                                                     | DE Deckschicht | HRA Hot Rolled Asphalt    | B Bitumen (B)              | X unbekannt         | NR nichtrelevant     | X nicht spezifiziert    |
| [MA11T] Gussasphalt MA 11, 70/100 mit Trinidad, Deckschicht                | DE Deckschicht | MA Gussasphalt            | B Bitumen (B)              | 11 Körnung 11       | NR nichtrelevant     | TR Trinidad             |
| [MA11T] Gussasphalt MA 11, mit Trinidad, Deckschicht                       | DE Deckschicht | MA Gussasphalt            | B Bitumen (B)              | 11 Körnung 11       | NR nichtrelevant     | TR Trinidad             |
| [MA11TP] Gussasphalt MA 11, PmB mit Trinidad, Deckschicht                  | DE Deckschicht | MA Gussasphalt            | PB Polymermod. Bitumen (Pm | 11 Körnung 11       | NR nichtrelevant     | TR Trinidad             |
| [MA6] Gussasphalt MA 6, Deckschicht                                        | DE Deckschicht | MA Gussasphalt            | B Bitumen (B)              | 6 Körnung 6         | NR nichtrelevant     | X nicht spezifiziert    |
| [OB] OB, Deckschicht                                                       | DE Deckschicht | COA Oberflächenbehandlung | B Bitumen (B)              | X unbekannt         | NR nichtrelevant     | X nicht spezifiziert    |
| [OBPB] OB, PmB, Deckschicht                                                | DE Deckschicht | COA Oberflächenbehandlung | PB Polymermod. Bitumen (Pm | X unbekannt         | NR nichtrelevant     | KS Kunststoff, Polymere |
| [PA] Drainsasphalt PA, Deckschicht                                         | DE Deckschicht | PA Offenporiger Asphalt   | B Bitumen (B)              | X unbekannt         | NR nichtrelevant     | X nicht spezifiziert    |
| [PA11NA] Drainsasphalt PA 11 NAF, Deckschicht                              | DE Deckschicht | PA Offenporiger Asphalt   | B Bitumen (B)              | 11 Körnung 11       | NR nichtrelevant     | NA Naturasphalt         |
| [SMA11NA] SMA 11, NAF, Deckschicht                                         | DE Deckschicht | SMA Splittmastixasphalt   | B Bitumen (B)              | 11 Körnung 11       | NR nichtrelevant     | NA Naturasphalt         |
| [SMA11SB] SMA 11, Deckschicht, Spezielles Bindemittel                      | DE Deckschicht | SMA Splittmastixasphalt   | B Bitumen (B)              | 11 Körnung 11       | NR nichtrelevant     | X nicht spezifiziert    |
| [SMA11T] SMA 11, mit Trinidad, Deckschicht                                 | DE Deckschicht | SMA Splittmastixasphalt   | B Bitumen (B)              | 11 Körnung 11       | NR nichtrelevant     | TR Trinidad             |
| [SMA6] SMA 6, Deckschicht                                                  | DE Deckschicht | SMA Splittmastixasphalt   | B Bitumen (B)              | 6 Körnung 6         | NR nichtrelevant     | X nicht spezifiziert    |
| [SMA8T] SMA8, mit Trinidad, Deckschicht                                    | DE Deckschicht | SMA Splittmastixasphalt   | B Bitumen (B)              | 8 Körnung 8         | NR nichtrelevant     | TR Trinidad             |
| AC11H AC 11H, Deckschicht                                                  | DE Deckschicht | AC Asphaltbeton AC        | B Bitumen (B)              | 11 Körnung 11       | H H (sehr starke Bea | X nicht spezifiziert    |
| AC11N AC 11N, Deckschicht                                                  | DE Deckschicht | AC Asphaltbeton AC        | B Bitumen (B)              | 11 Körnung 11       | N N (normale Beans   | X nicht spezifiziert    |
| AC11NP AC 11N, PmB, Deckschicht                                            | DE Deckschicht | AC Asphaltbeton AC        | PB Polymermod. Bitumen (Pm | 11 Körnung 11       | N N (normale Beans   | KS Kunststoff, Polymere |
| AC11S AC 11S, Deckschicht                                                  | DE Deckschicht | AC Asphaltbeton AC        | B Bitumen (B)              | 11 Körnung 11       | S S (starke Beanspru | X nicht spezifiziert    |
| AC11SP AC 11S, PmB, Deckschicht                                            | DE Deckschicht | AC Asphaltbeton AC        | PB Polymermod. Bitumen (Pm | 11 Körnung 11       | S S (starke Beanspru | KS Kunststoff, Polymere |
| AC11SR AC 11S, Remixing, Deckschicht                                       | DE Deckschicht | AC Asphaltbeton AC        | B Bitumen (B)              | 11 Körnung 11       | S S (starke Beanspru | RX Remix                |
| AC16N AC 16N, Deckschicht                                                  | DE Deckschicht | AC Asphaltbeton AC        | B Bitumen (B)              | 16 Körnung 16       | N N (normale Beans   | X nicht spezifiziert    |
| AC16S AC 16S, Deckschicht                                                  | DE Deckschicht | AC Asphaltbeton AC        | B Bitumen (B)              | 16 Körnung 16       | S S (starke Beanspru | X nicht spezifiziert    |
| AC22HP ACT 22H, PmB, Deckschicht                                           | DE Deckschicht | ACT Asphaltbeton ACT      | PB Polymermod. Bitumen (Pm | 22 Körnung 22       | H H (sehr starke Bea | KS Kunststoff, Polymere |
| AC22SA AC 22S, abgestreut, Deckschicht                                     | DE Deckschicht | AC Asphaltbeton AC        | KU Kunststoff              | 22 Körnung 22       | S S (starke Beanspru | X nicht spezifiziert    |
| AC8SP AC 8S, PmB, Deckschicht                                              | DE Deckschicht | AC Asphaltbeton AC        | PB Polymermod. Bitumen (Pm | 8 Körnung 8         | S S (starke Beanspru | KS Kunststoff, Polymere |
| ACMR11 Rauhasphalt 11, Deckschicht                                         | DE Deckschicht | ACMR Rauhasphalt          | B Bitumen (B)              | 11 Körnung 11       | NR nichtrelevant     | X nicht spezifiziert    |
| ACMR11P Rauhasphalt 11, PmB, Deckschicht                                   | DE Deckschicht | ACMR Rauhasphalt          | PB Polymermod. Bitumen (Pm | 11 Körnung 11       | NR nichtrelevant     | KS Kunststoff, Polymere |
| ACMR16 Rauhasphalt 16, Deckschicht                                         | DE Deckschicht | ACMR Rauhasphalt          | B Bitumen (B)              | 16 Körnung 16       | NR nichtrelevant     | X nicht spezifiziert    |
| ACMR8 Rauhasphalt 8, Deckschicht                                           | DE Deckschicht | ACMR Rauhasphalt          | B Bitumen (B)              | 8 Körnung 8         | NR nichtrelevant     | X nicht spezifiziert    |
| ACMR8PL Rauhasphalt 8, PmB, lärmarme, dichte Deckschicht                   | DE Deckschicht | ACMR Rauhasphalt          | PB Polymermod. Bitumen (Pm | 8 Körnung 8         | NR nichtrelevant     | KS Kunststoff, Polymere |
| DSC Schotter, Deckschicht                                                  | DE Deckschicht | RES Rasen, Erde, Sand     | OB Ohne Binder             | KK Keine Körnung    | NR nichtrelevant     | X nicht spezifiziert    |
| DZB Zementbeton, mit Stahlbewehrung, Deckschicht                           | DE Deckschicht | BE Beton                  | CEM Portlandzement (CEM I) | X unbekannt         | NR nichtrelevant     | X nicht spezifiziert    |
| HRA16 HRA, 16/22, Deckschicht                                              | DE Deckschicht | HRA Hot Rolled Asphalt    | B Bitumen (B)              | 16/22 Körnung 16/22 | NR nichtrelevant     | X nicht spezifiziert    |
| HRA16NA HRA, 16/22, Naturasphalt, Deckschicht                              | DE Deckschicht | HRA Hot Rolled Asphalt    | B Bitumen (B)              | 16/22 Körnung 16/22 | NR nichtrelevant     | NA Naturasphalt         |
| MA11 Gussasphalt MA 11, Deckschicht                                        | DE Deckschicht | MA Gussasphalt            | B Bitumen (B)              | 11 Körnung 11       | NR nichtrelevant     | X nicht spezifiziert    |
| MA11P Gussasphalt MA 11, PmB, Deckschicht                                  | DE Deckschicht | MA Gussasphalt            | PB Polymermod. Bitumen (Pm | 11 Körnung 11       | NR nichtrelevant     | KS Kunststoff, Polymere |
| MA16 Gussasphalt MA 16, Deckschicht                                        | DE Deckschicht | MA Gussasphalt            | B Bitumen (B)              | 16 Körnung 16       | NR nichtrelevant     | X nicht spezifiziert    |
| MA16P Gussasphalt MA 16, PmB, Deckschicht                                  | DE Deckschicht | MA Gussasphalt            | PB Polymermod. Bitumen (Pm | 16 Körnung 16       | NR nichtrelevant     | KS Kunststoff, Polymere |
| MB MB Microbeton, Deckschicht                                              | DE Deckschicht | MB Microbeton             | B Bitumen (B)              | X unbekannt         | NR nichtrelevant     | X nicht spezifiziert    |
| OB3/6 OB 3/6, Deckschicht                                                  | DE Deckschicht | COA Oberflächenbehandlung | B Bitumen (B)              | 3/6 Körnung 3/6     | NR nichtrelevant     | X nicht spezifiziert    |
| OB6/11 OB 6/11, Deckschicht                                                | DE Deckschicht | COA Oberflächenbehandlung | B Bitumen (B)              | 6/11 Körnung 6/11   | NR nichtrelevant     | X nicht spezifiziert    |
| PA11 Drainsasphalt PA 11, Deckschicht                                      | DE Deckschicht | PA Offenporiger Asphalt   | B Bitumen (B)              | 11 Körnung 11       | NR nichtrelevant     | X nicht spezifiziert    |
| PA11P Drainsasphalt PA 11, PmB, Deckschicht                                | DE Deckschicht | PA Offenporiger Asphalt   | PB Polymermod. Bitumen (Pm | 11 Körnung 11       | NR nichtrelevant     | KS Kunststoff, Polymere |
| PA16 Drainsasphalt PA 16, Deckschicht                                      | DE Deckschicht | PA Offenporiger Asphalt   | B Bitumen (B)              | 16 Körnung 16       | NR nichtrelevant     | X nicht spezifiziert    |
| PA8 Drainsasphalt PA 8, Deckschicht                                        | DE Deckschicht | PA Offenporiger Asphalt   | B Bitumen (B)              | 8 Körnung 8         | NR nichtrelevant     | X nicht spezifiziert    |
| PA8PLO Drainsasphalt PA 8, PmB, lärmarme, offenporige Deckschicht          | DE Deckschicht | PA Offenporiger Asphalt   | PB Polymermod. Bitumen (Pm | 8 Körnung 8         | NR nichtrelevant     | KS Kunststoff, Polymere |
| SMA11 SMA 11, Deckschicht                                                  | DE Deckschicht | SMA Splittmastixasphalt   | B Bitumen (B)              | 11 Körnung 11       | NR nichtrelevant     | X nicht spezifiziert    |
| SMA11P SMA 11, PmB, Deckschicht                                            | DE Deckschicht | SMA Splittmastixasphalt   | PB Polymermod. Bitumen (Pm | 11 Körnung 11       | NR nichtrelevant     | KS Kunststoff, Polymere |
| SMA16 SMA 16, Deckschicht                                                  | DE Deckschicht | SMA Splittmastixasphalt   | B Bitumen (B)              | 16 Körnung 16       | NR nichtrelevant     | X nicht spezifiziert    |
| SMA8 SMA 8, Deckschicht                                                    | DE Deckschicht | SMA Splittmastixasphalt   | B Bitumen (B)              | 8 Körnung 8         | NR nichtrelevant     | X nicht spezifiziert    |

### III Vorgehen beim Aufbereiten bzw. Bereinigen der Daten

- Textur-Datensatz: Löschung Breite 1.75m  
Diese Breite entspricht nicht den Fahrstreifenbreiten
- Textur-Datensatz: Löschung N1= diese Intervalle fehlen bei den CPX Daten
- alle: Löschung alle Nx=  
Durch eine unterschiedliche Referenzierung der Fahrstreifen sind keine eindeutigen Zuordnungen der Daten möglich
- SKM-Datensatz: Löschung Breite 1.75m  
Diese Breite entspricht nicht den Fahrstreifenbreiten
- SKM-Datensatz: Löschung Daten N9B+/-  
Diese Daten sind bei hinsichtlich Textur nicht vorhanden
- CPX-Datensatz: Löschung Daten N9B+/-
- Textur –Datensatz: Löschung Daten -12.25  
Diese Daten sind hinsichtlich SKM nicht vorhanden
- CPX-Datensatz: Löschung Daten -12.25, Löschung Daten 12.25. -15.72  
Diese Daten sind hinsichtlich SKM, Textur nicht vorhanden
- Textur-Datensatz: Löschung alle 650A, 680A und 660A5,25 und 670A5,25  
Diese Daten sind hinsichtlich CPX nicht vorhanden
- SKM-Datensatz: Löschung alle 650A, 680A und 660A5,25 und 670A5,25
- alle: Löschung / Abgleich N1+ -> 8,75  
Diese Daten des KriechFS sind unterschiedlich vorhanden
- alle: Löschung aller Referenzen mit Buchstaben (z.B. A, L, M usw.)
- Material-Datensatz: Löschung aller Breiten Anfang/Ende <2m
- alle: Runden der Meterangaben <xx50 abrunden, >xx50 aufrunden
- alle: Löschung aller gerundeten Meterangaben >1000
- Material-Datensatz: Löschung aller Nx+ und negativer Querabstände
- Material-Datensatz: Löschung aller Nx- und positiver Querabstände

## IV Prüfung auf Normalverteilung

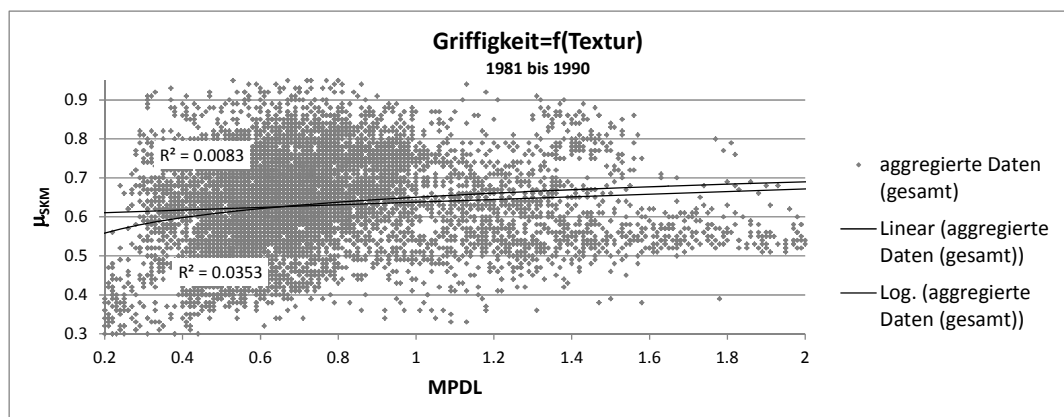
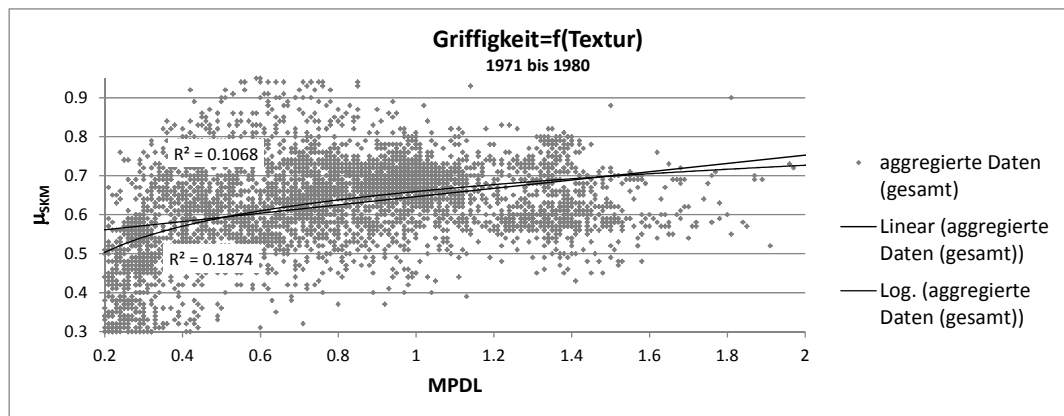
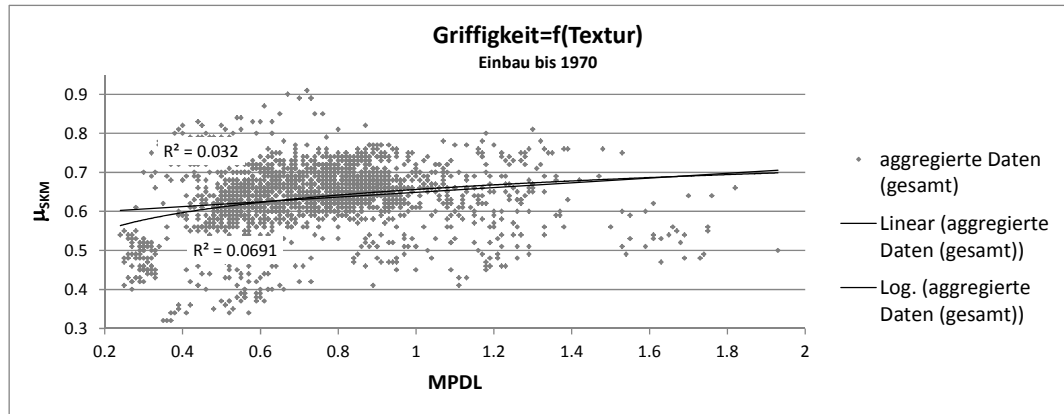
| Kolmogorov-Smirnov  | Gesamt | AC    | SMA   | ACMR  | PA    | DZB   | DTA   | MA    | Rest  |
|---------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>μSKM-Wert</b>    |        |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Mittelwert          | 0.65   | 0.64  | 0.64  | 0.65  | 0.69  | 0.55  | 0.65  | 0.63  | 0.68  |
| Standardabweichung  | 0.121  | 0.117 | 0.094 | 0.121 | 0.150 | 0.139 | 0.072 | 0.142 | 0.100 |
| kritischer Wert c   | 0.007  | 0.014 | 0.015 | 0.017 | 0.020 | 0.028 | 0.031 | 0.036 | 0.038 |
| max. absolute Diff. | 0.029  | 0.022 | 0.050 | 0.038 | 0.076 | 0.063 | 0.036 | 0.052 | 0.040 |
| <b>MPDL-Wert</b>    |        |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Mittelwert          | 0.86   | 0.72  | 0.74  | 0.96  | 1.41  | 0.56  | 0.76  | 0.88  | 0.85  |
| Standardabweichung  | 0.366  | 0.325 | 0.173 | 0.298 | 0.198 | 0.336 | 0.313 | 0.280 | 0.383 |
| kritischer Wert c   | 0.007  | 0.014 | 0.015 | 0.017 | 0.020 | 0.028 | 0.031 | 0.036 | 0.038 |
| max. absolute Diff. | 0.093  | 0.130 | 0.025 | 0.040 | 0.088 | 0.126 | 0.087 | 0.039 | 0.123 |
| <b>CPXI</b>         |        |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Mittelwert          | 98.61  | 98.96 | 99.03 | 98.58 | 96.26 | 99.09 | 99.08 | 99.45 | 99.35 |
| Standardabweichung  | 1.660  | 1.348 | 0.926 | 1.500 | 1.859 | 1.334 | 1.070 | 1.626 | 1.508 |
| kritischer Wert c   | 0.007  | 0.014 | 0.015 | 0.017 | 0.020 | 0.028 | 0.031 | 0.036 | 0.038 |
| max. absolute Diff. | 0.085  | 0.039 | 0.056 | 0.049 | 0.081 | 0.052 | 0.031 | 0.038 | 0.061 |

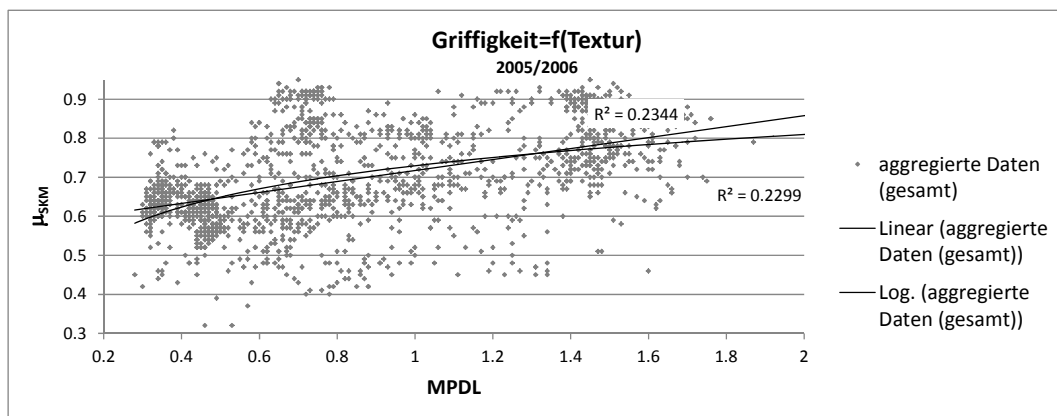
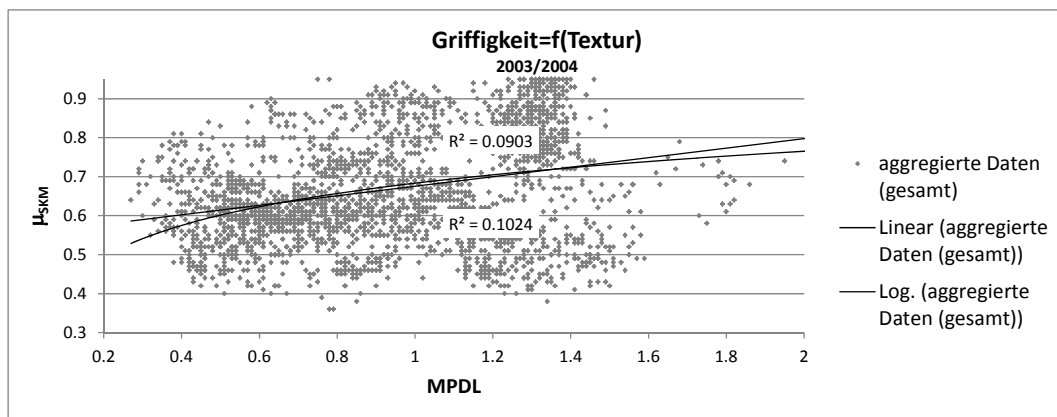
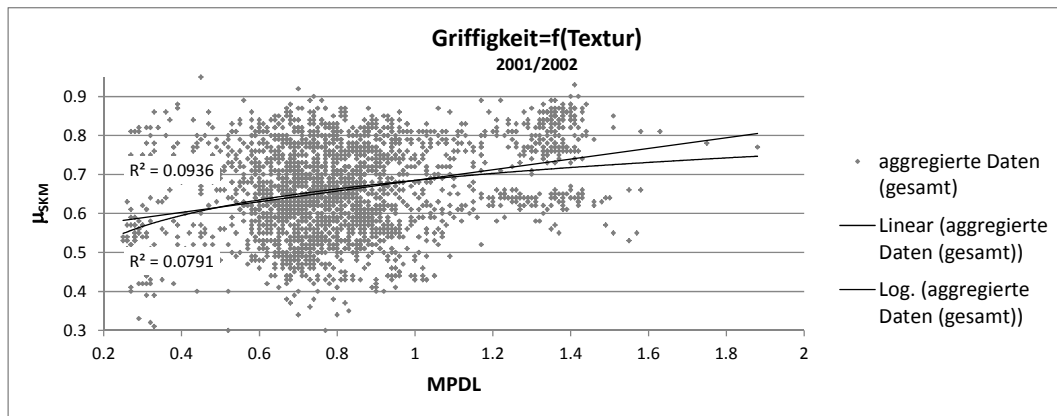
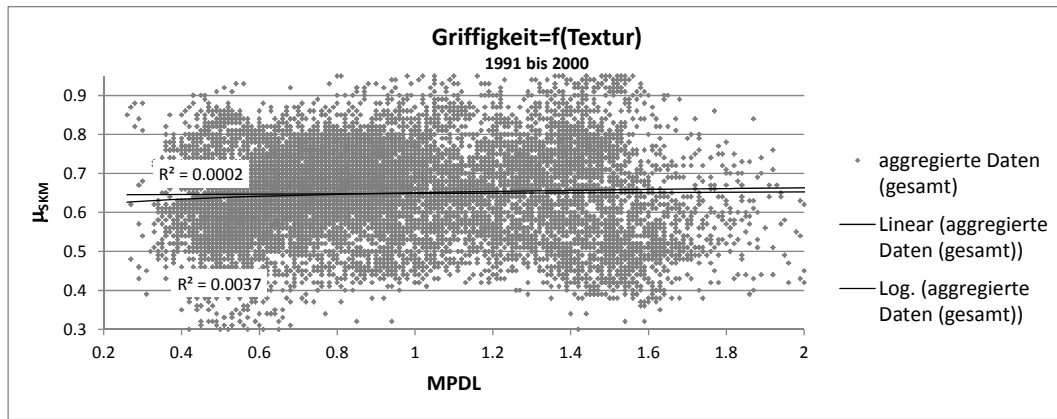


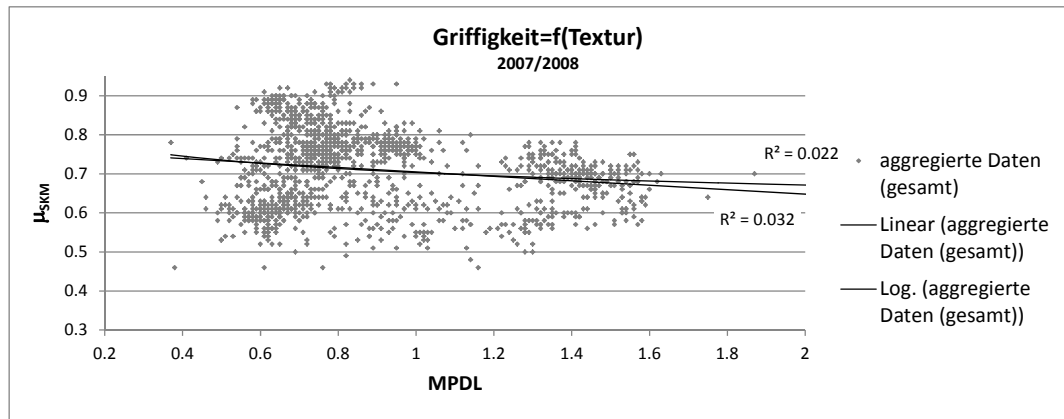
## V Ausführliche Auswertungen

### V.1 Griffigkeit, Textur, Lärmemission in Funktion des Einbaujahres

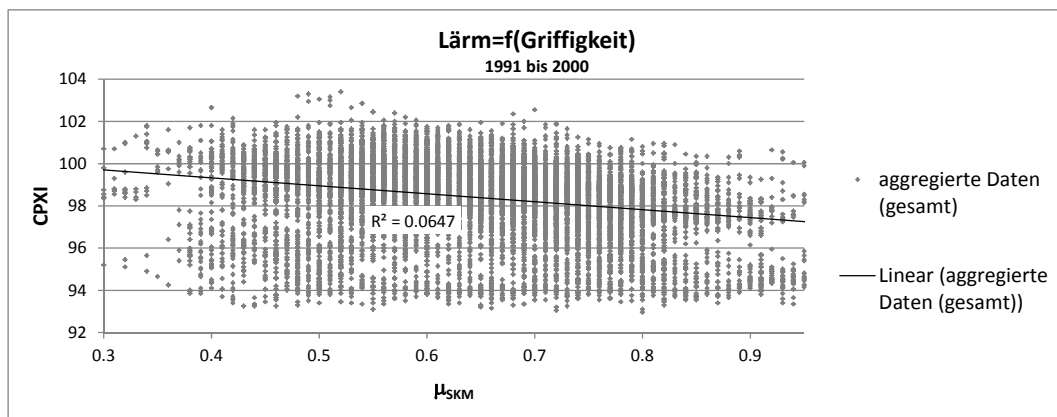
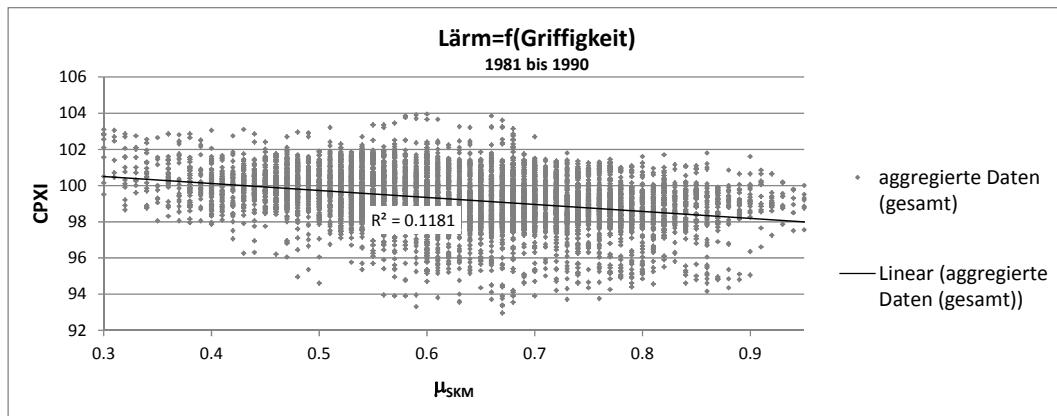
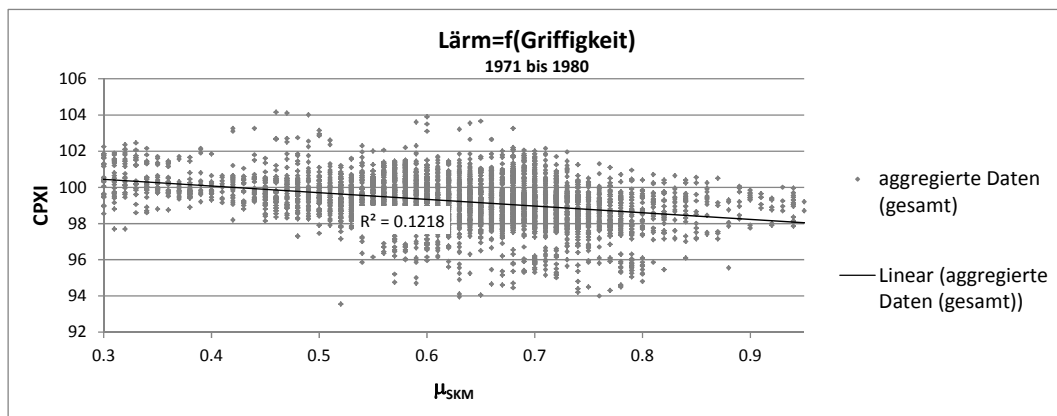
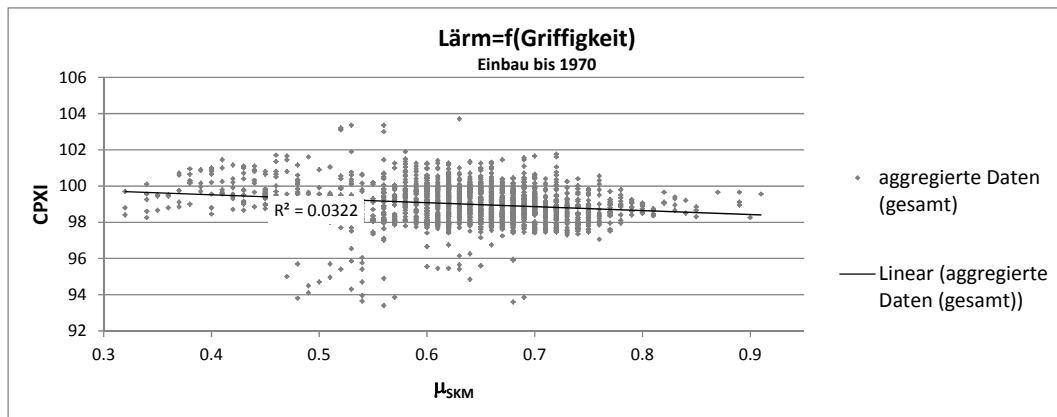
#### V.1.1 Griffigkeit in Abhängigkeit von Textur (Gesamtdaten)

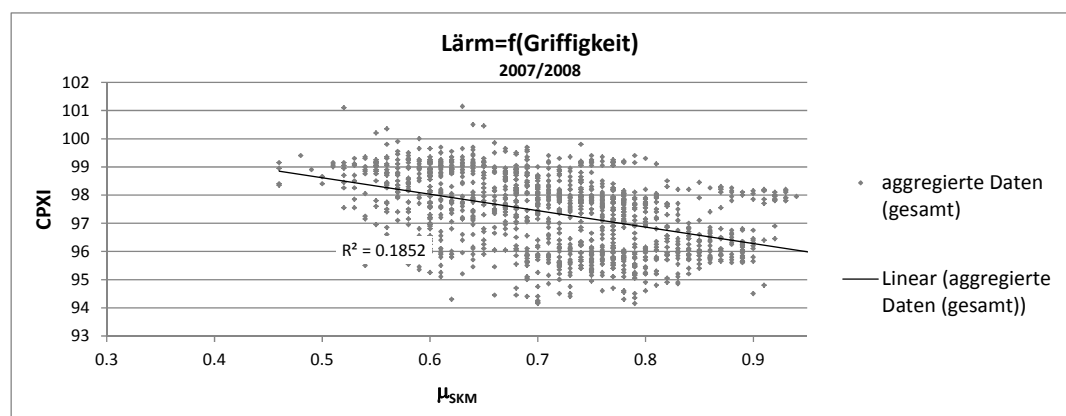
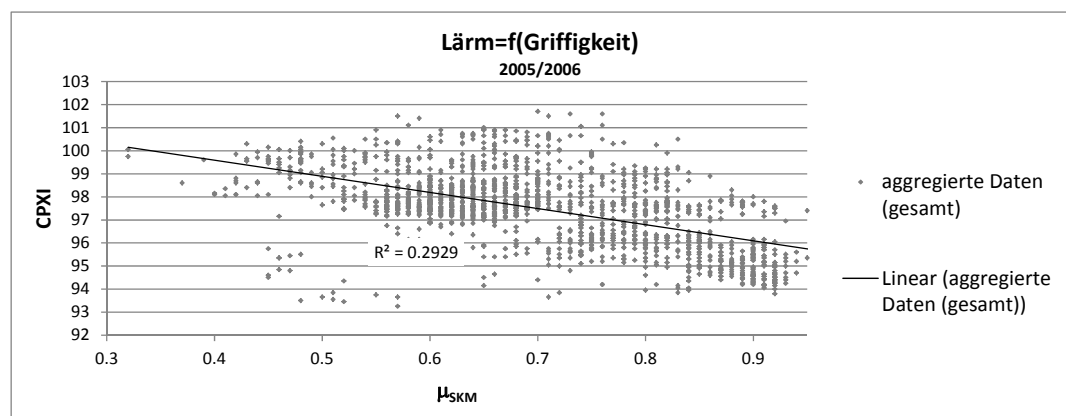
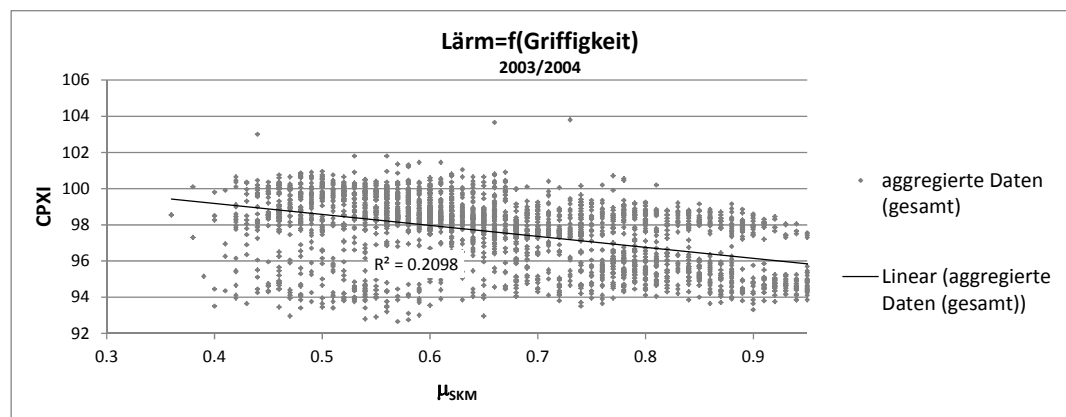
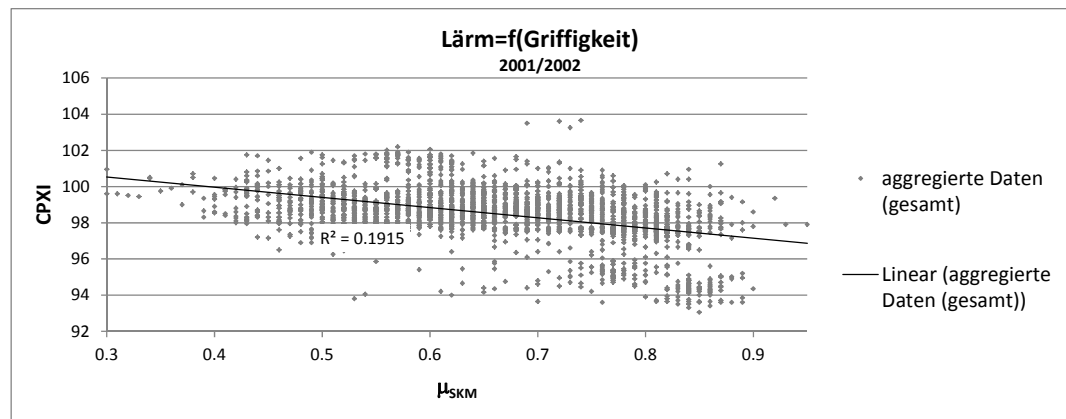




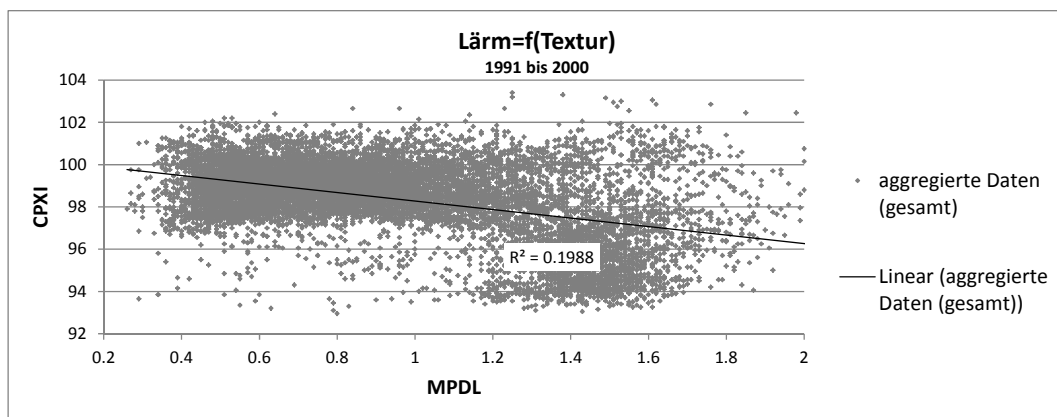
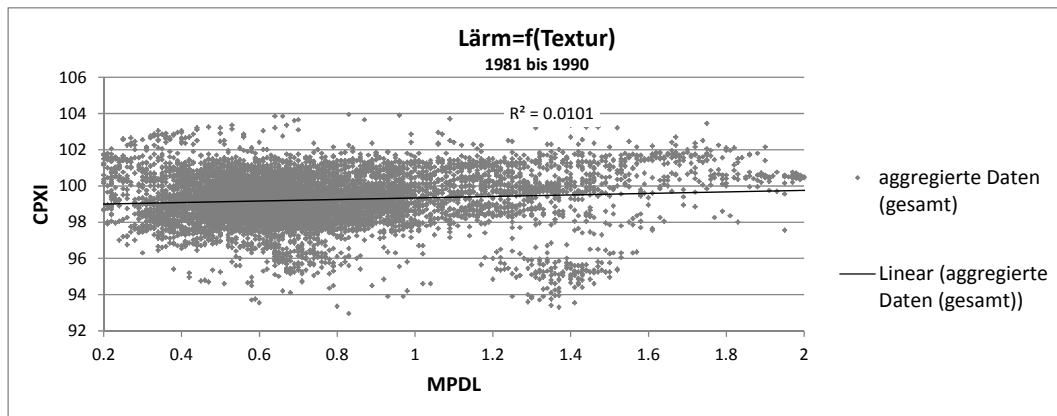
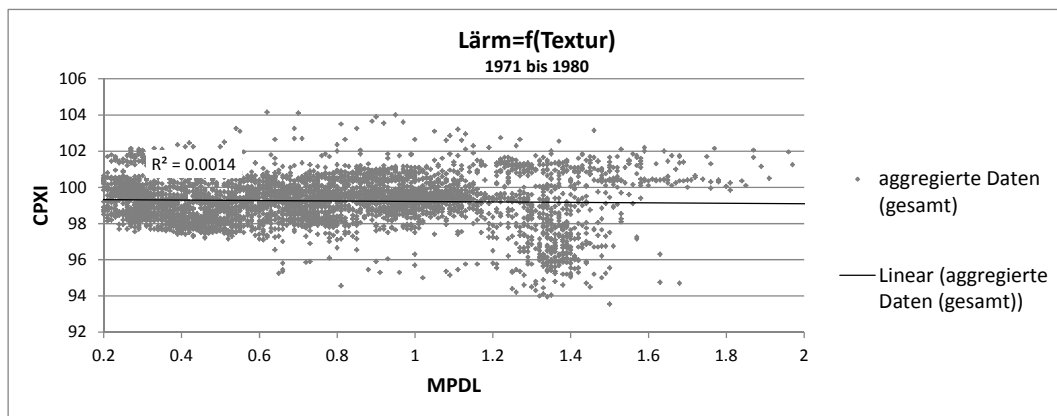
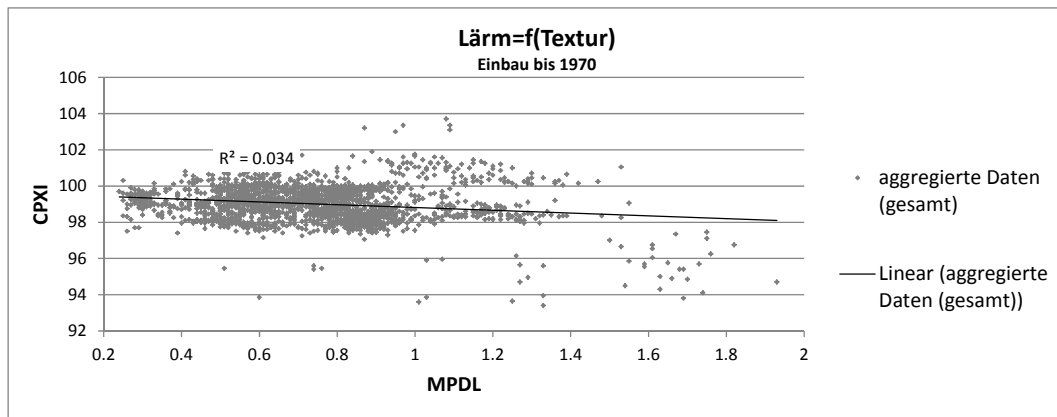


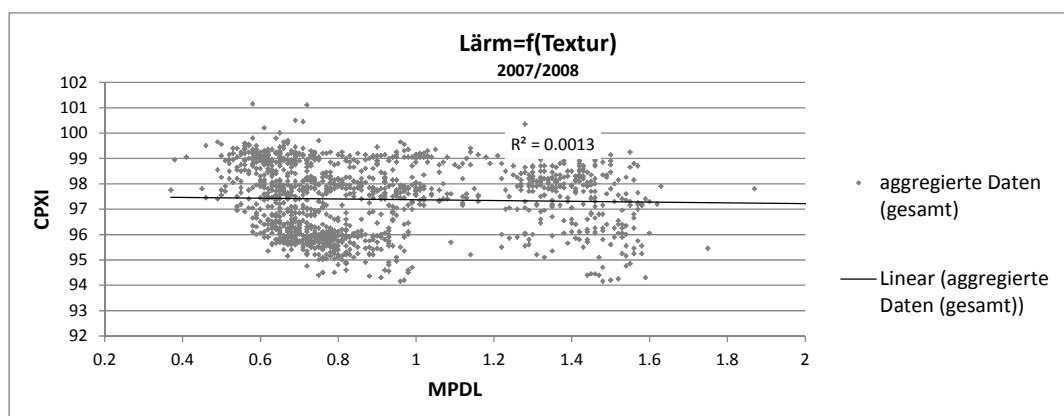
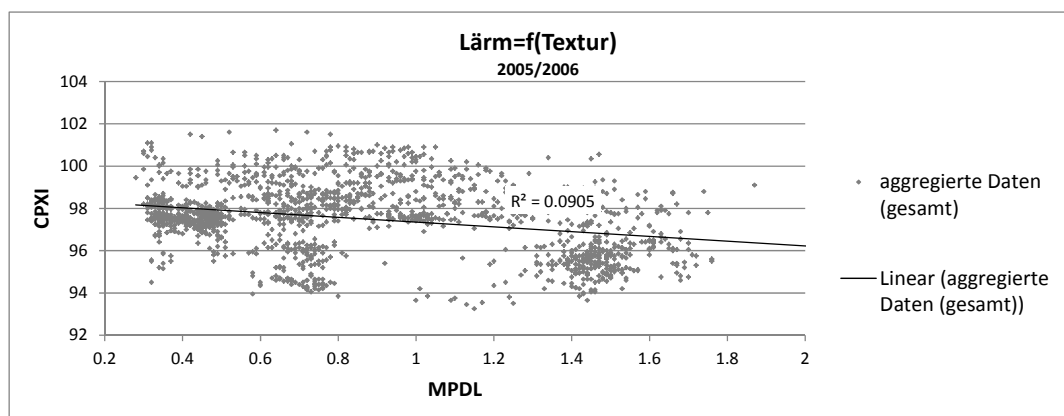
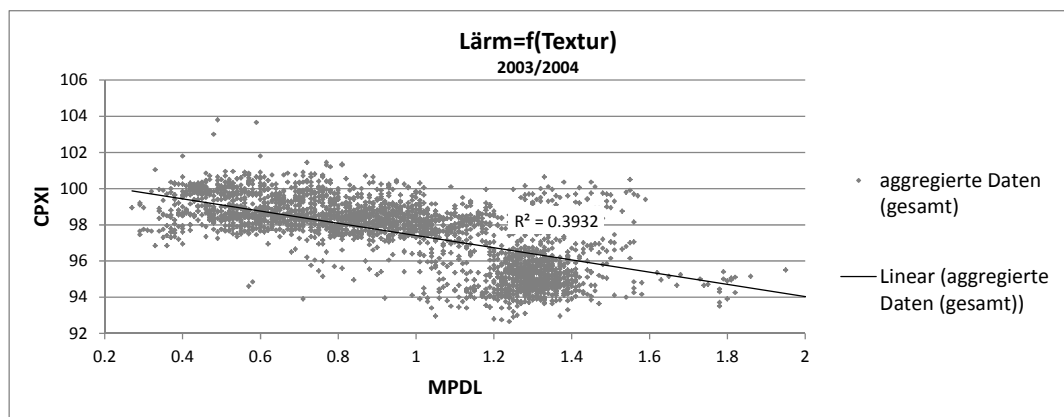
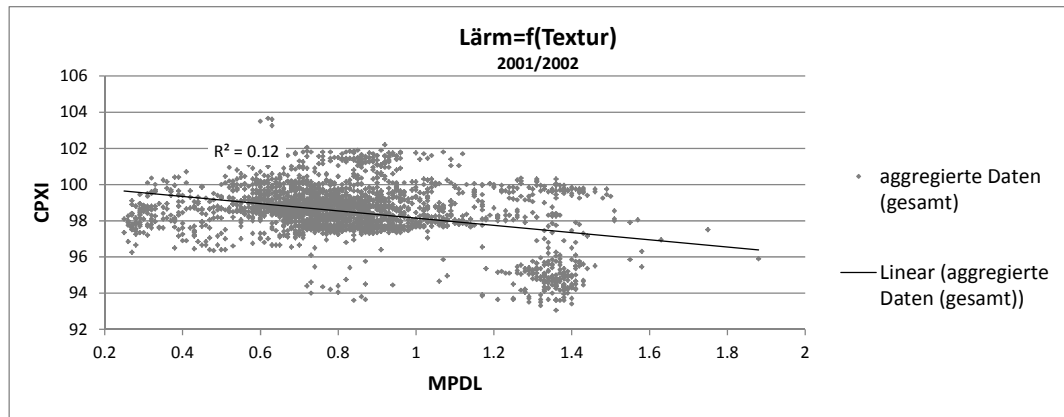
## V.1.2 Lärm in Abhängigkeit von Griffigkeit (Gesamtdaten)



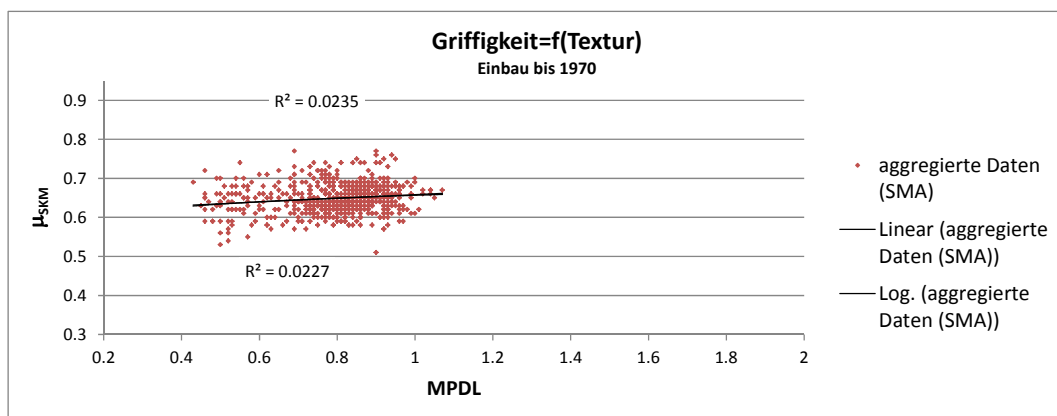
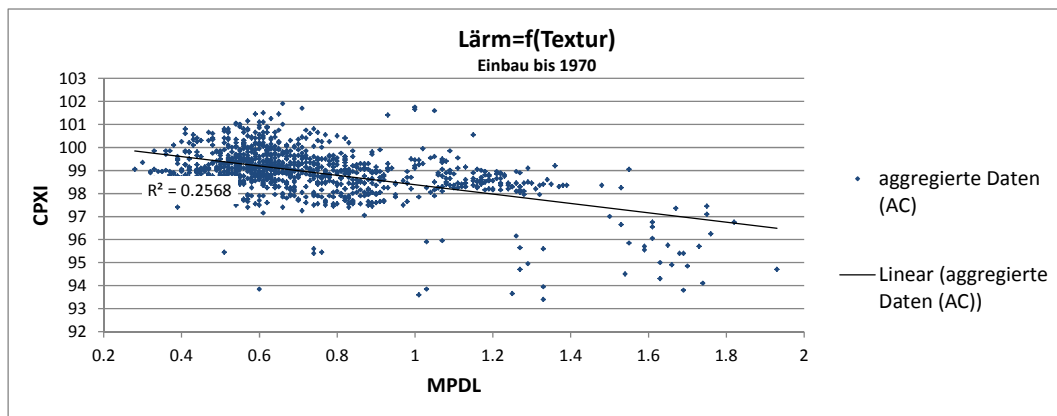
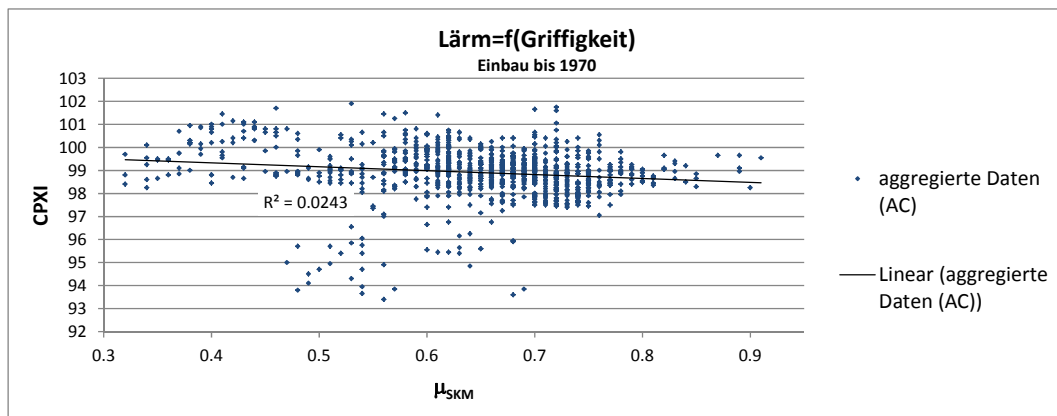
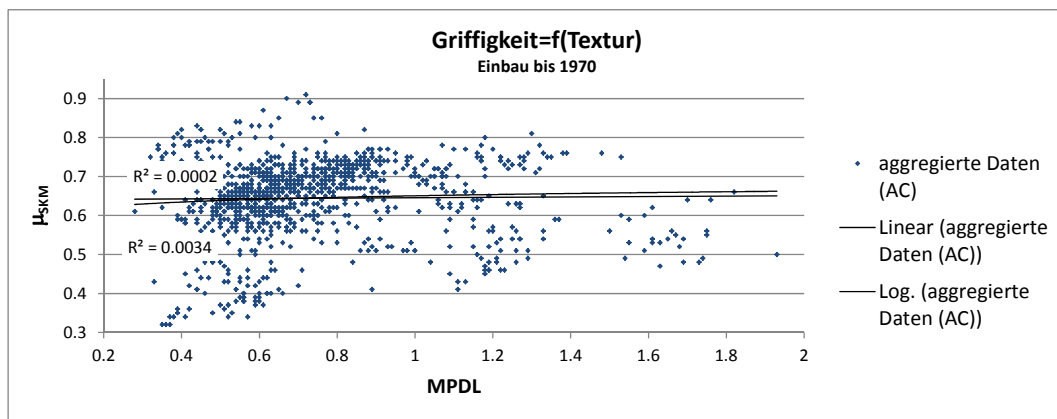


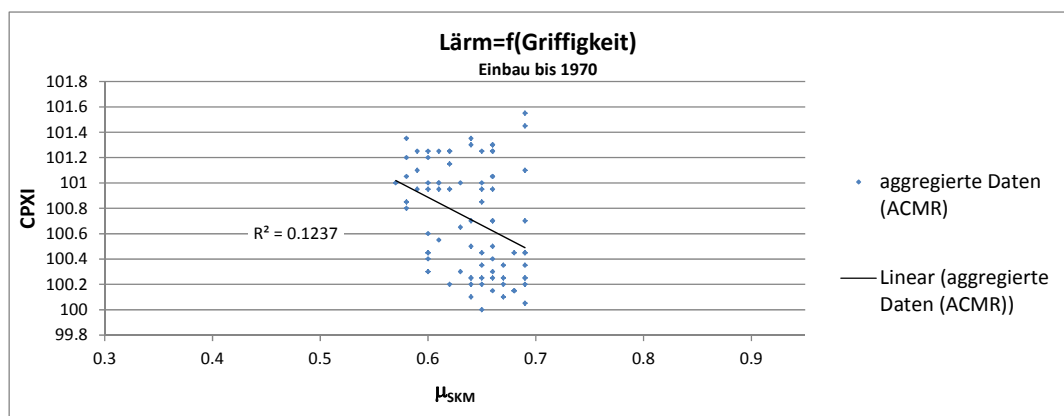
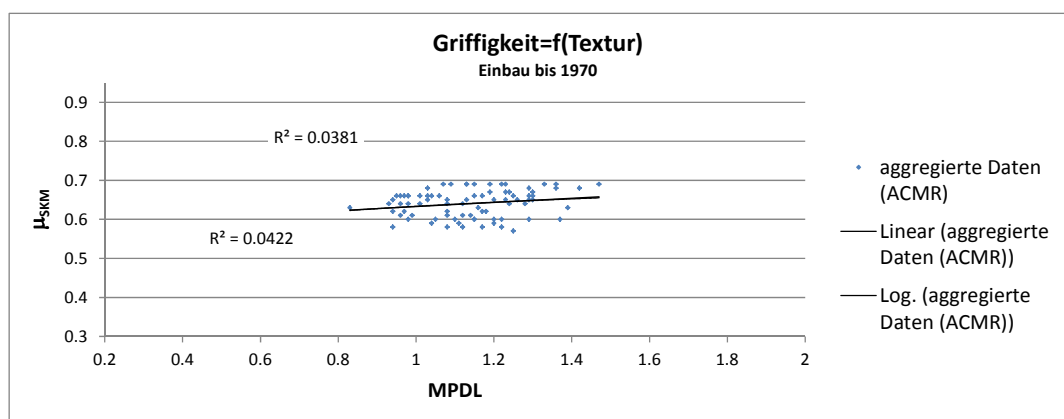
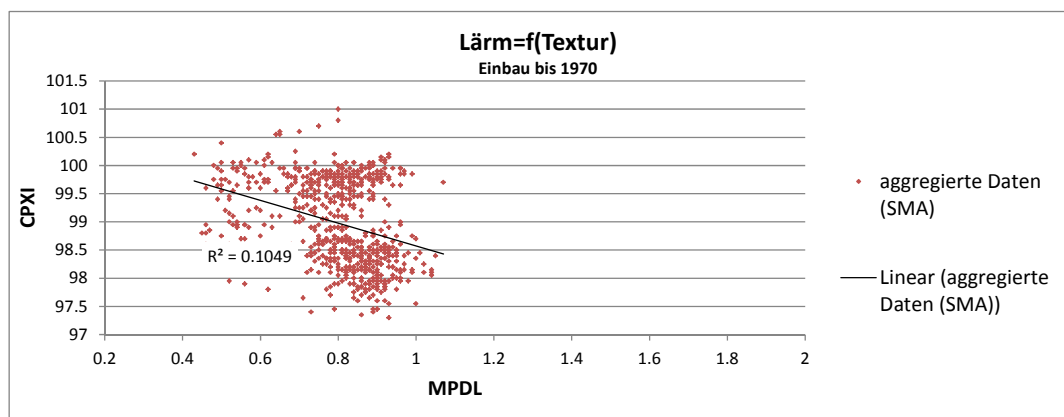
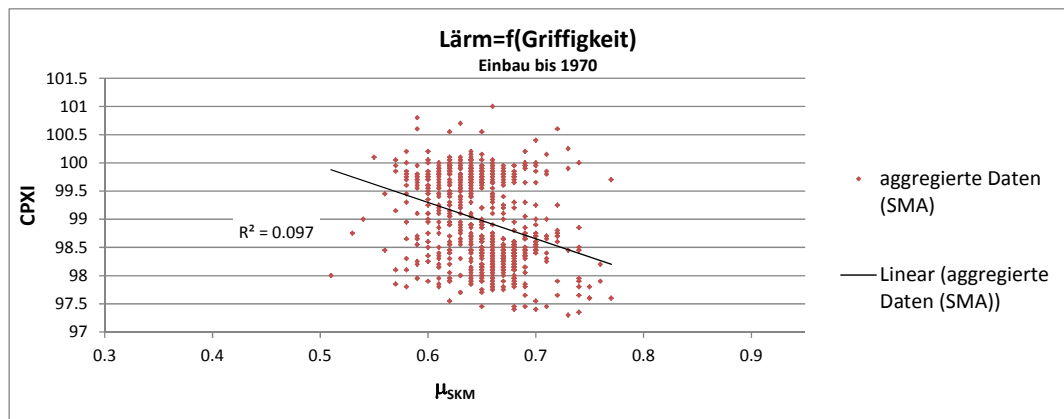
### V.1.3 Lärm in Abhängigkeit von Textur (Gesamtdaten)

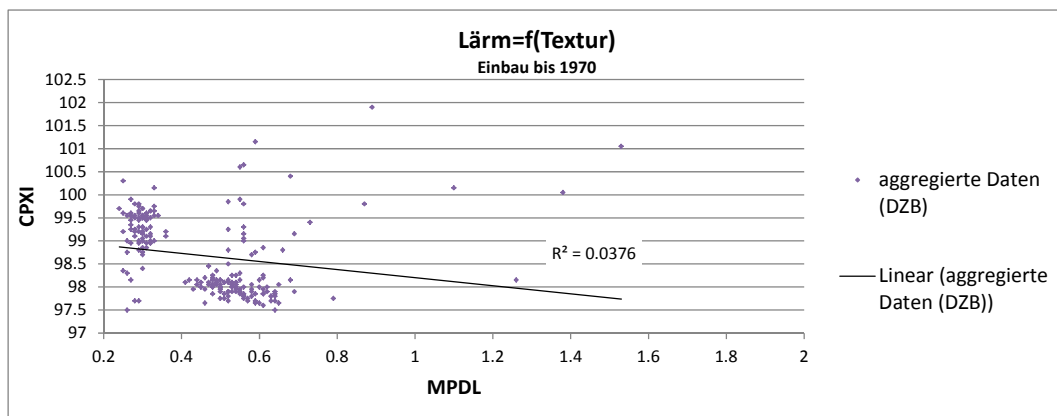
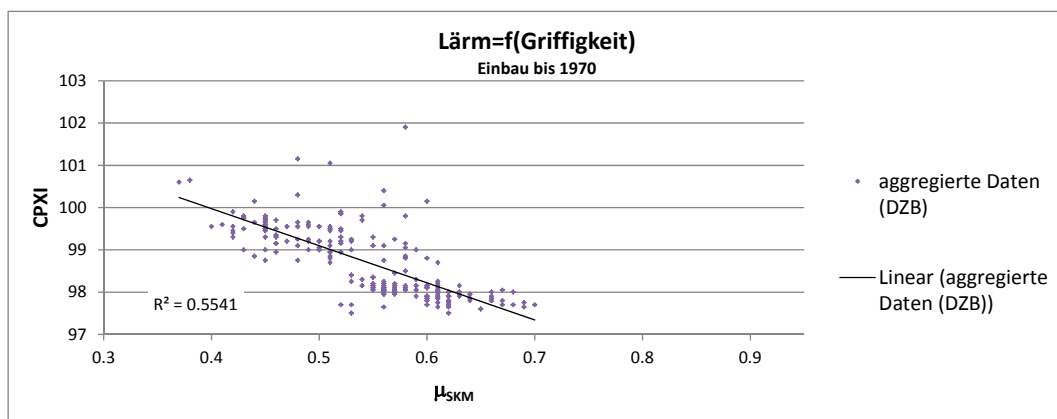
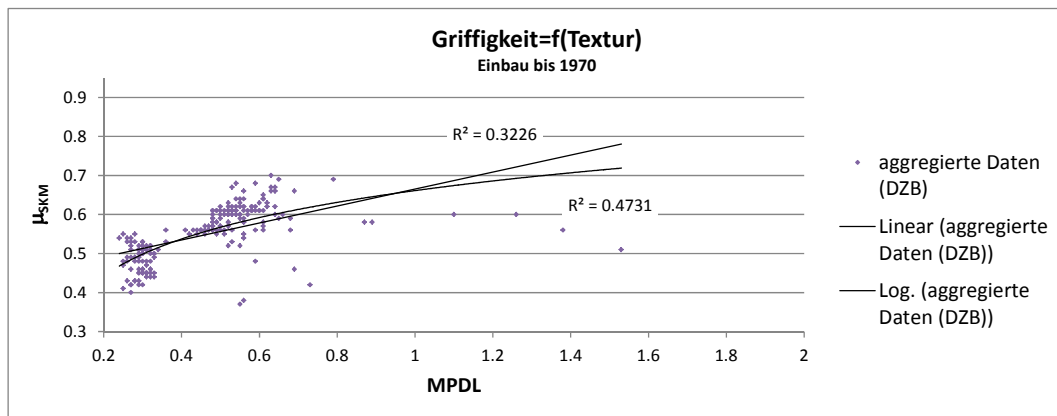
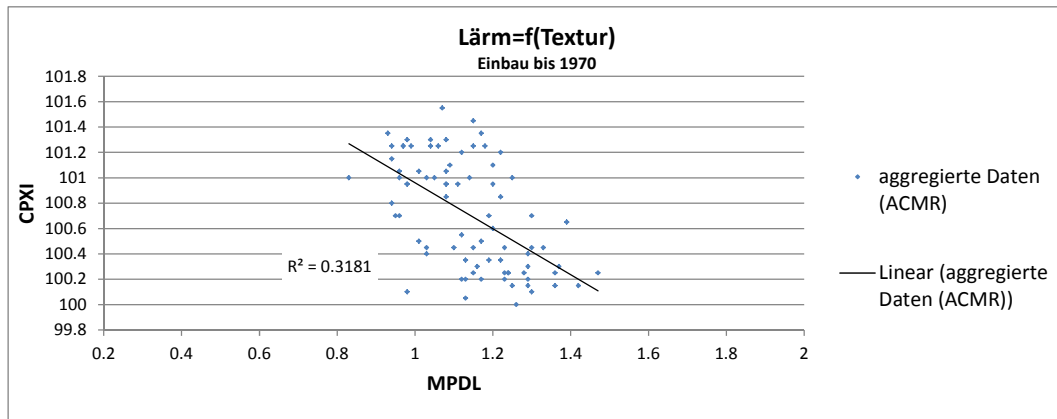




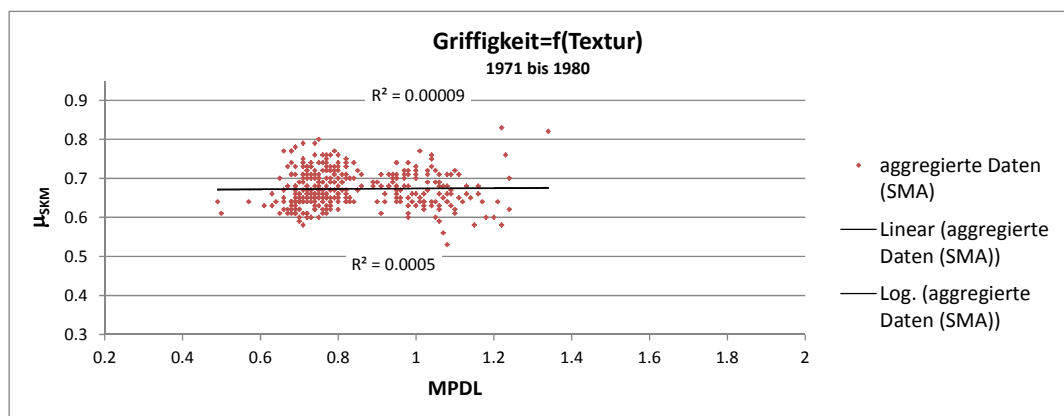
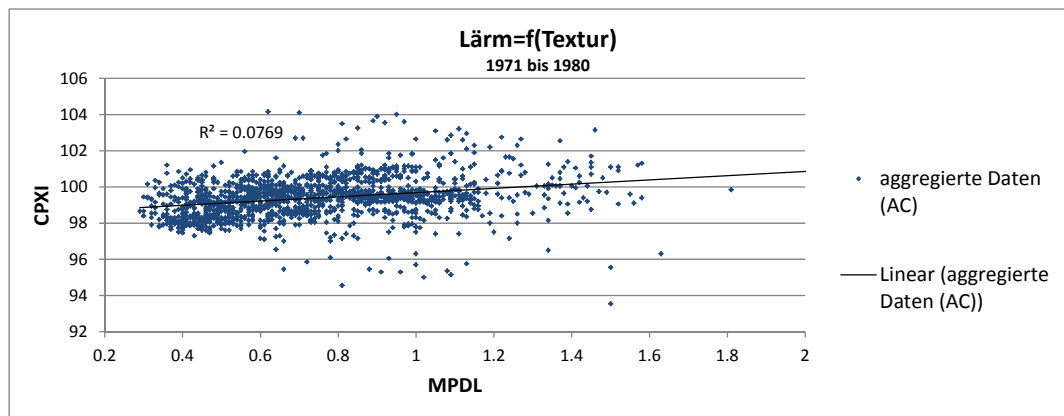
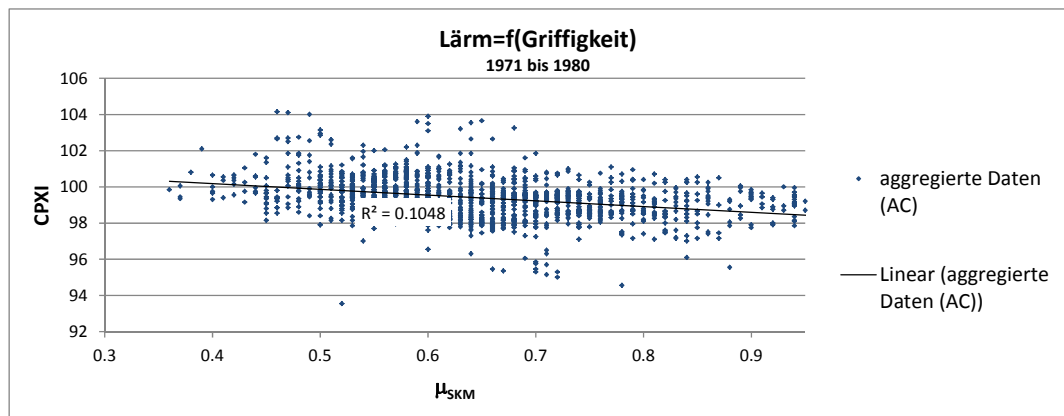
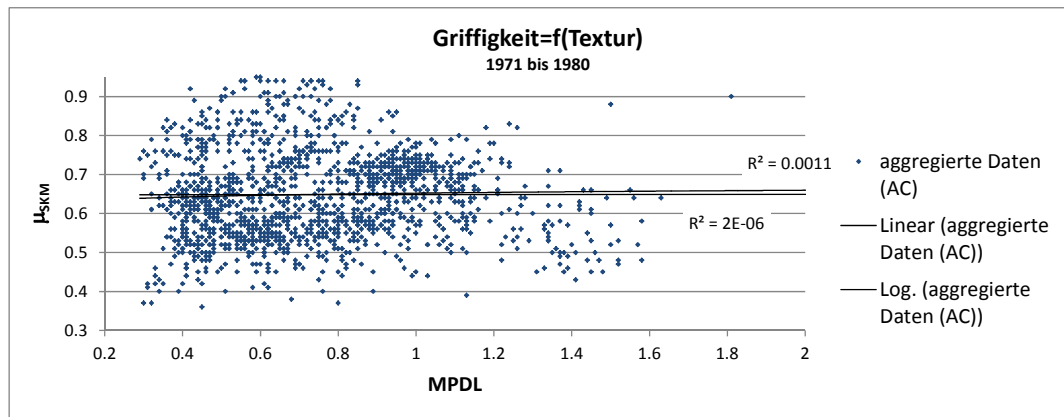
### V.1.4 Abhängigkeiten für Deckschichttypen für Einbaujahre bis 1970

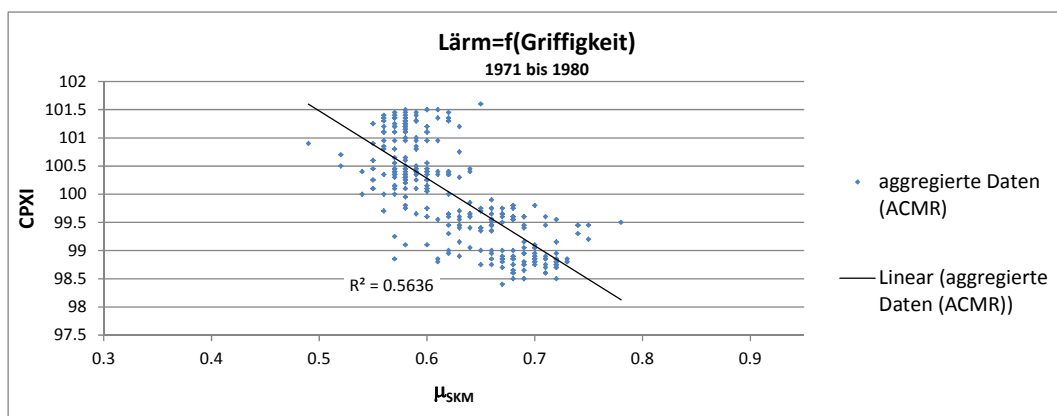
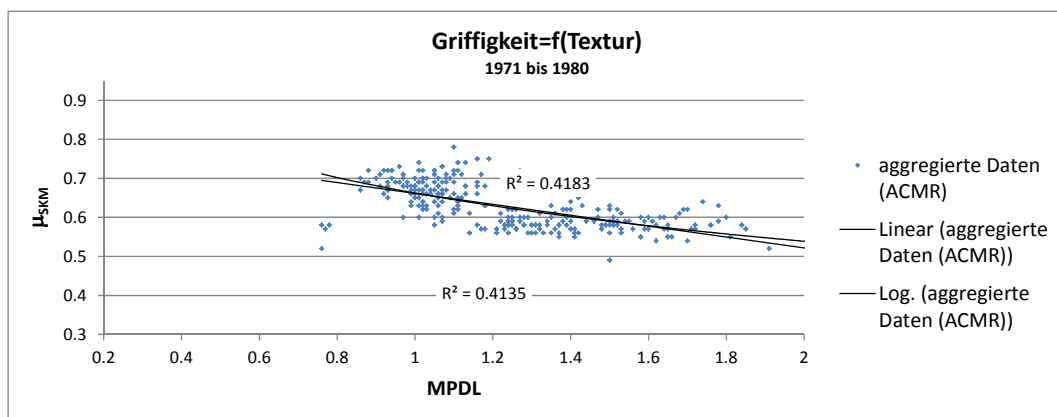
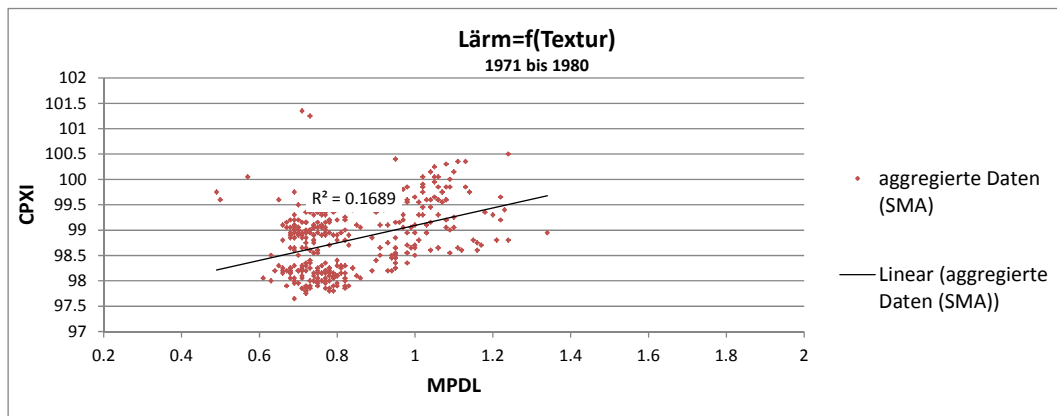
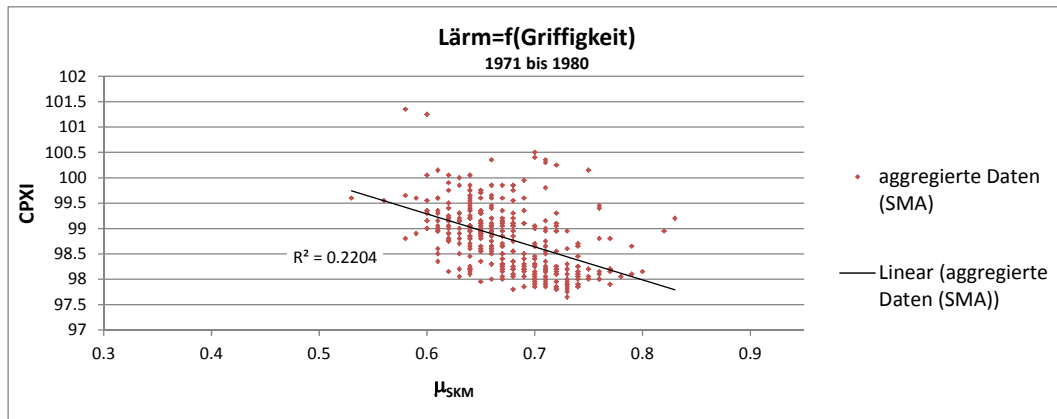


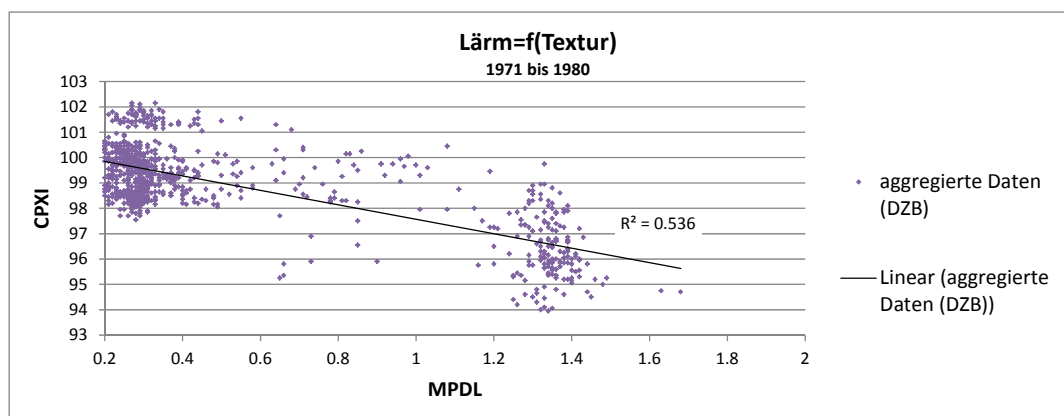
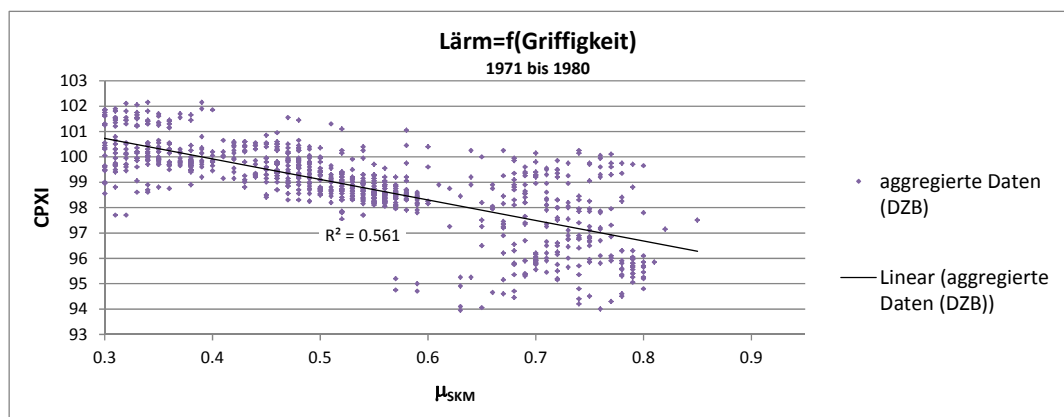
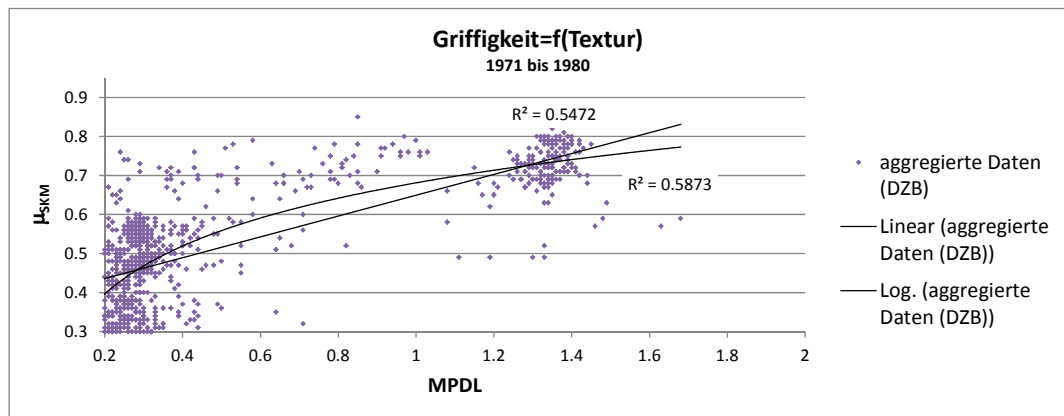
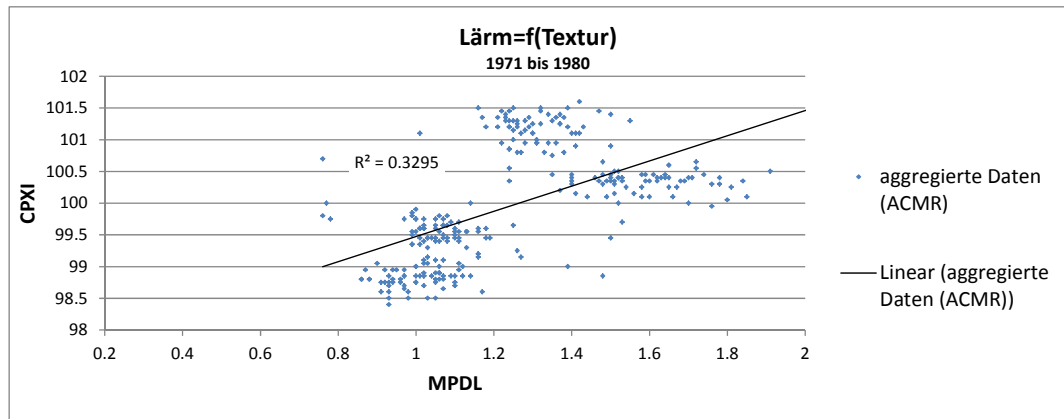


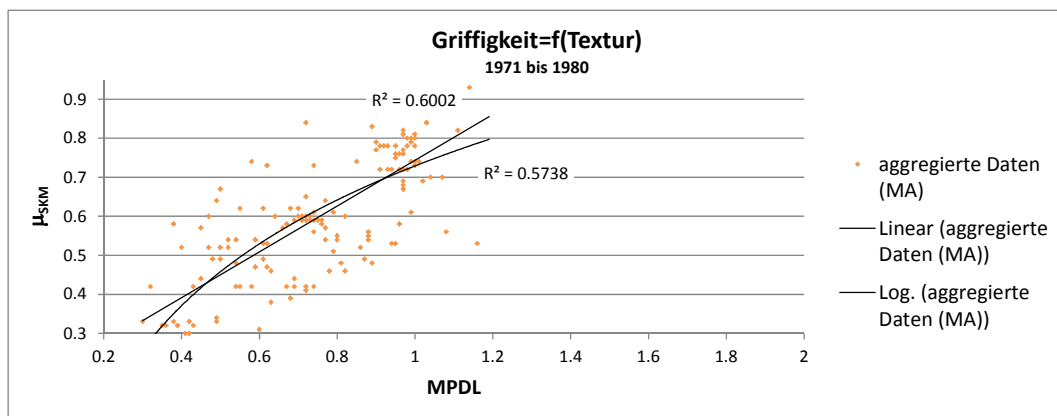
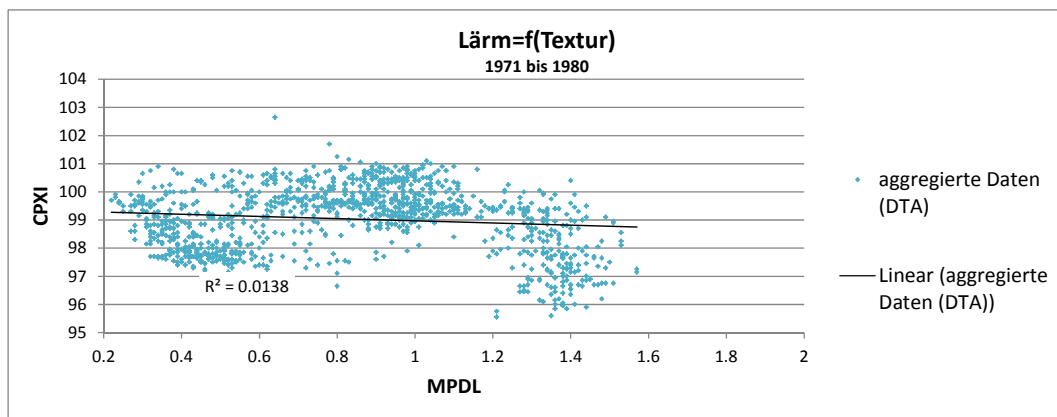
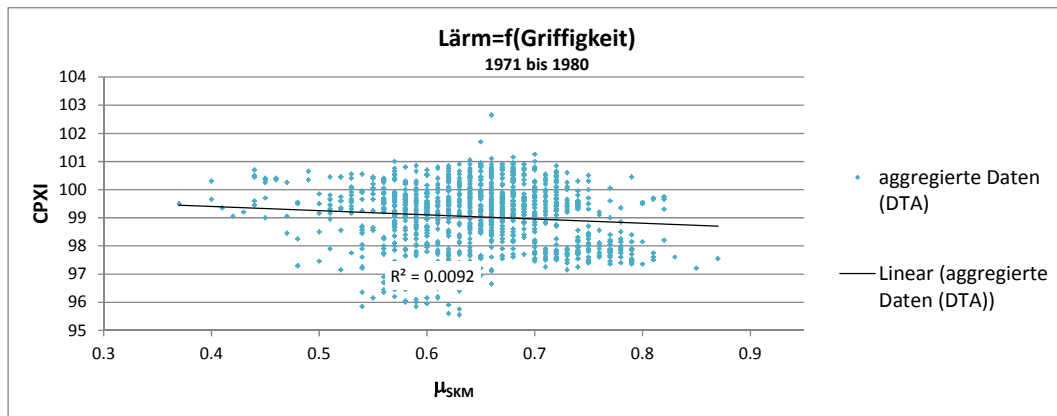
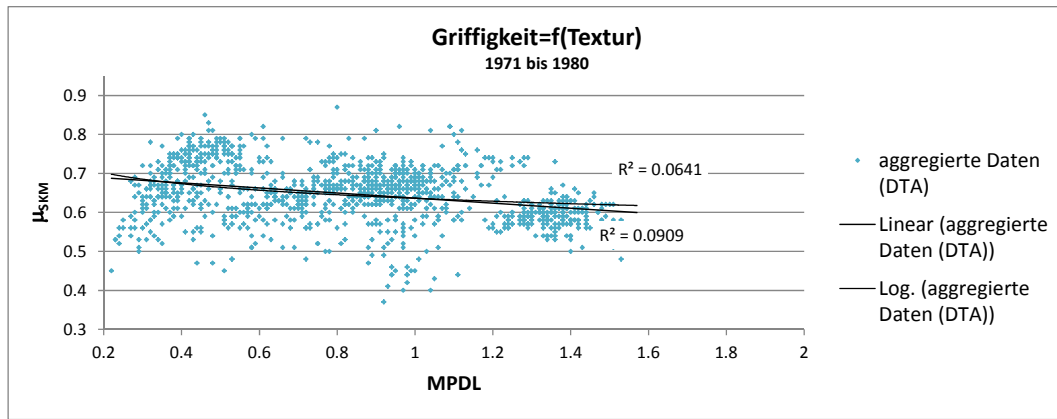


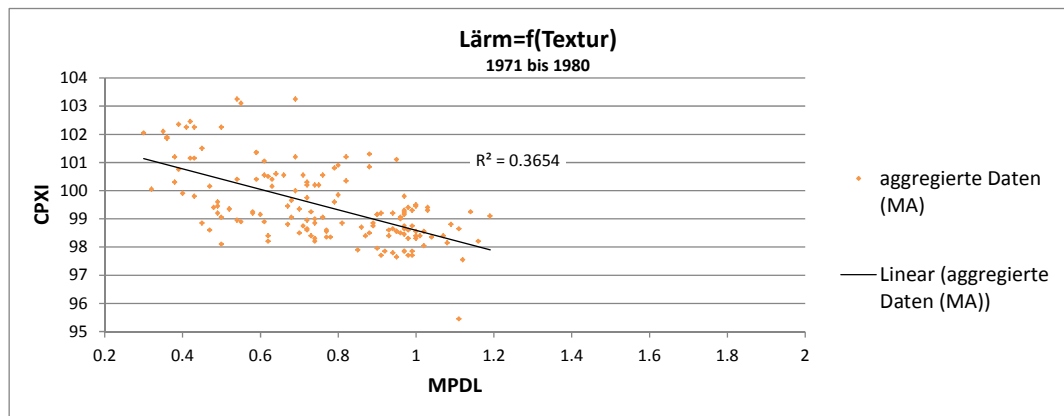
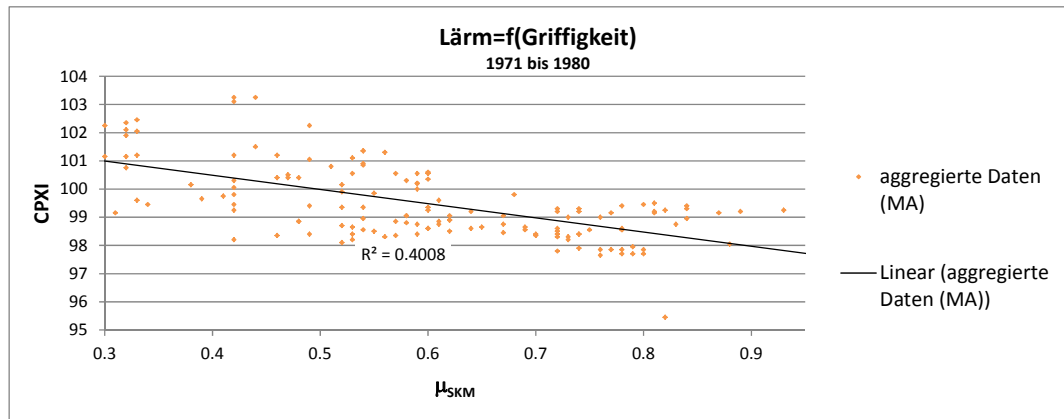
## V.1.5 Abhängigkeiten für Deckschichttypen für Einbaujahre 1971-1980



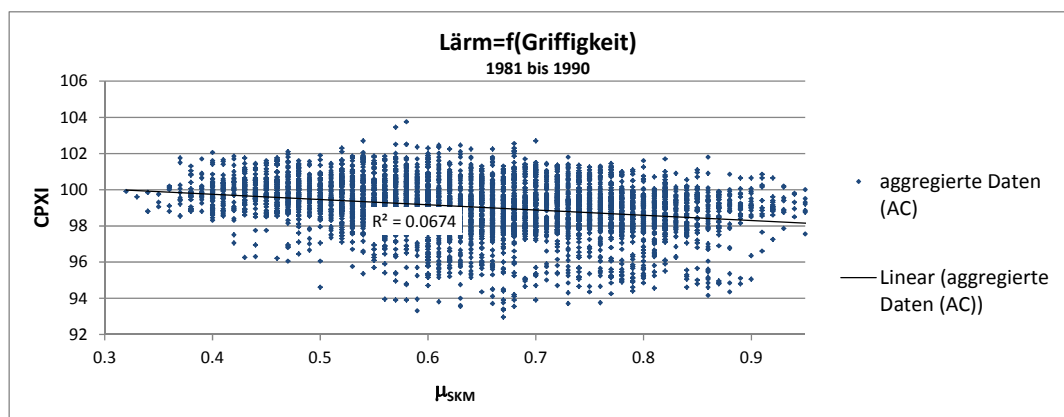
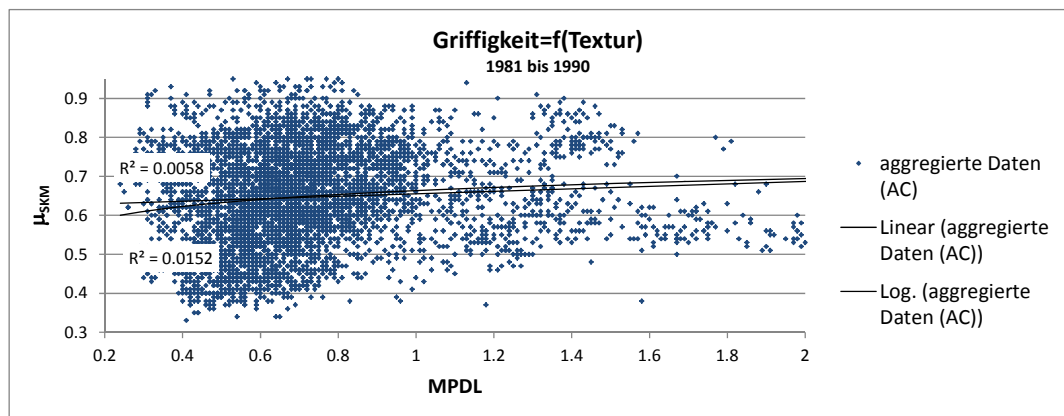


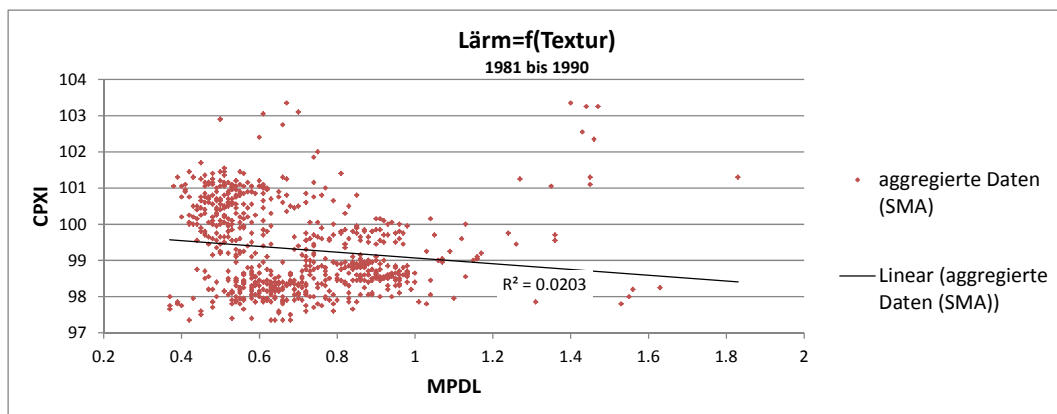
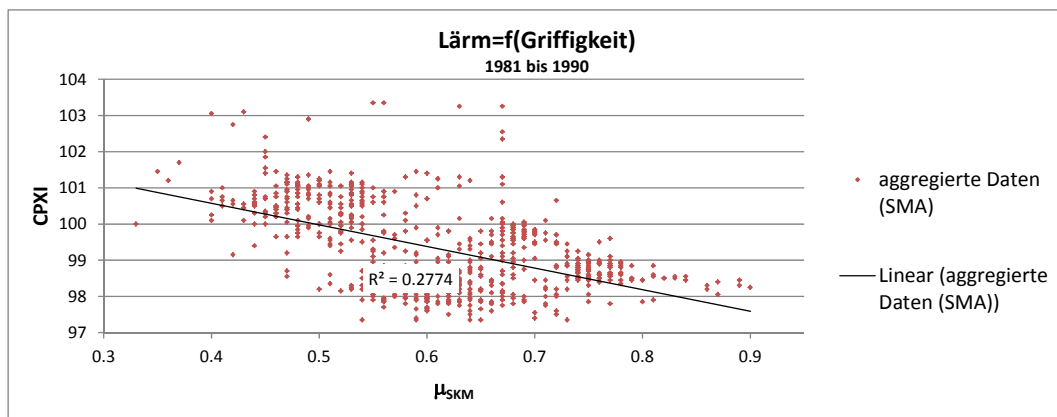
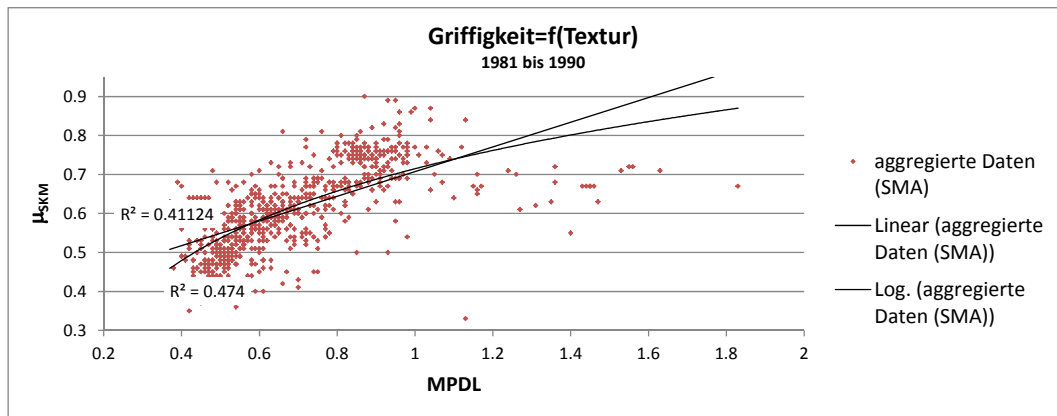
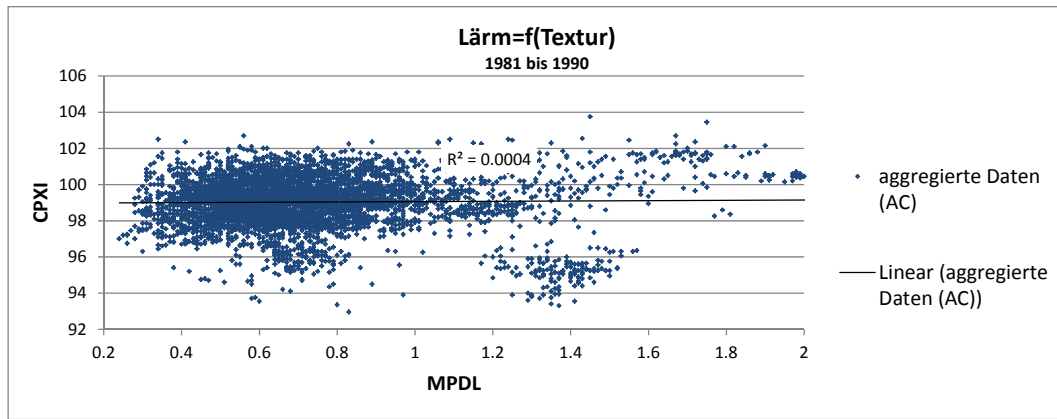


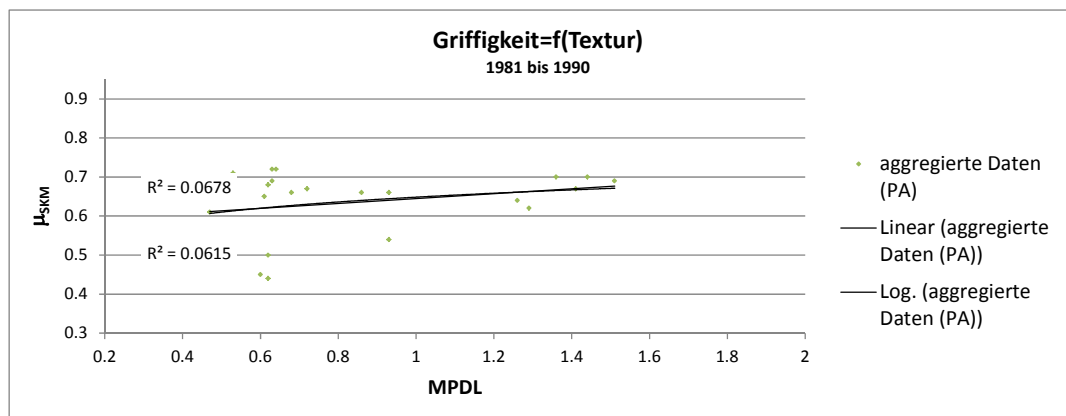
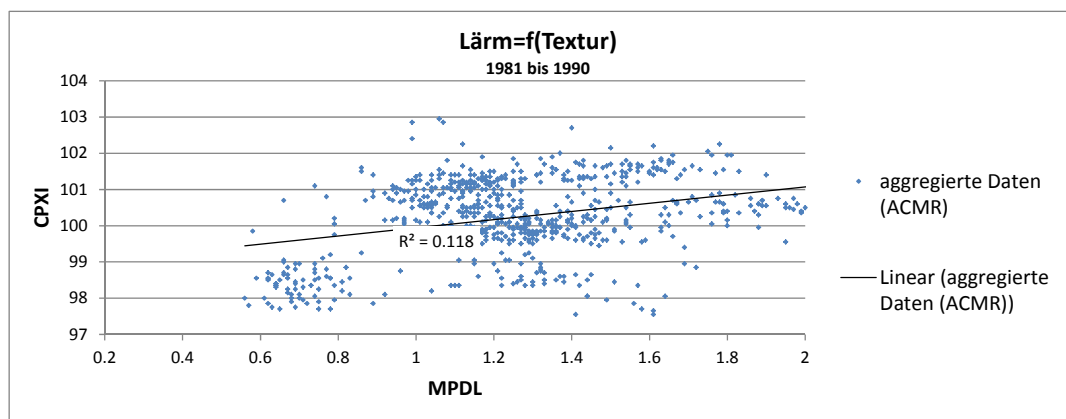
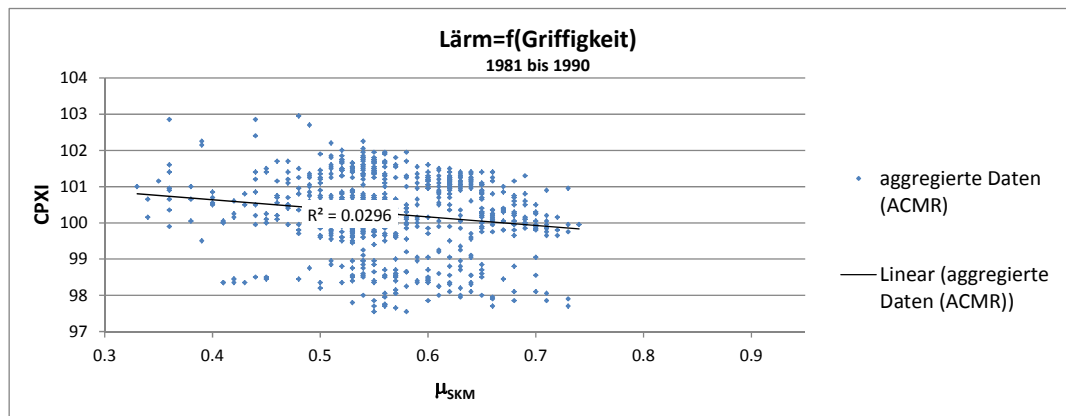
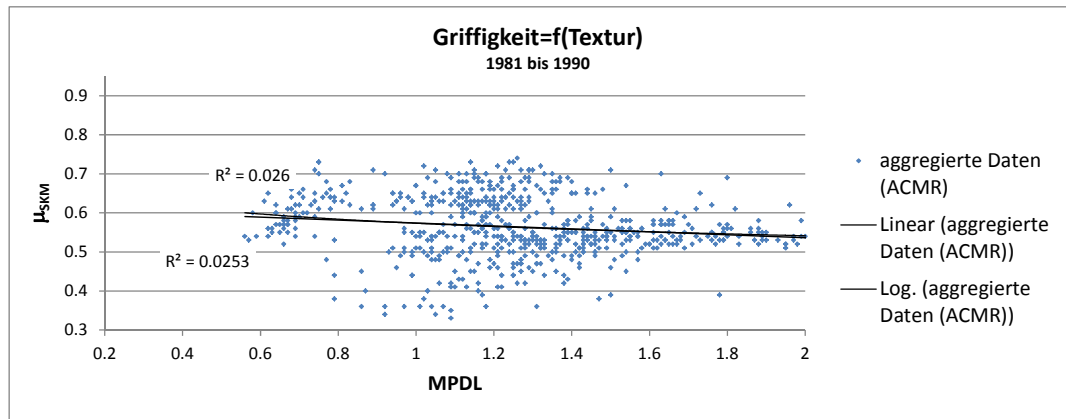


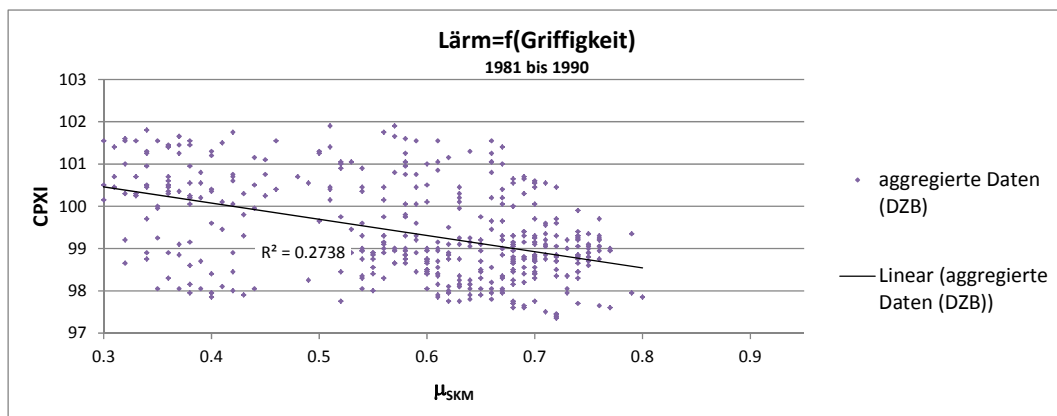
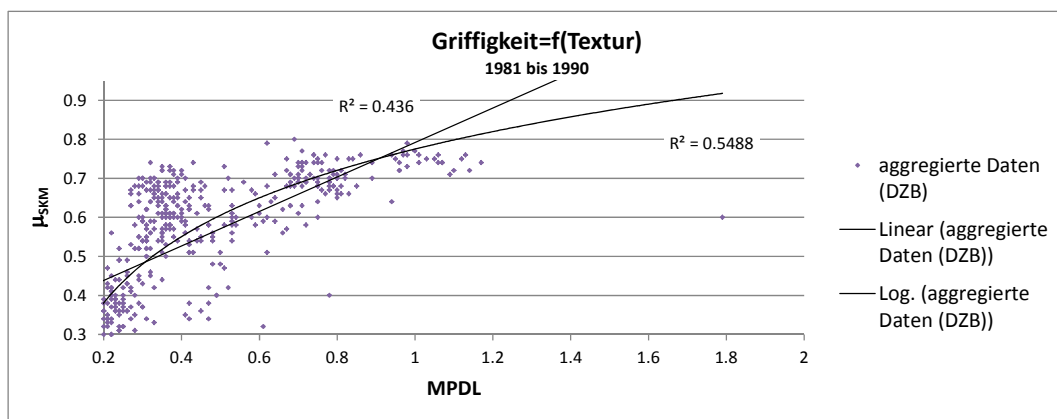
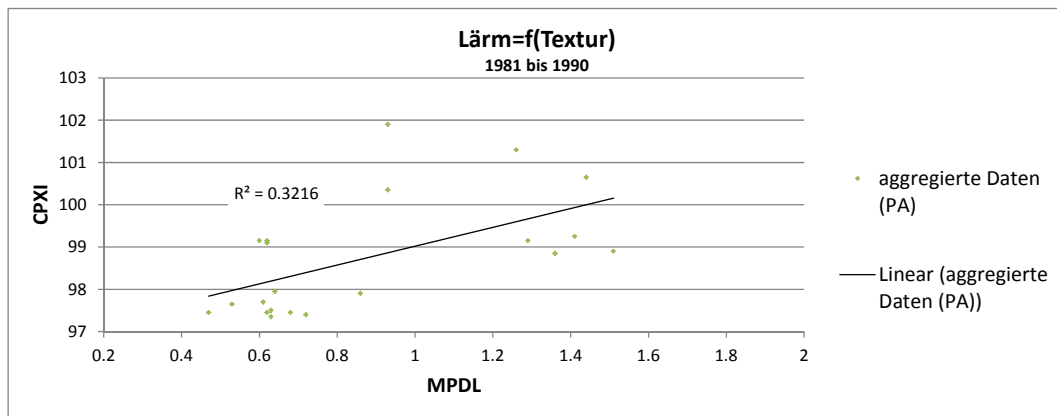
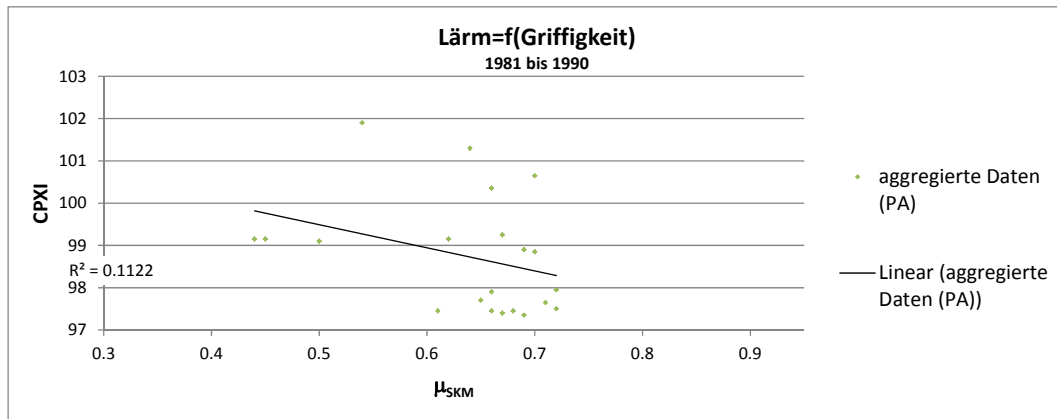


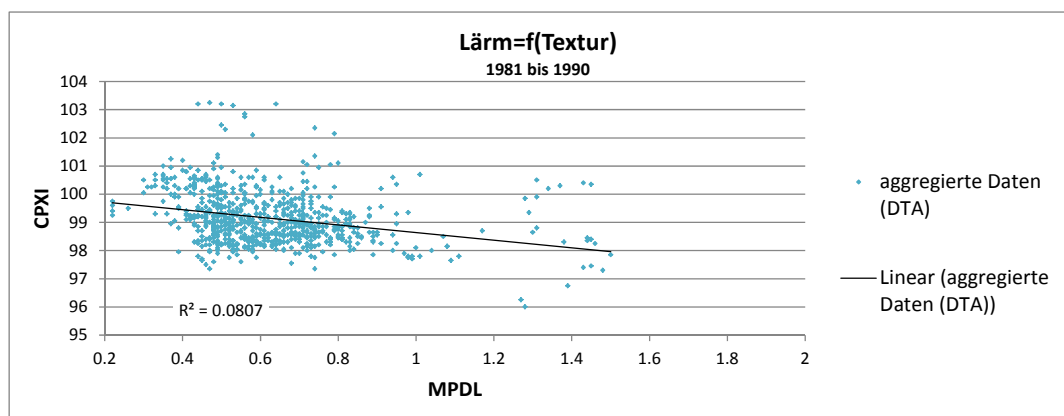
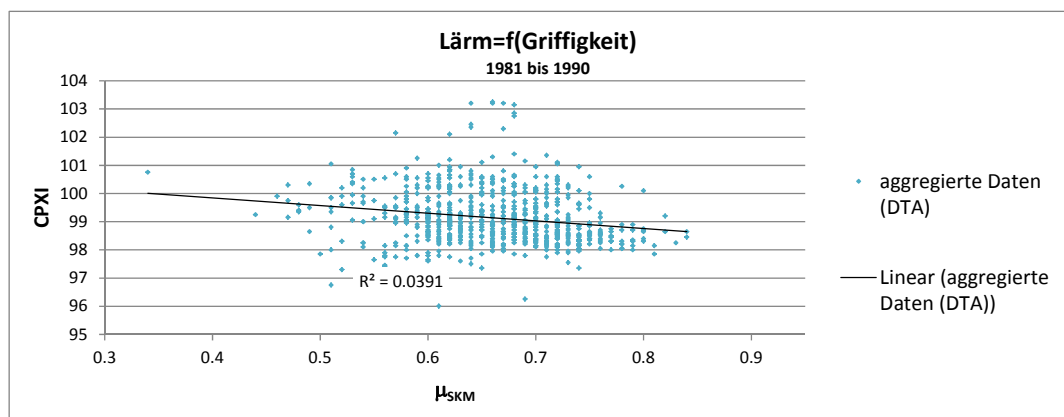
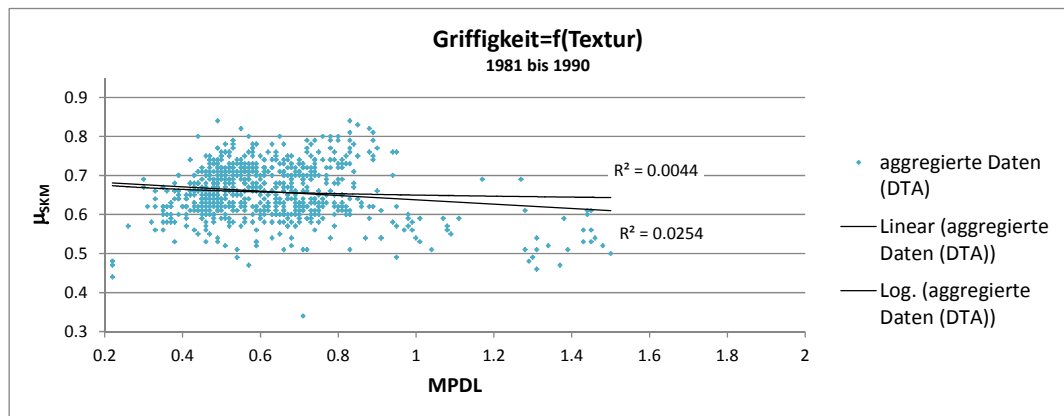
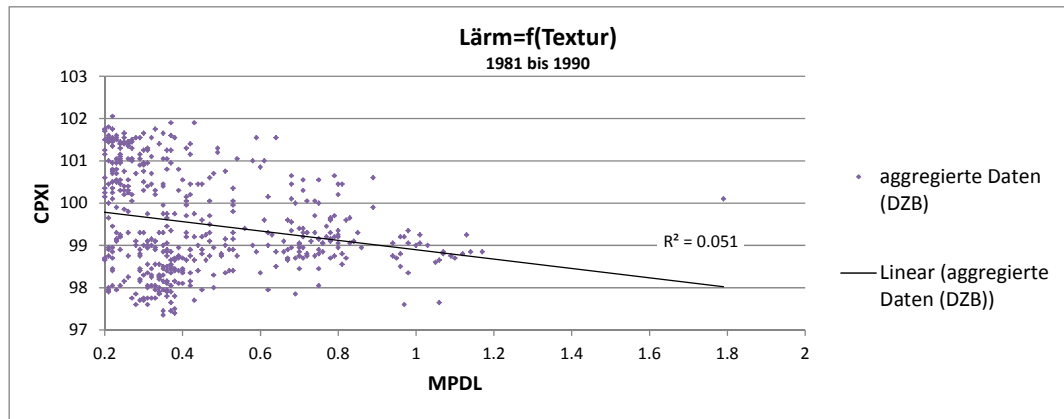
## V.1.6 Abhängigkeiten für Deckschichttypen für Einbaujahre 1981-1990

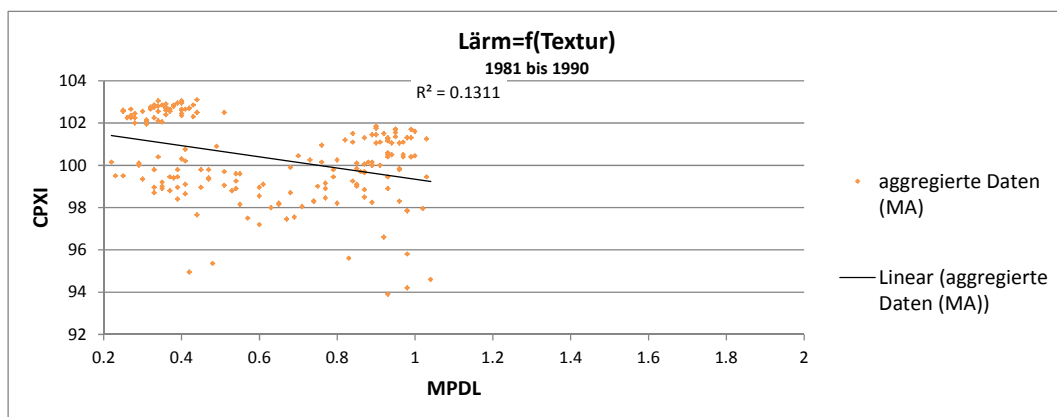
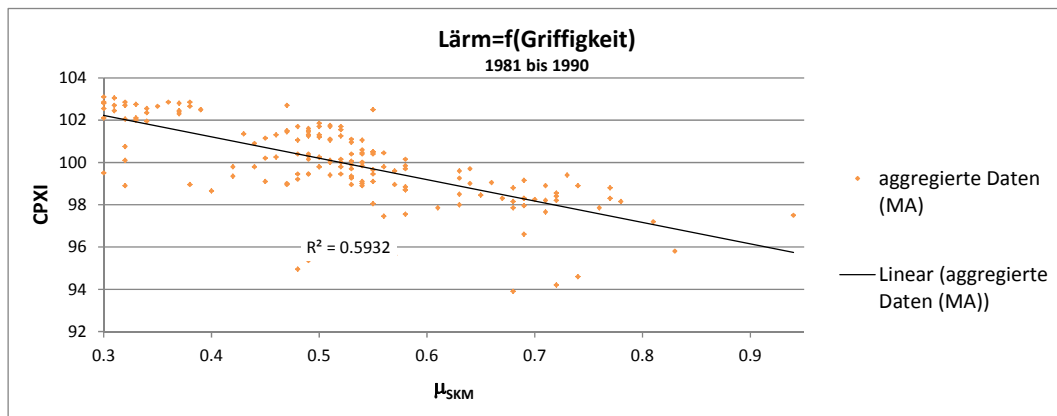
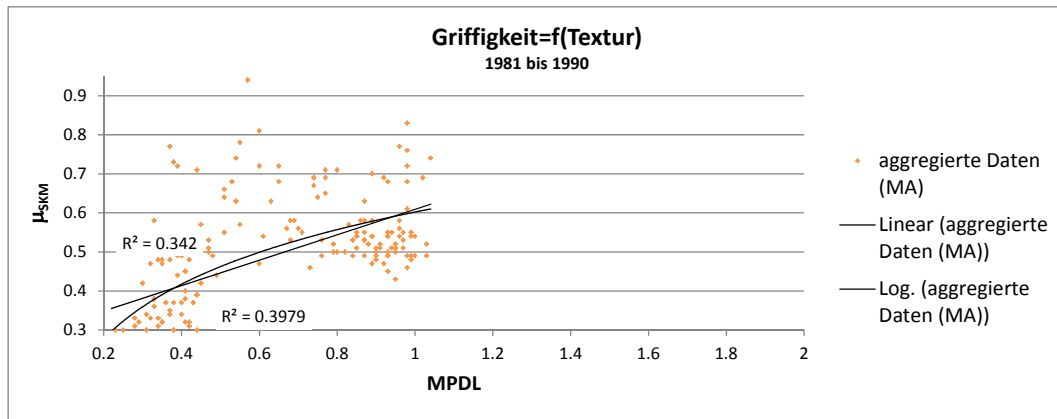




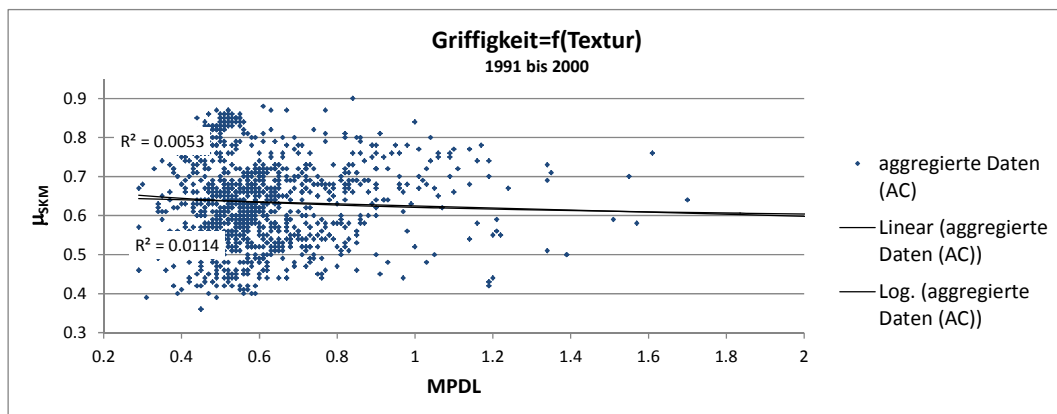


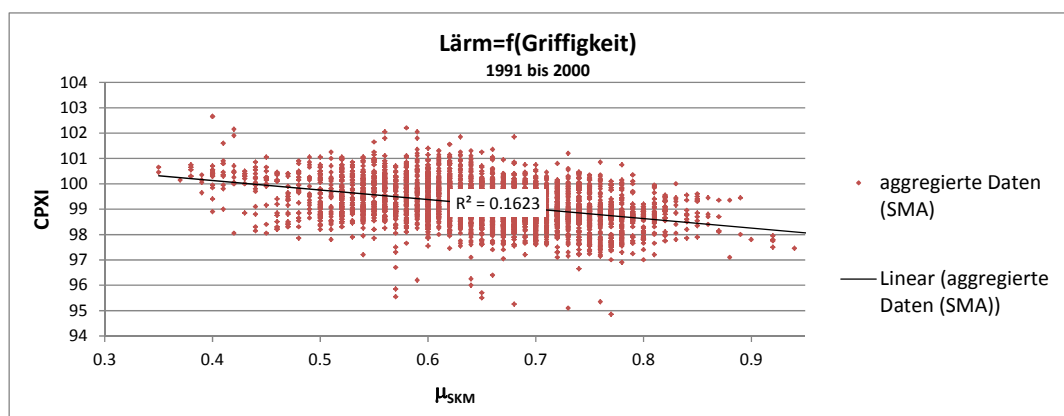
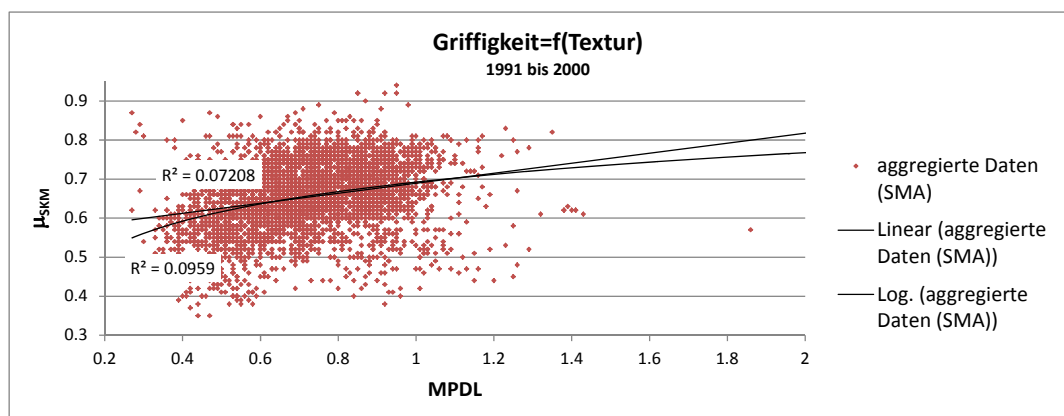
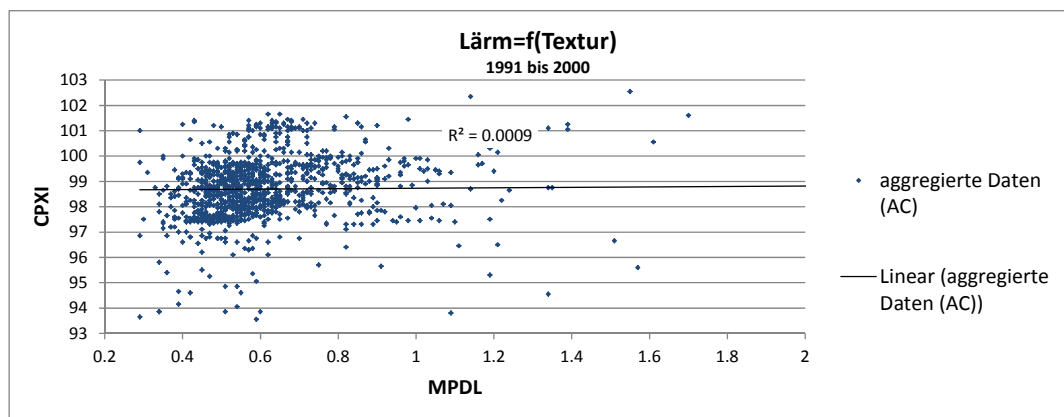
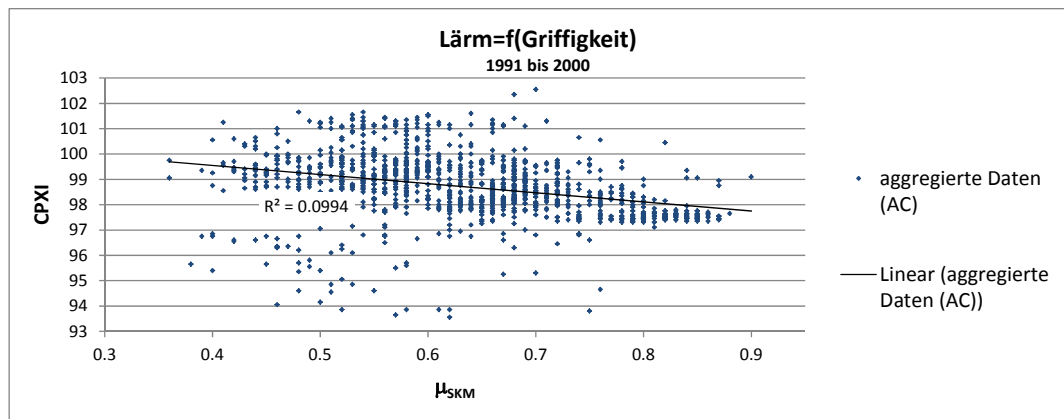


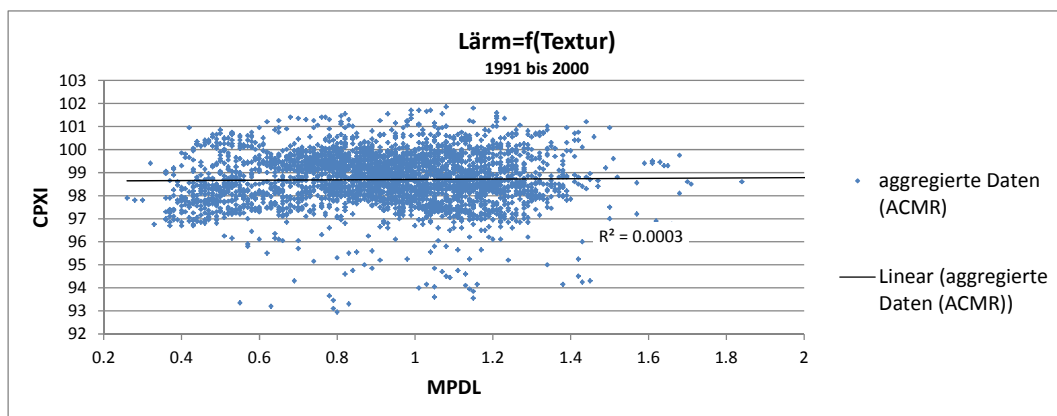
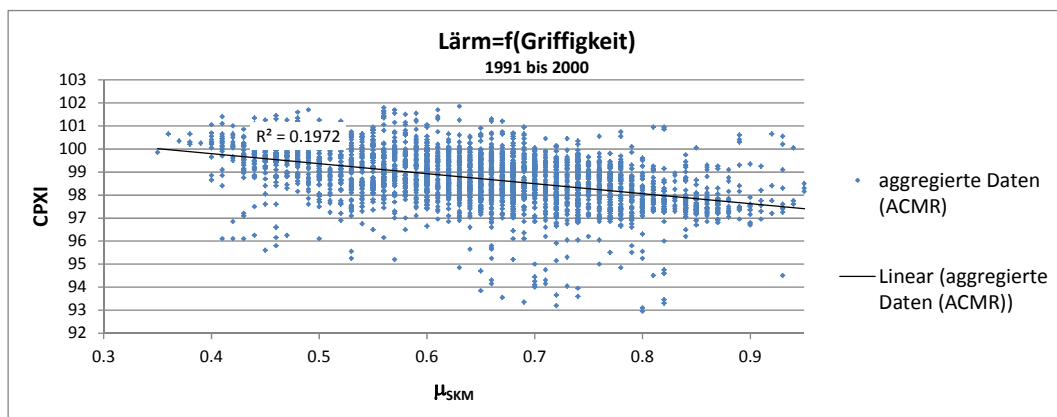
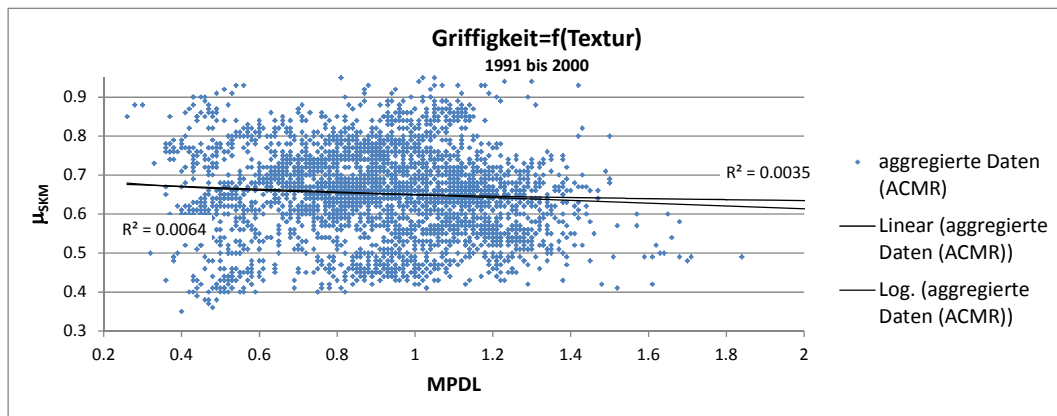
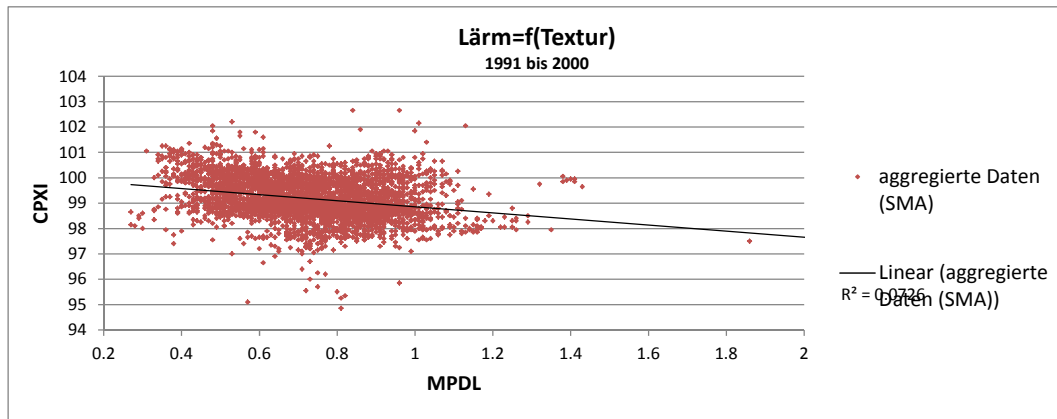


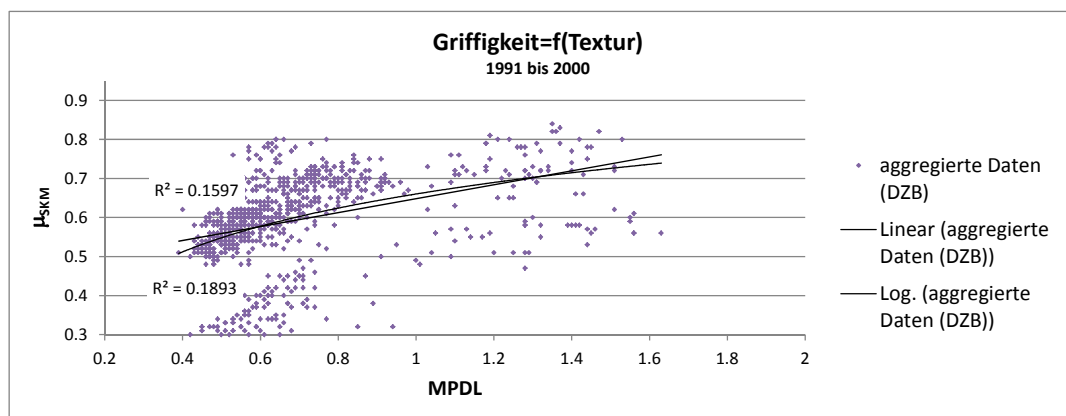
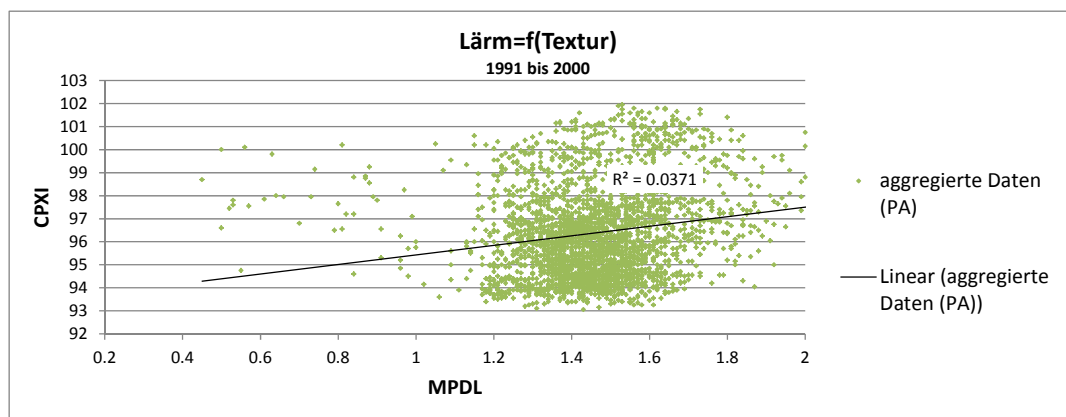
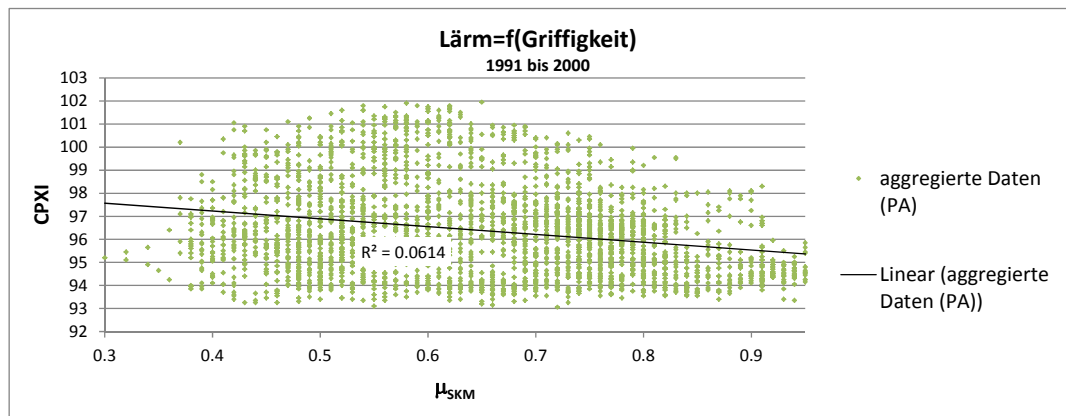
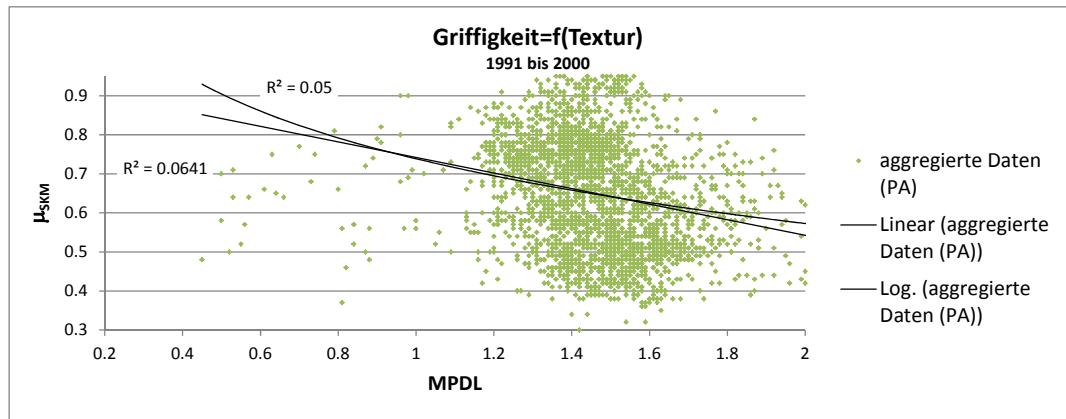


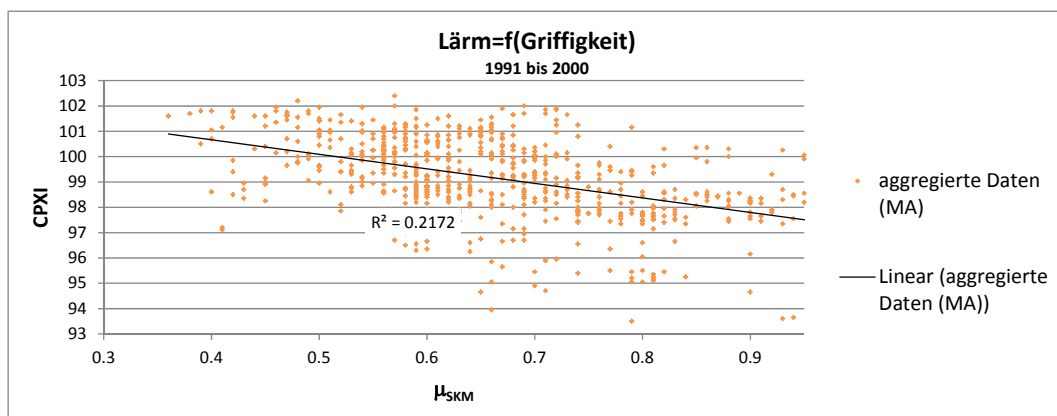
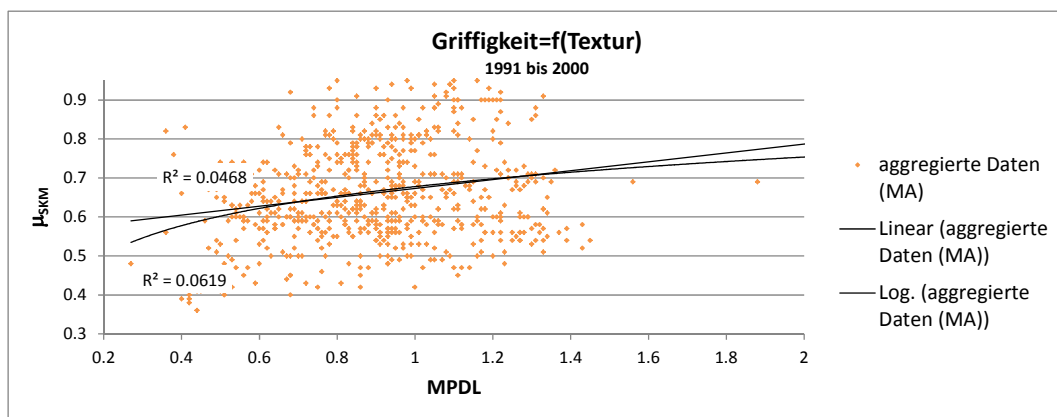
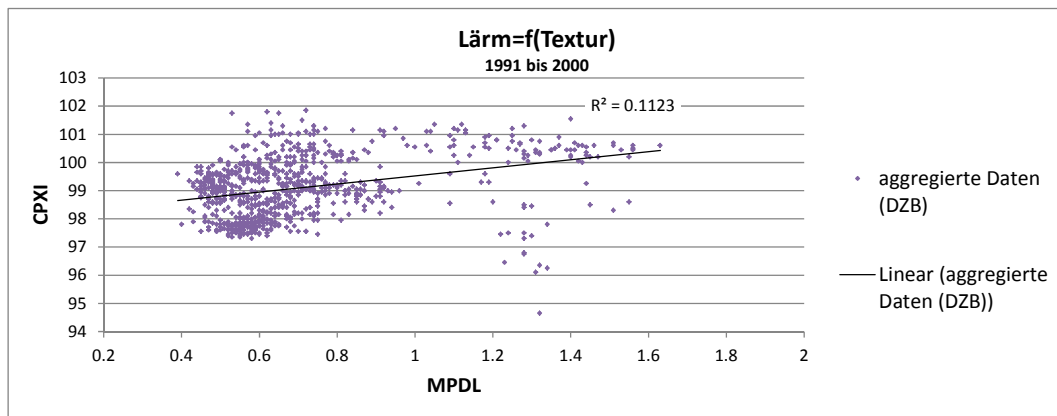
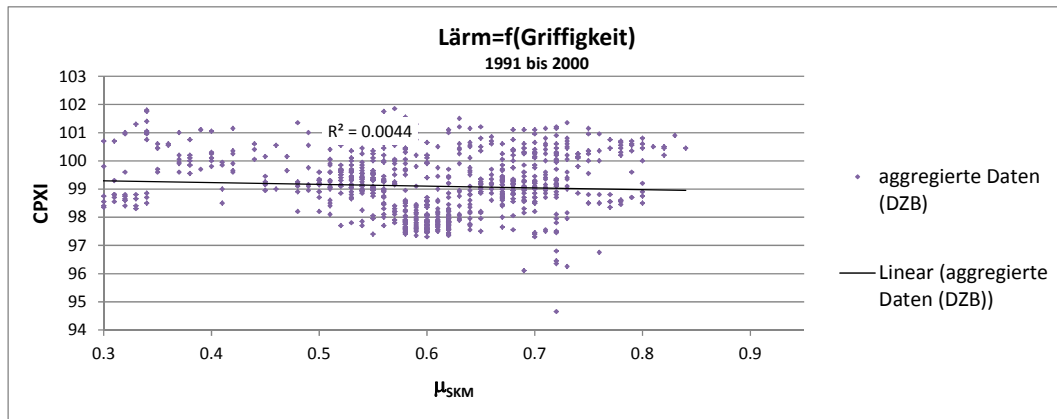
## V.1.7 Abhängigkeiten für Deckschichttypen für Einbaujahre 1991-2000

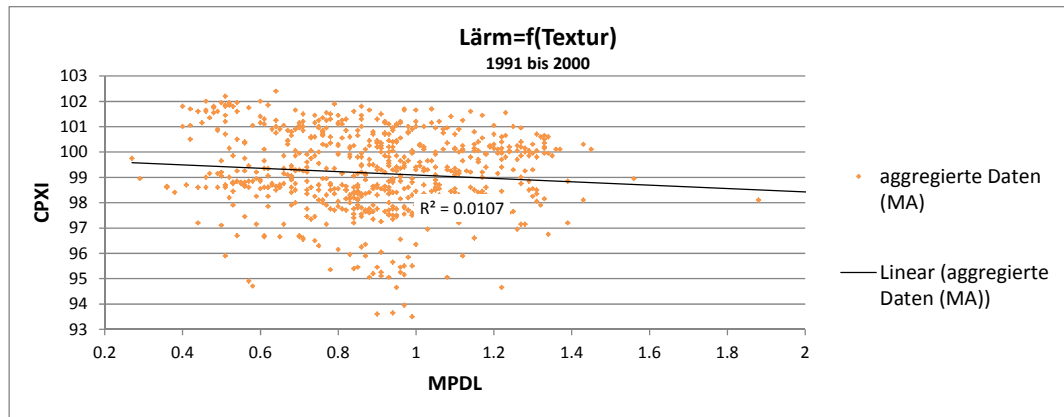




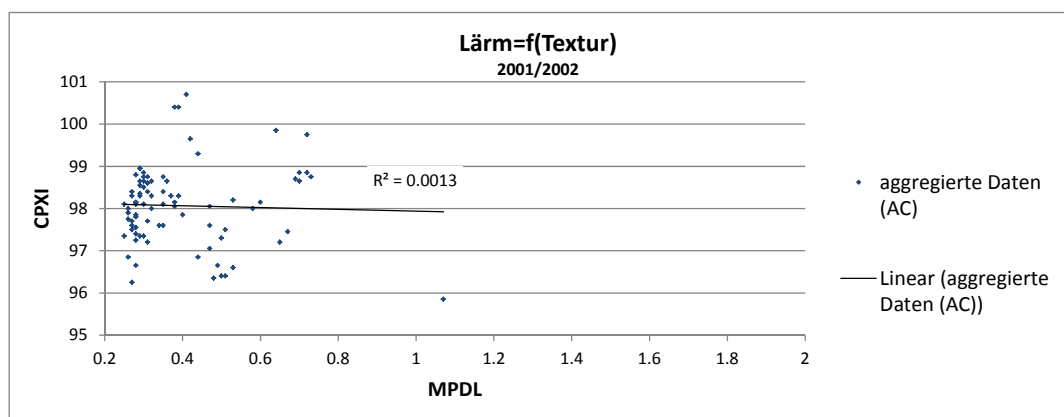
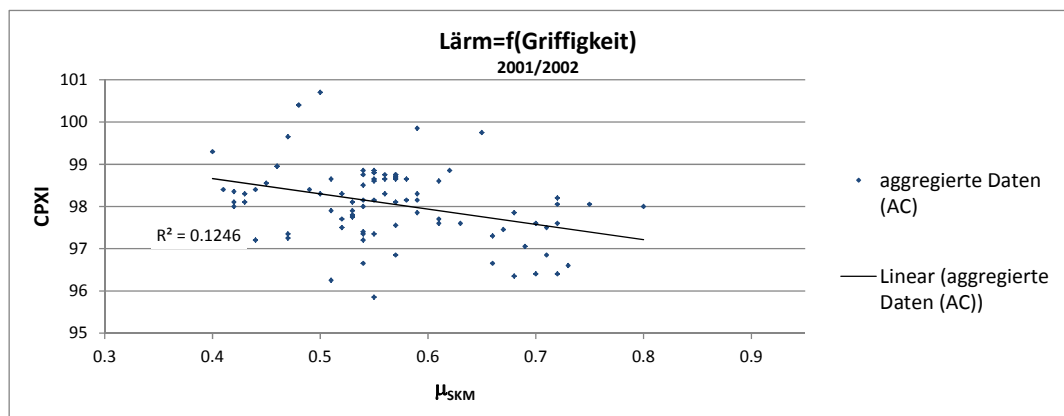
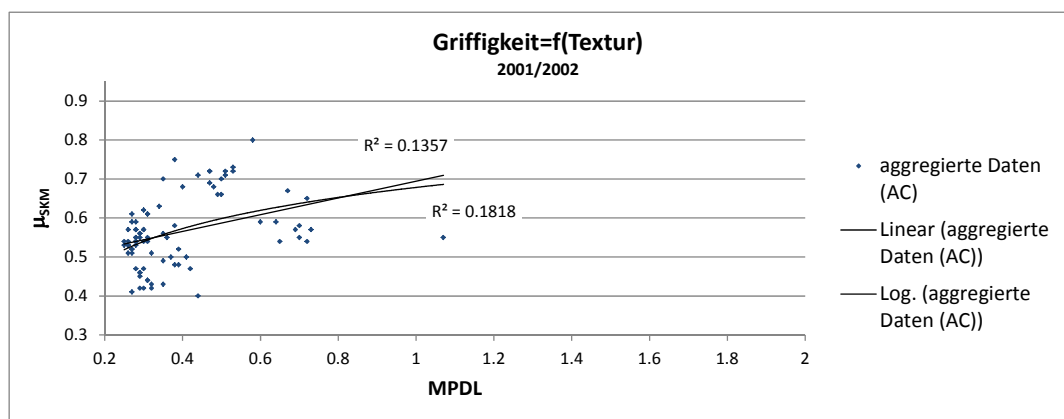


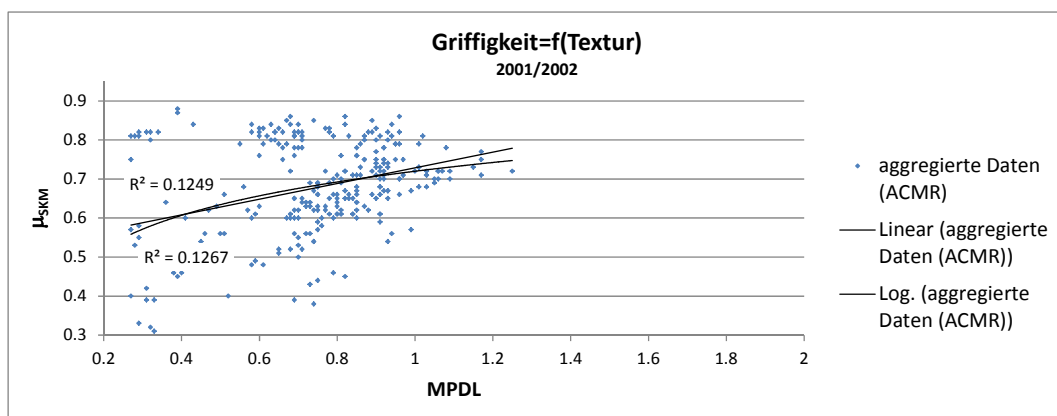
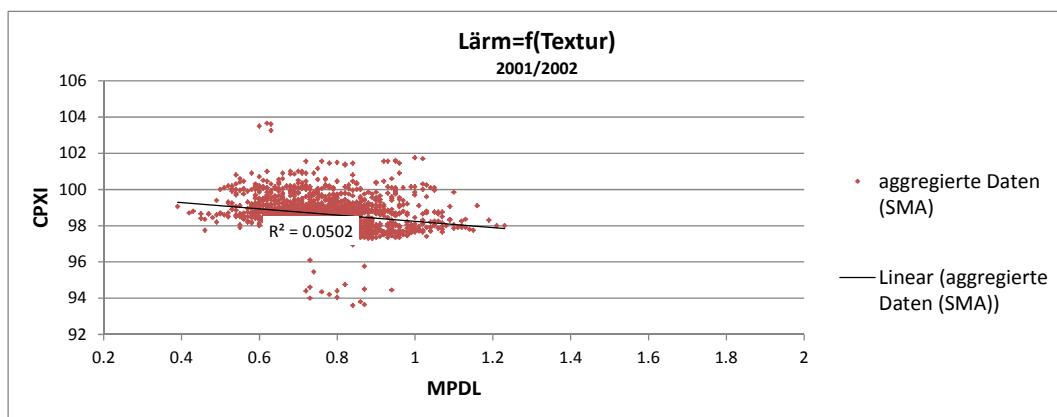
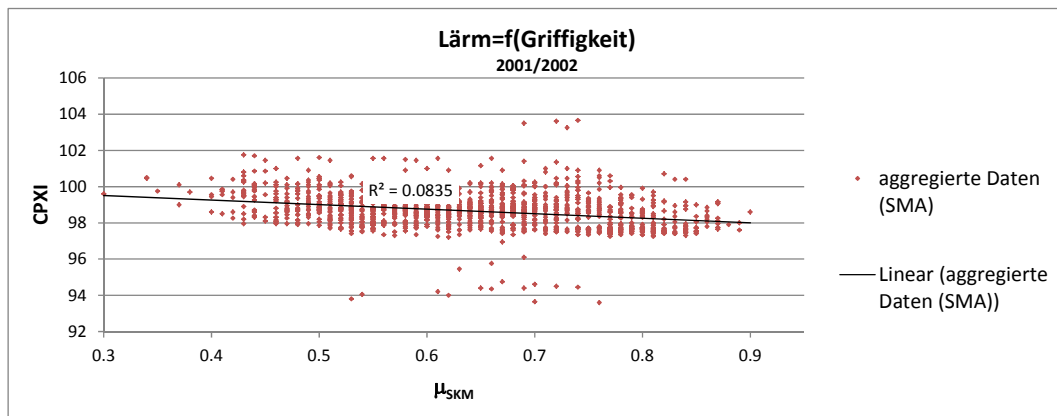
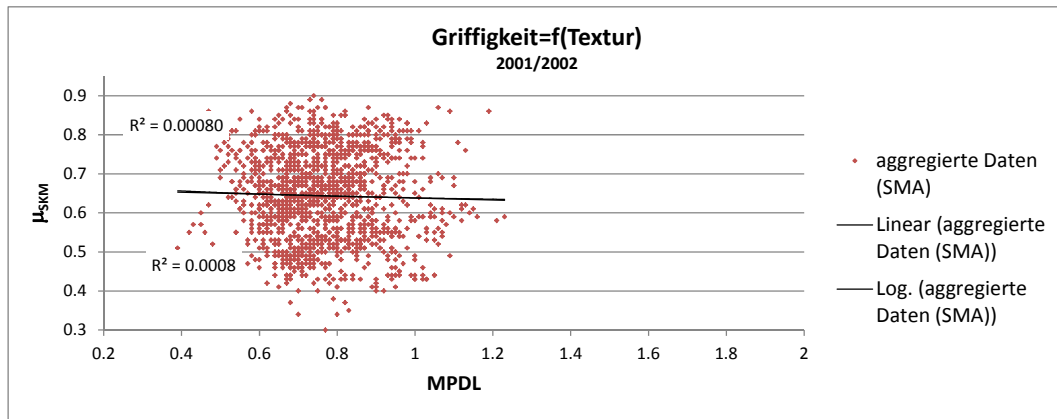


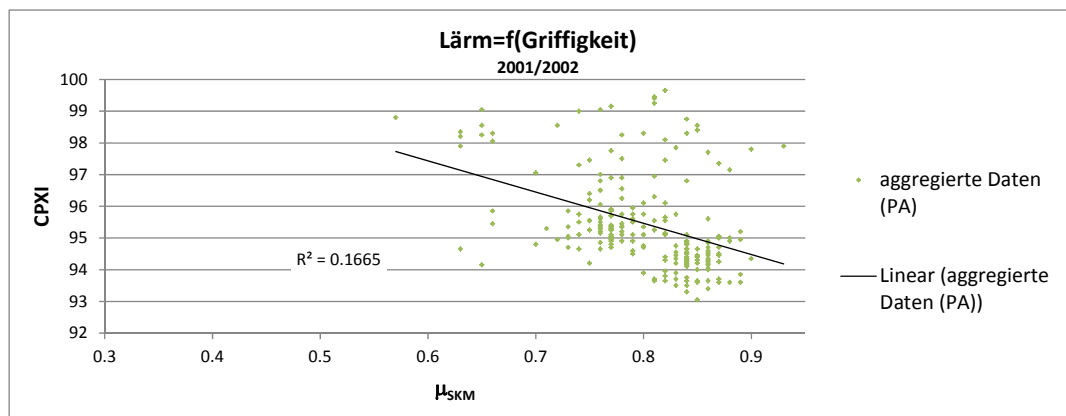
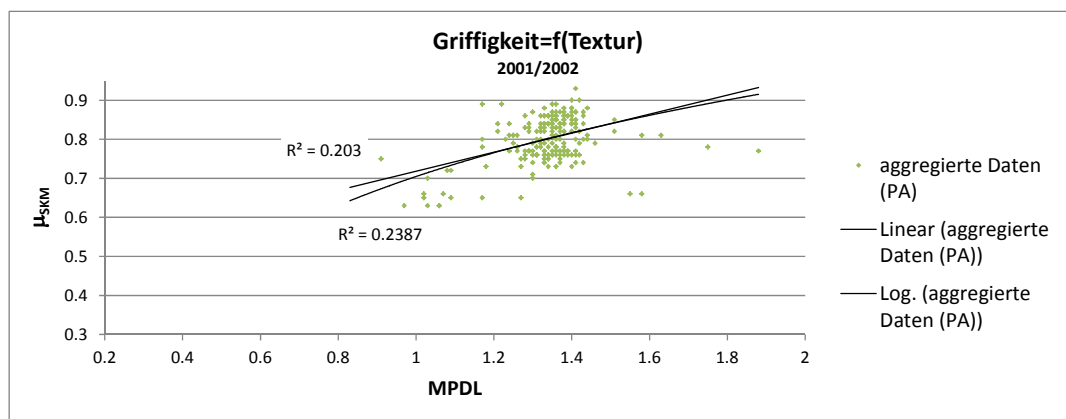
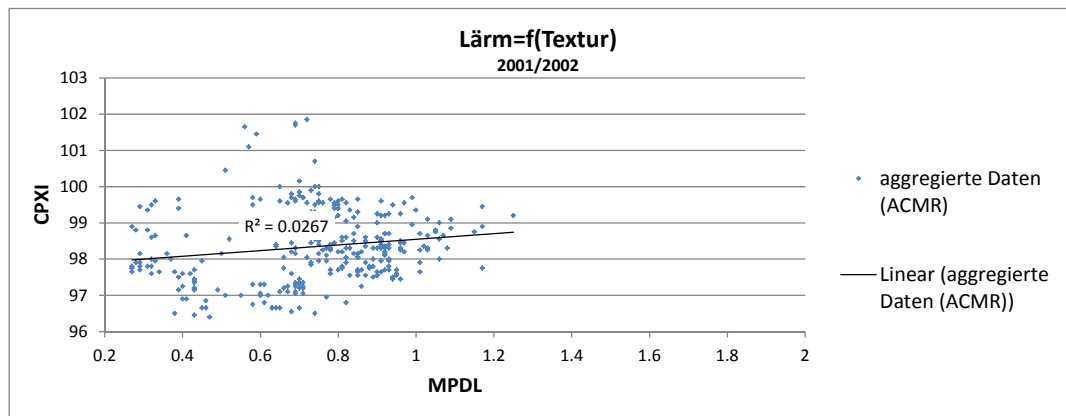
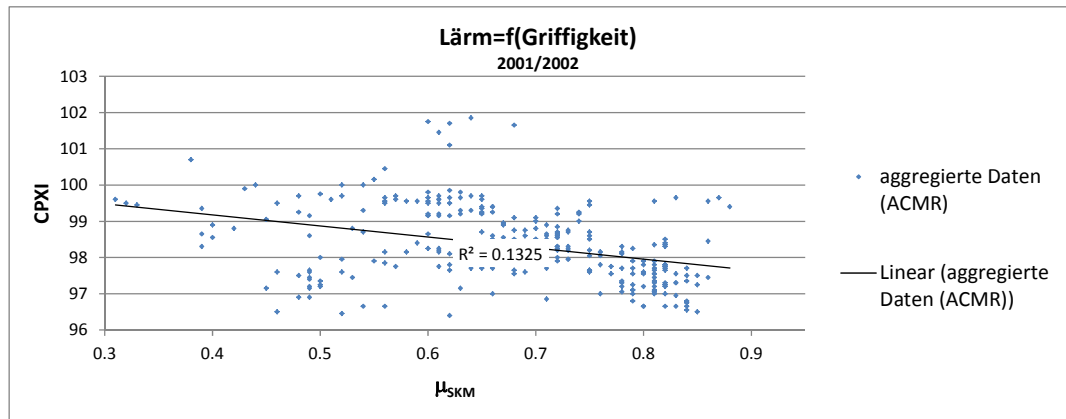


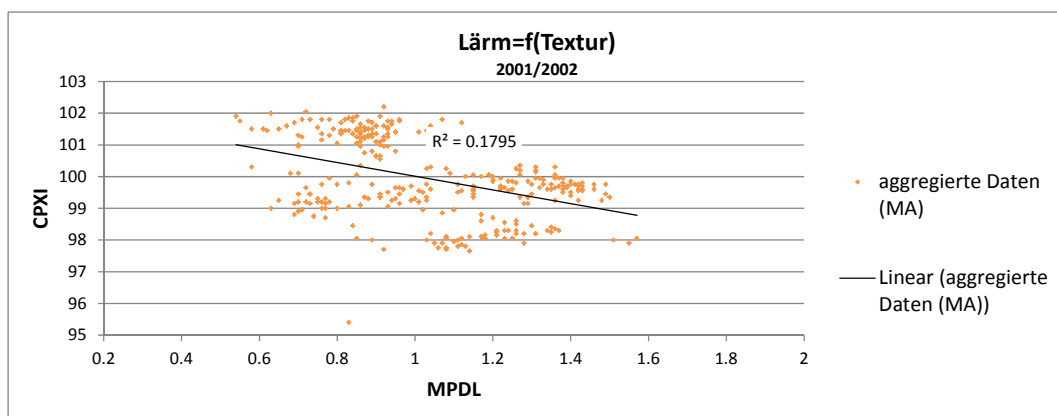
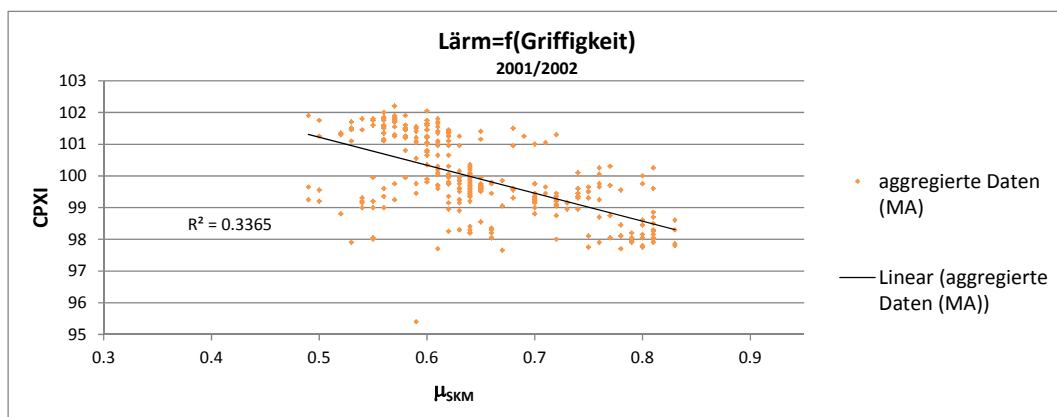
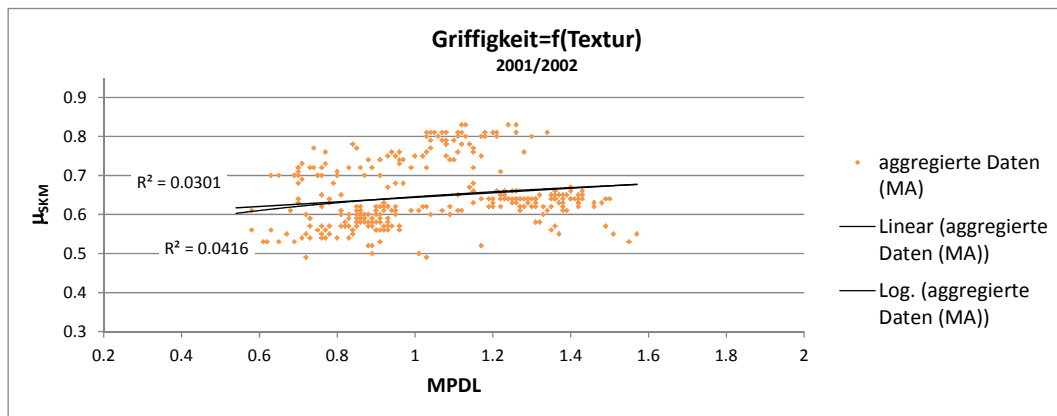
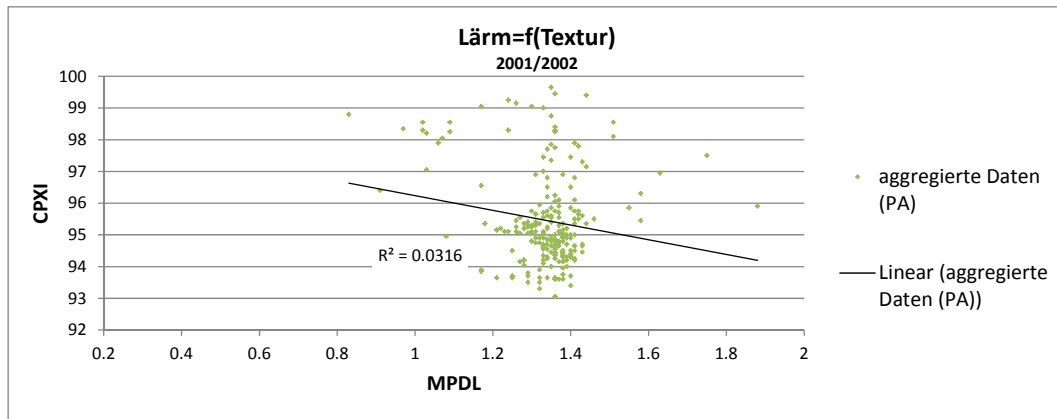


### V.1.8 Abhängigkeiten für Deckschichttypen für Einbaujahre 2001/2002

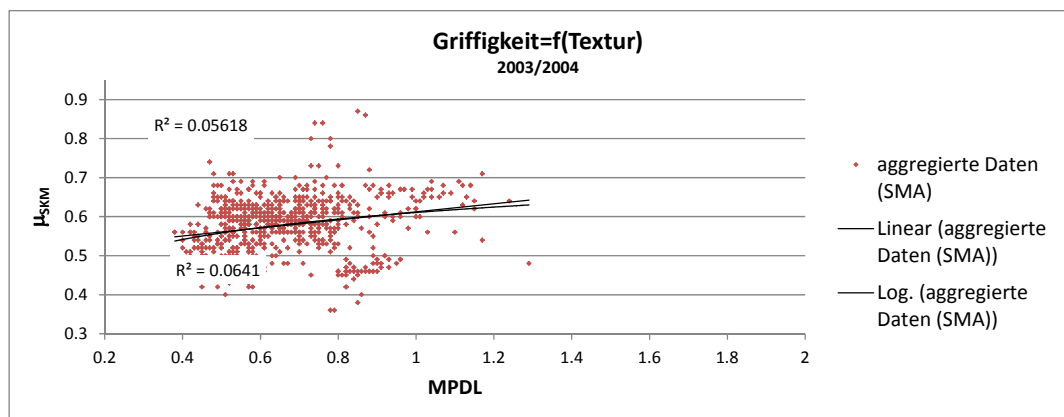
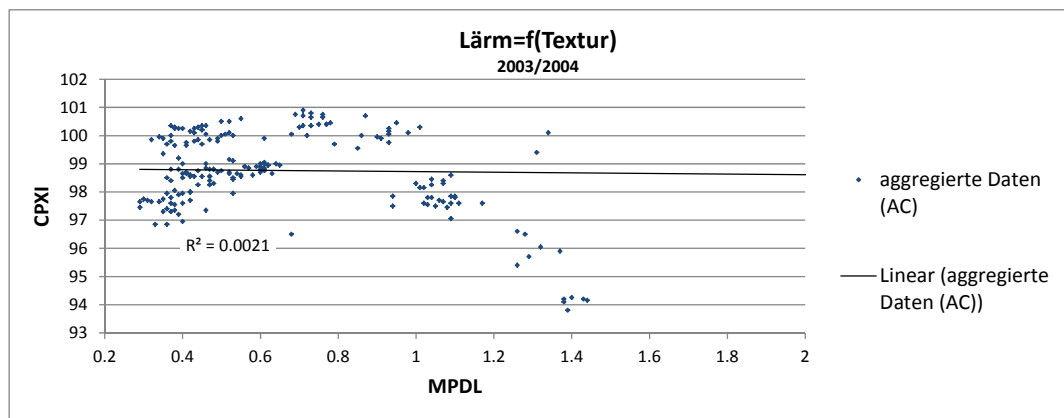
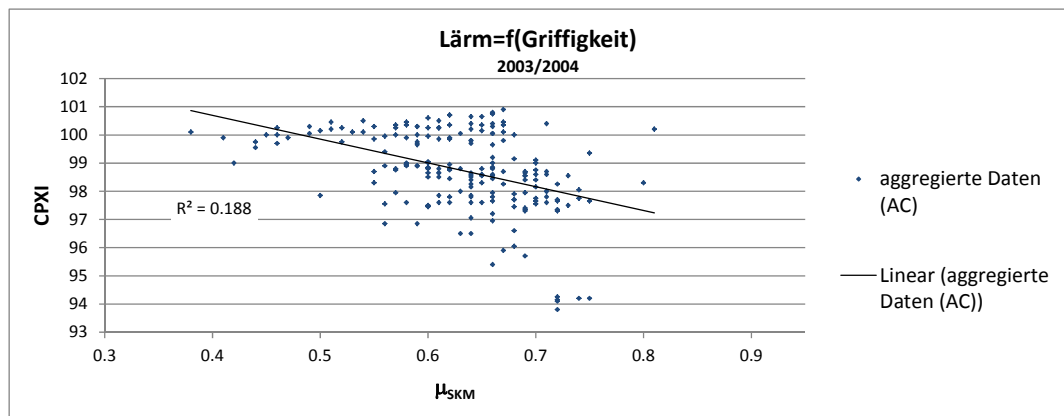
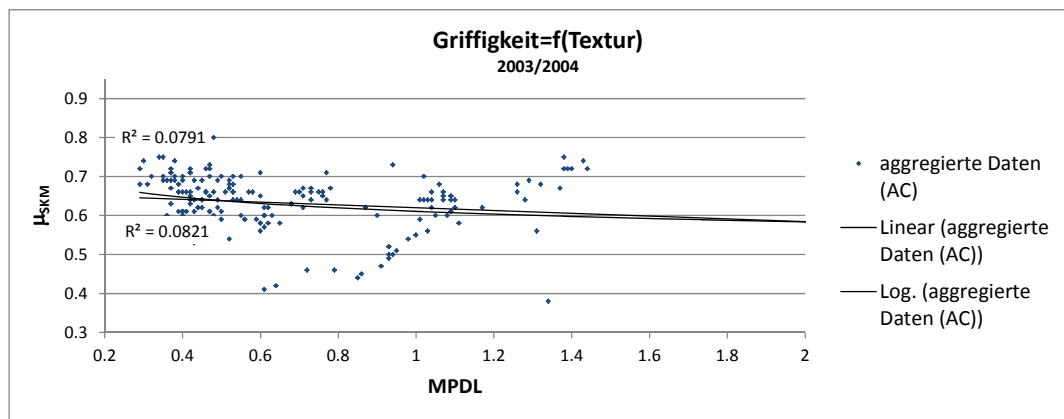


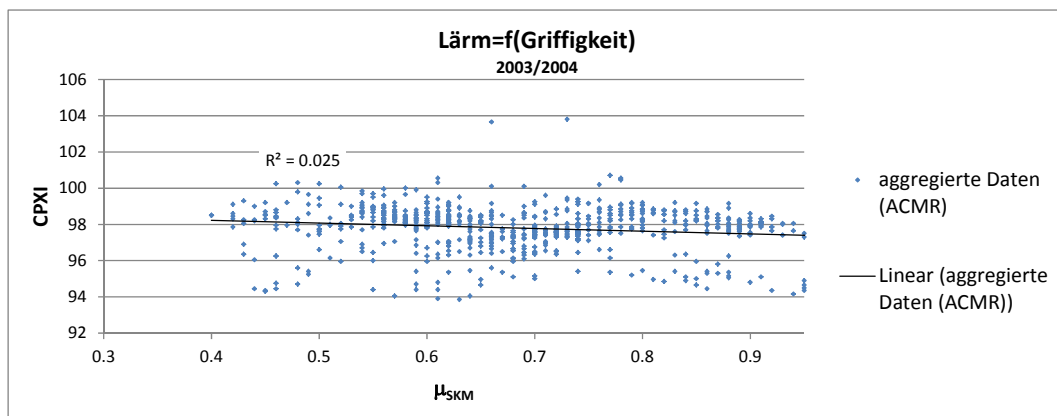
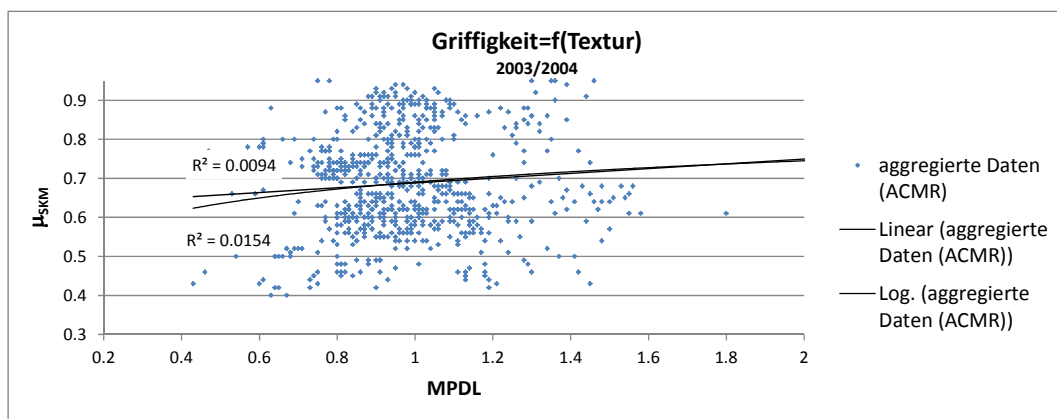
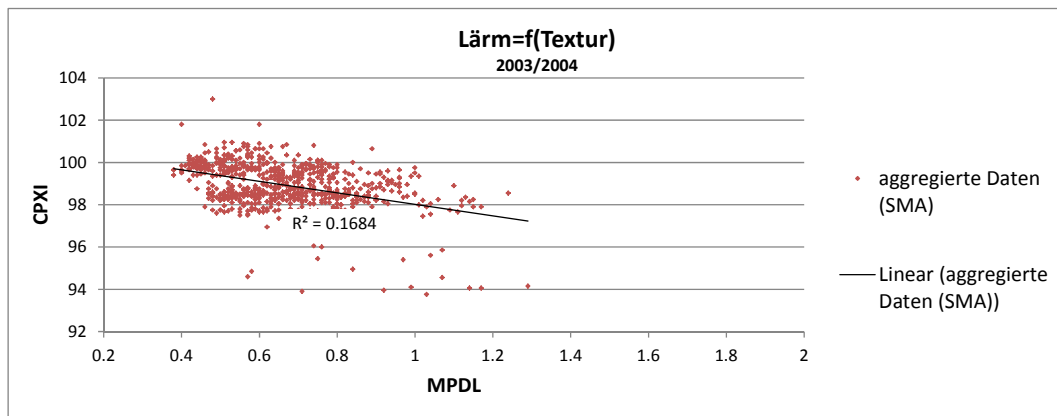
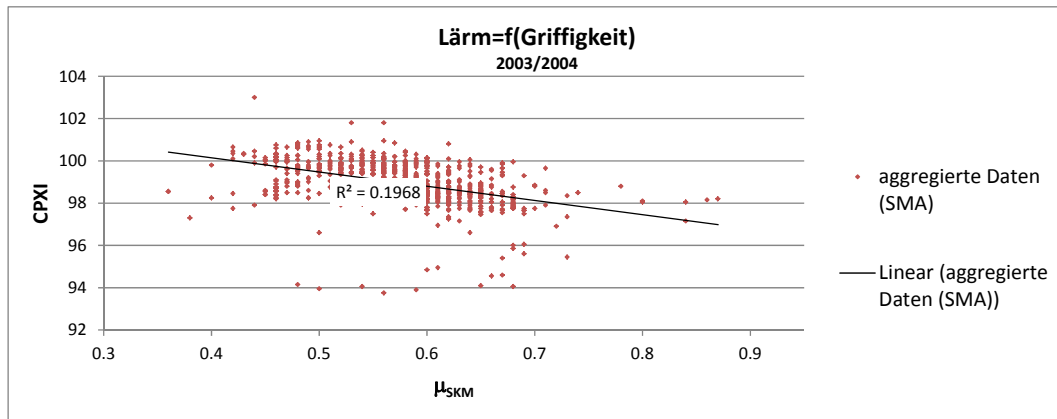


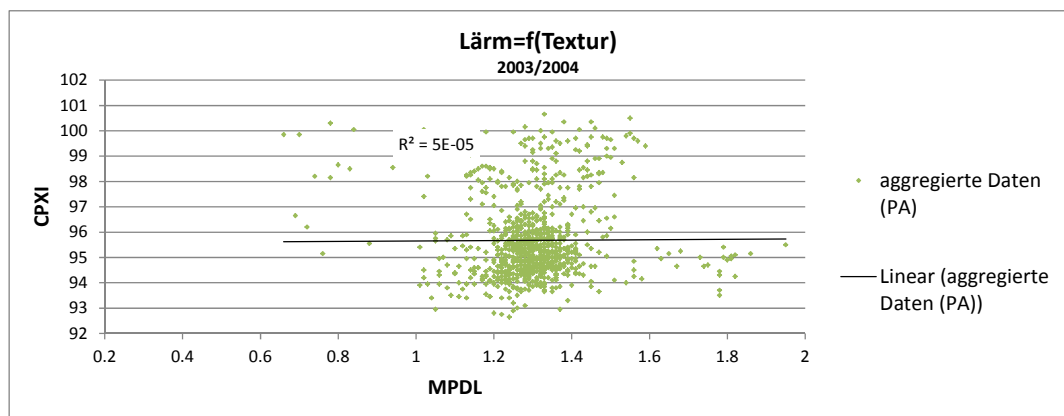
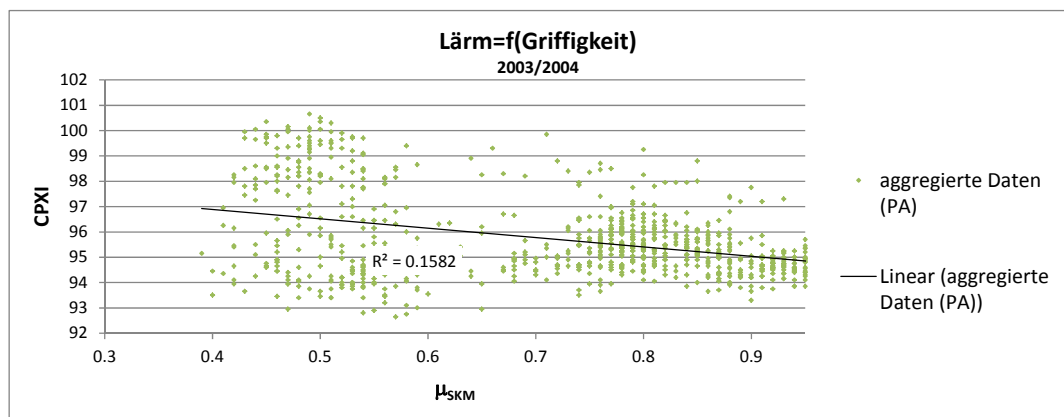
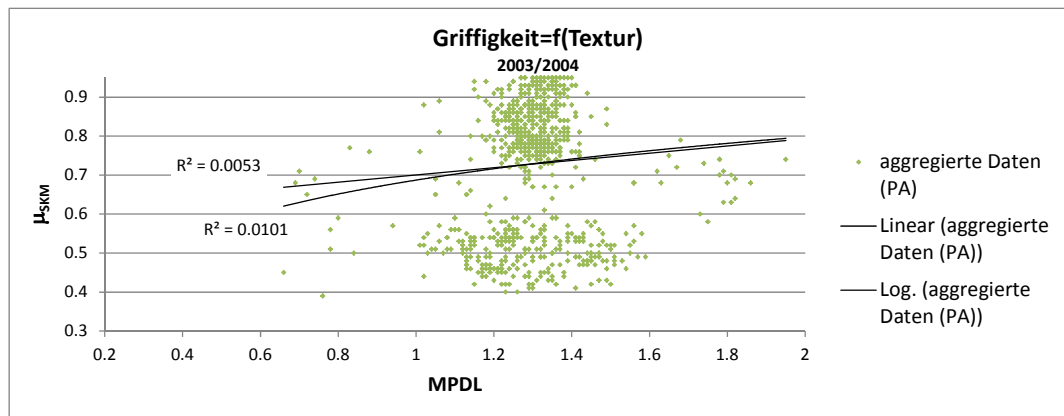
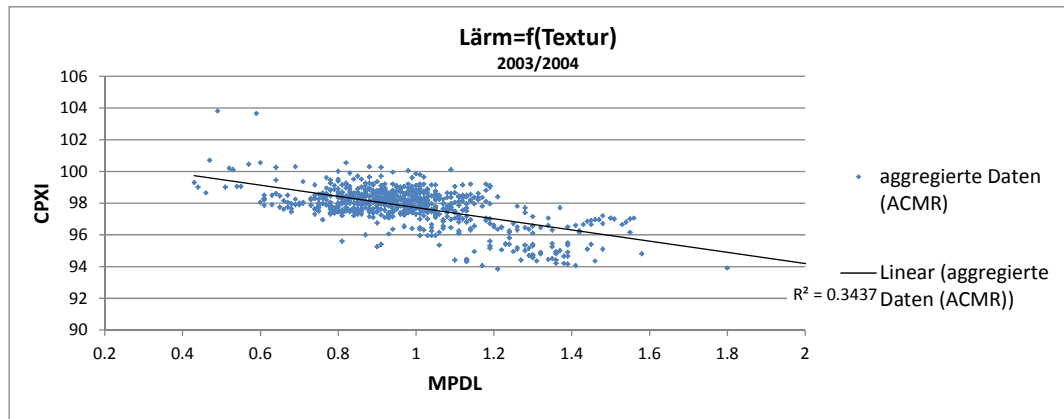


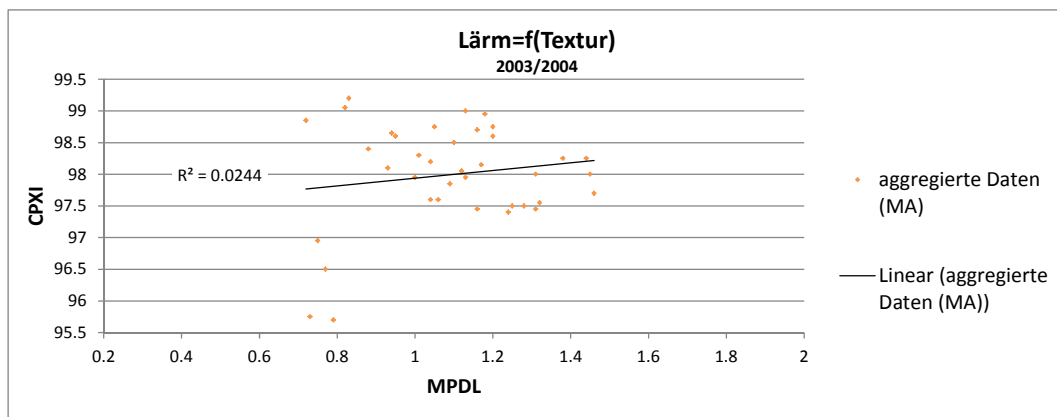
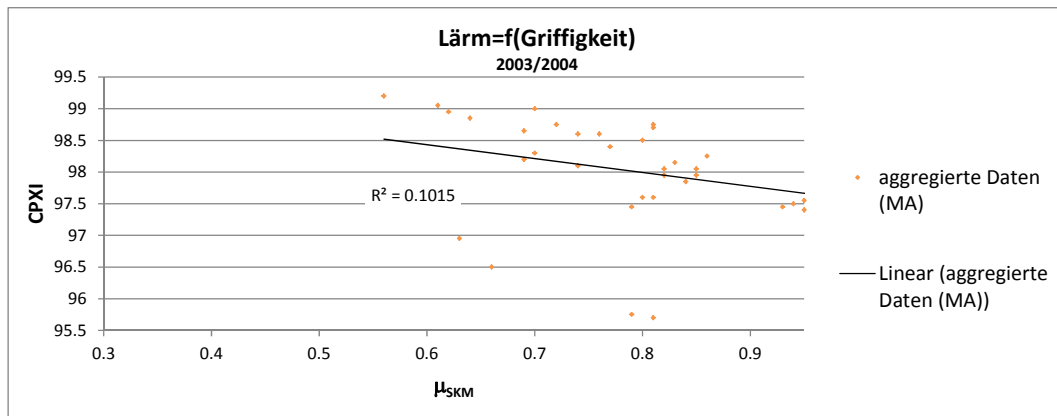
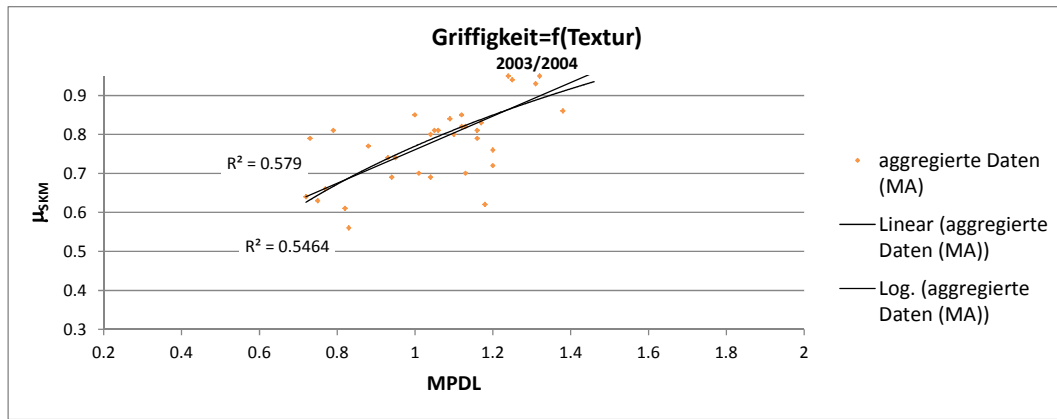


### V.1.9 Abhängigkeiten für Deckschichttypen für Einbaujahre 2003/2004

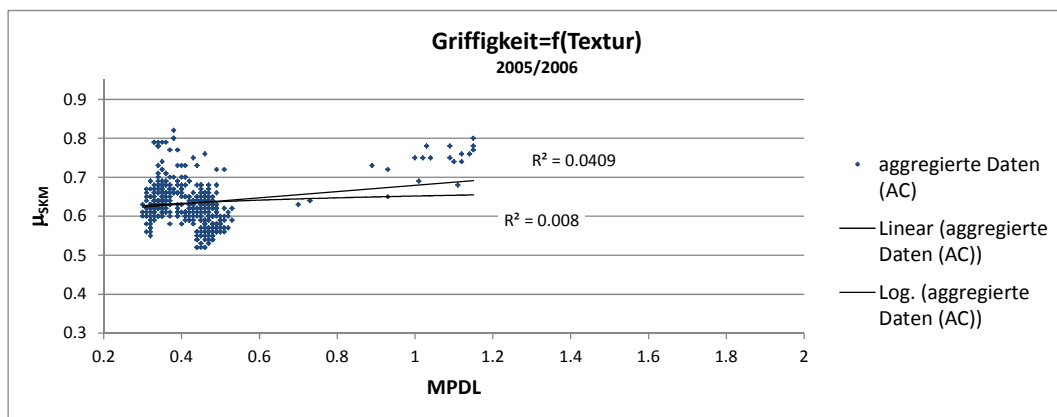


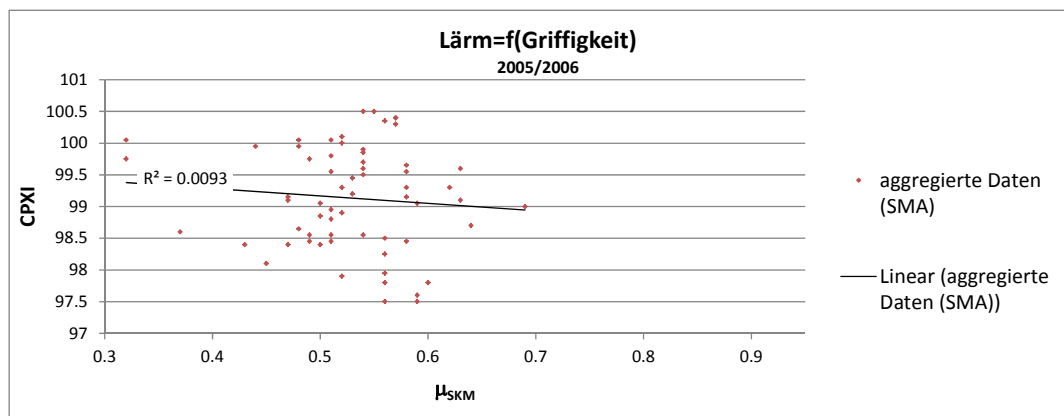
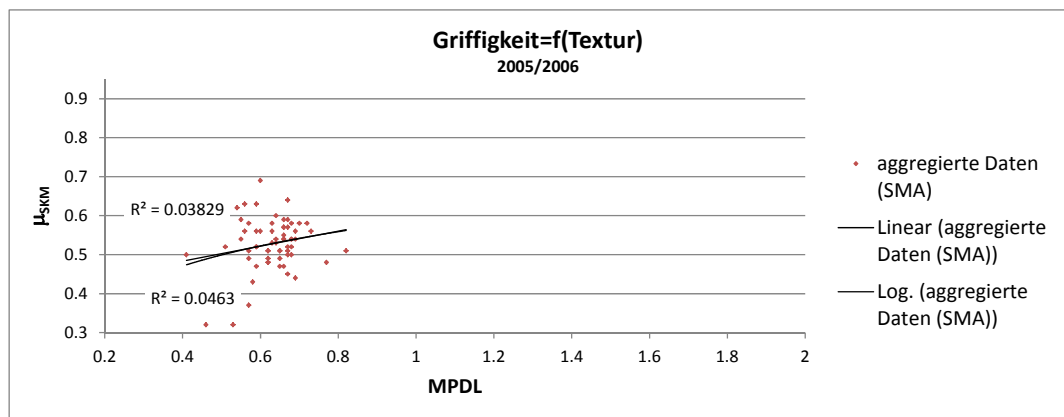
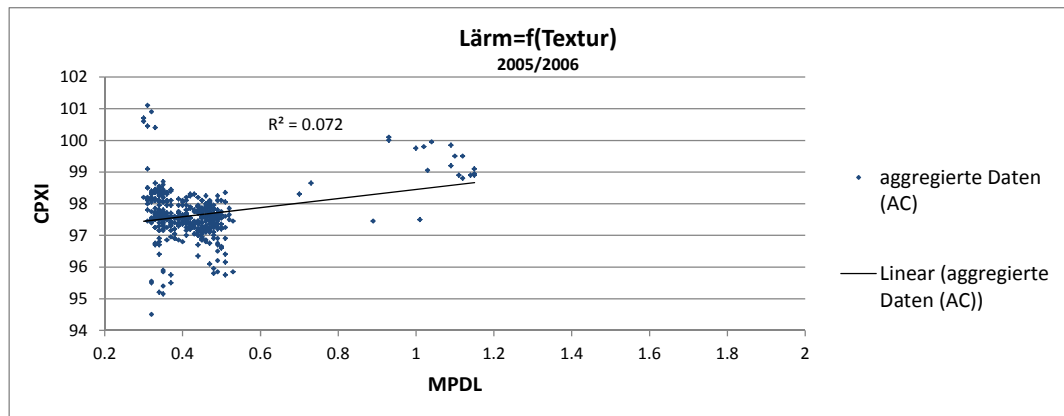
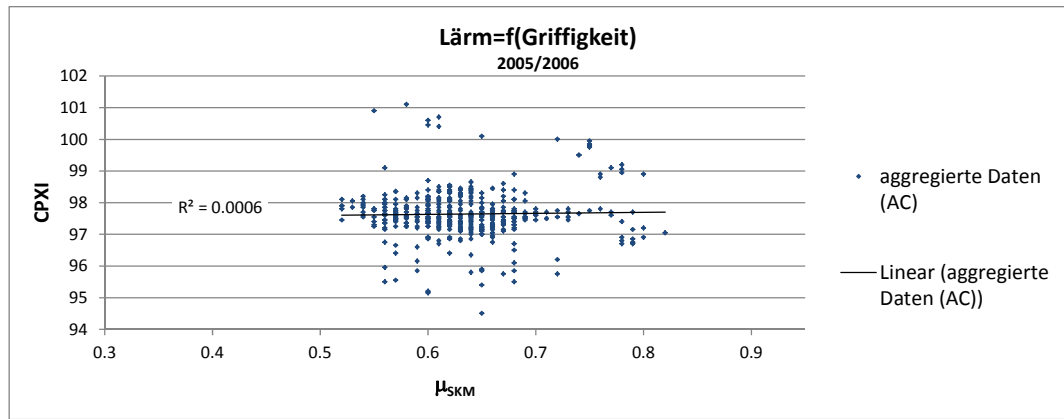


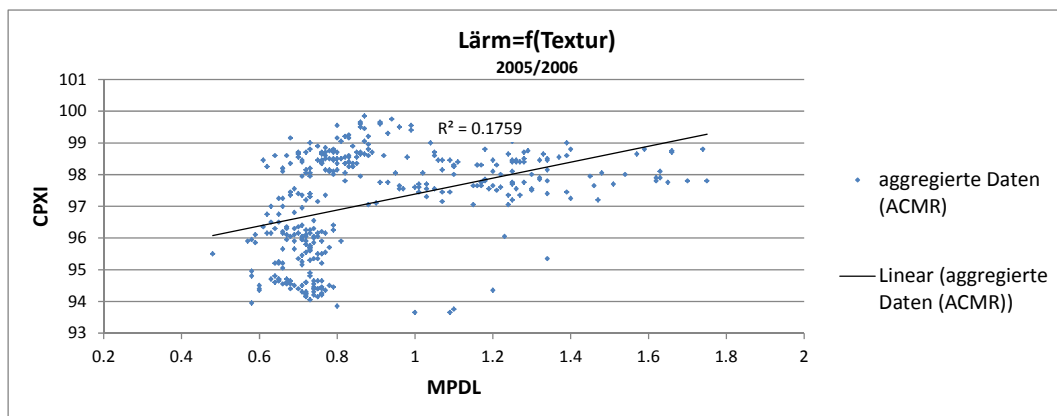
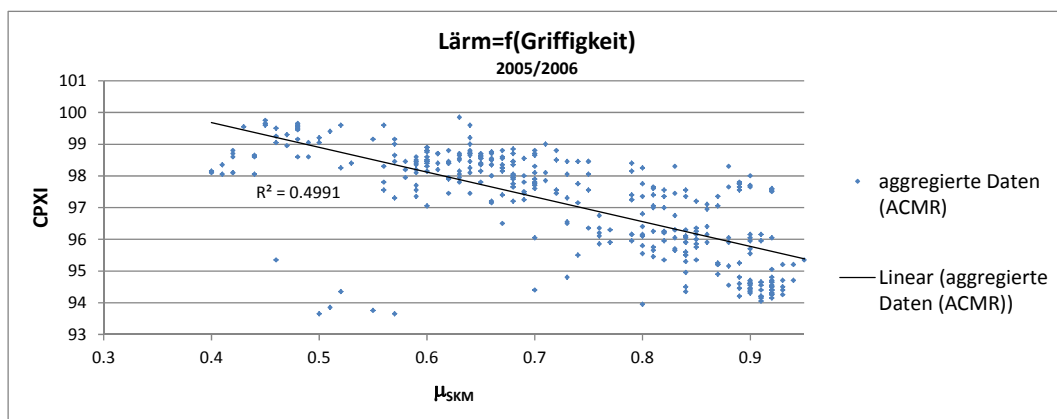
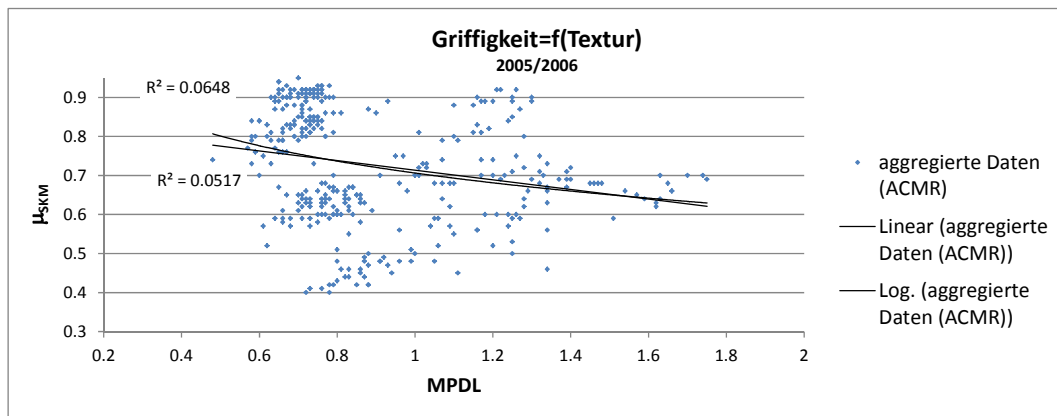
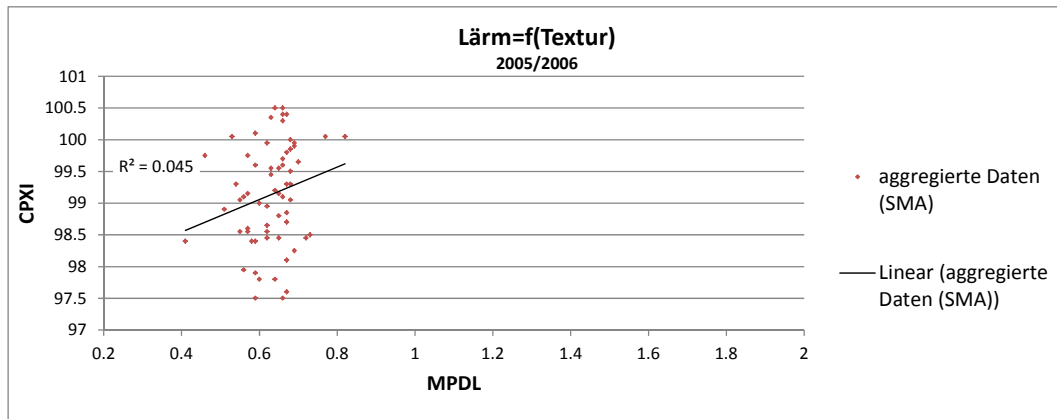


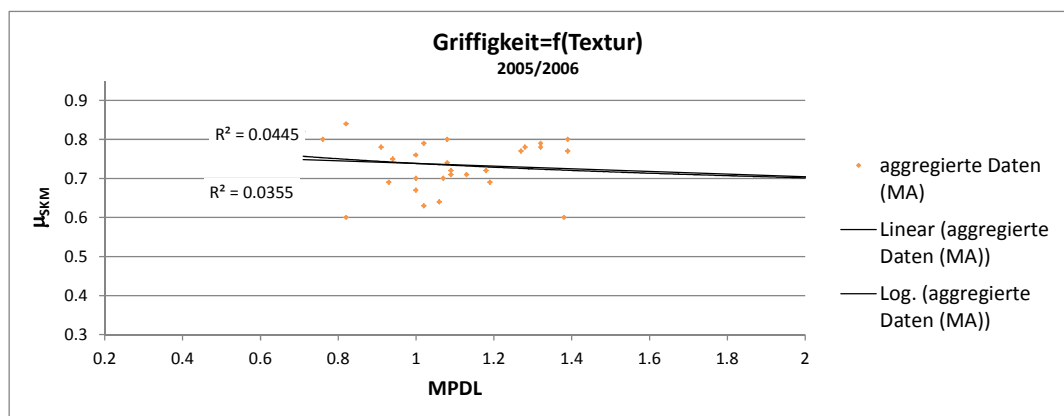
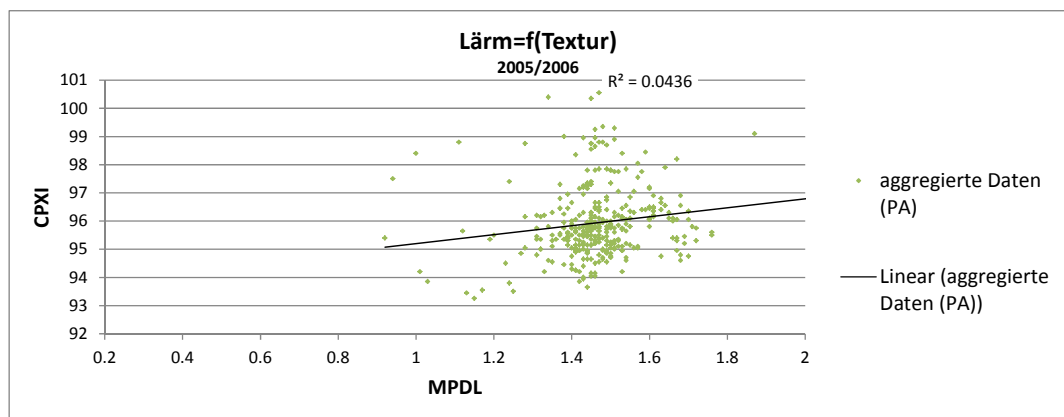
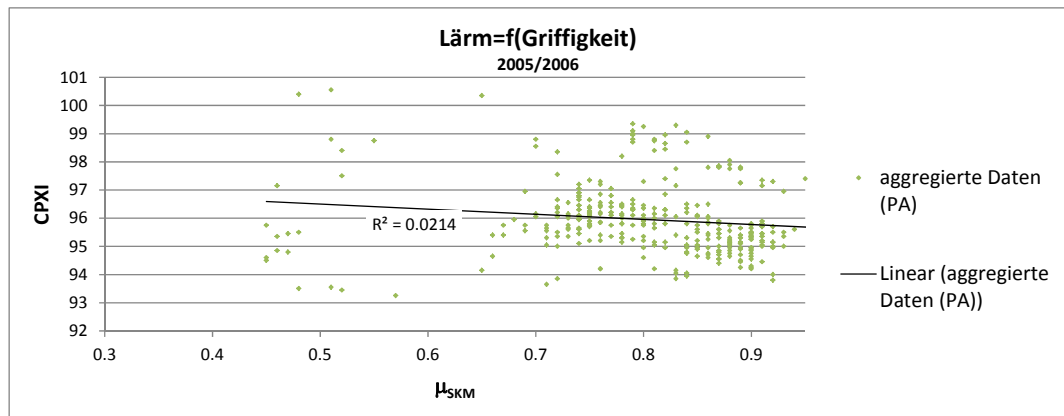
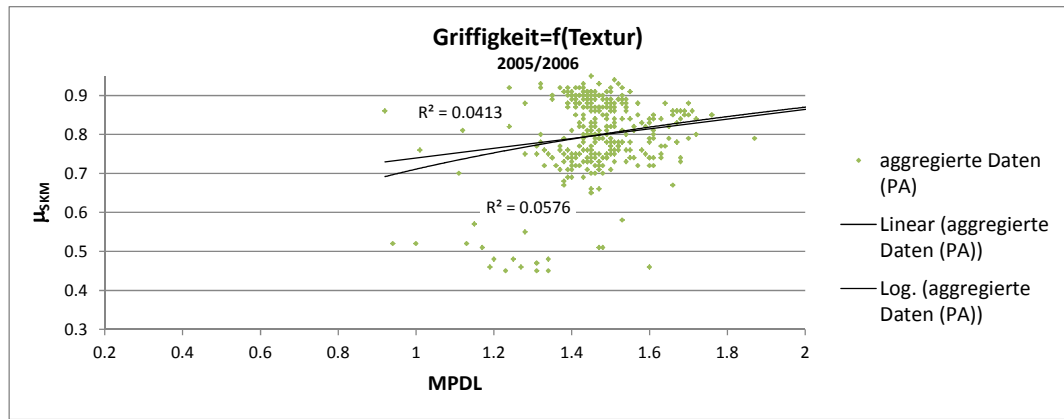


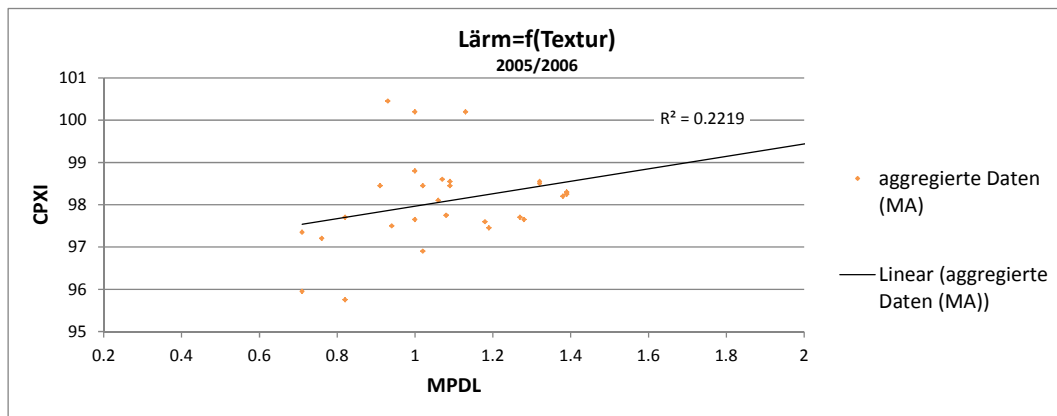
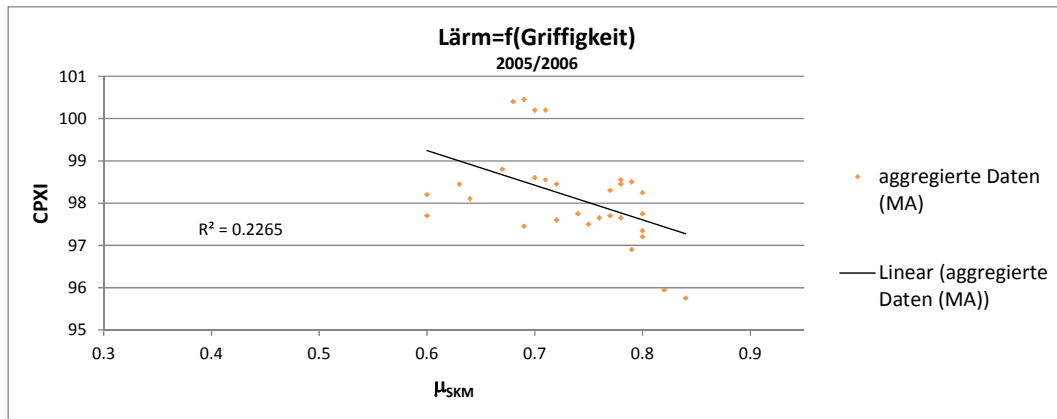
### V.1.10 Abhängigkeiten für Deckschichttypen für Einbaujahre 2005/2006



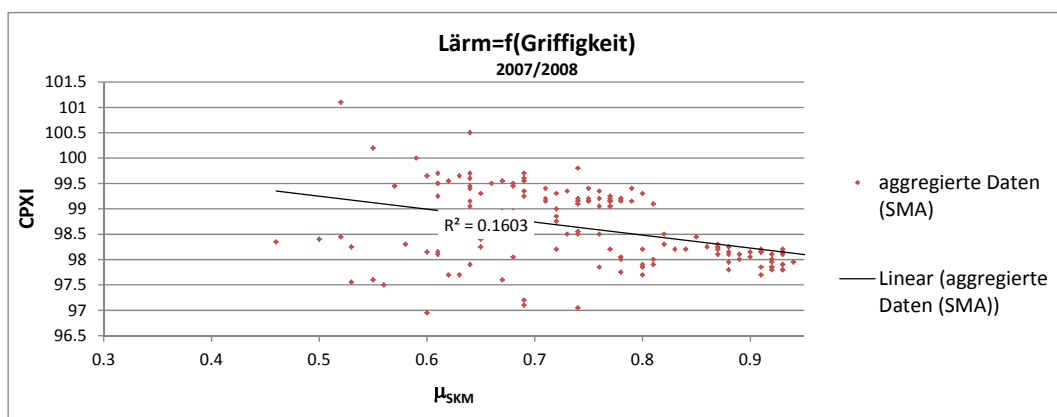
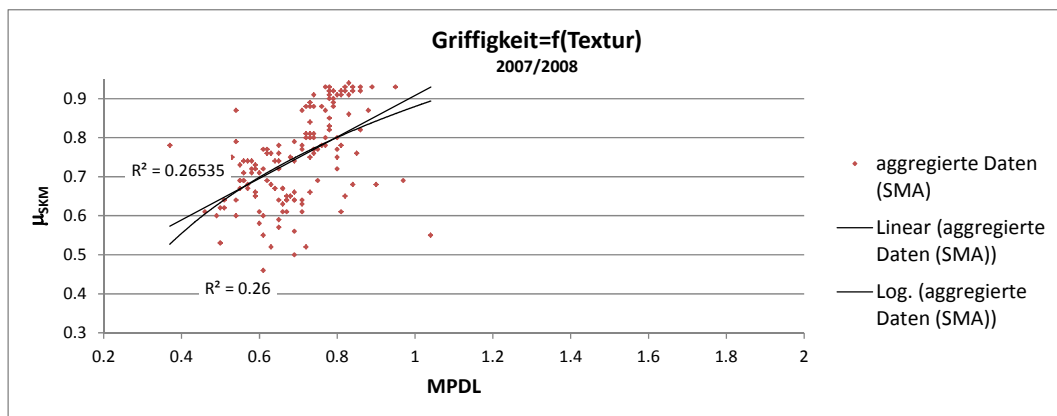


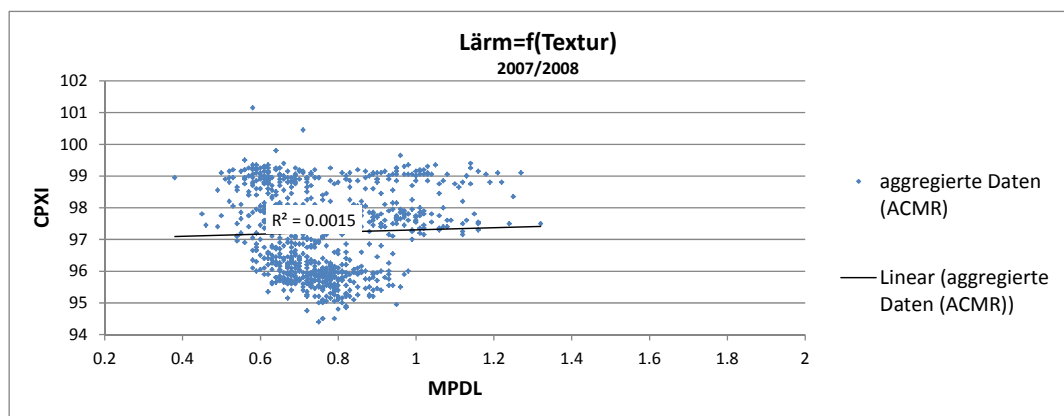
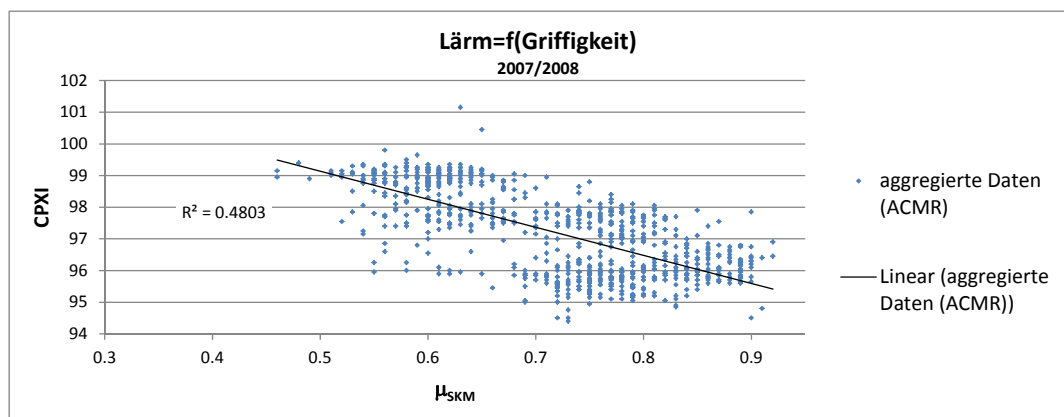
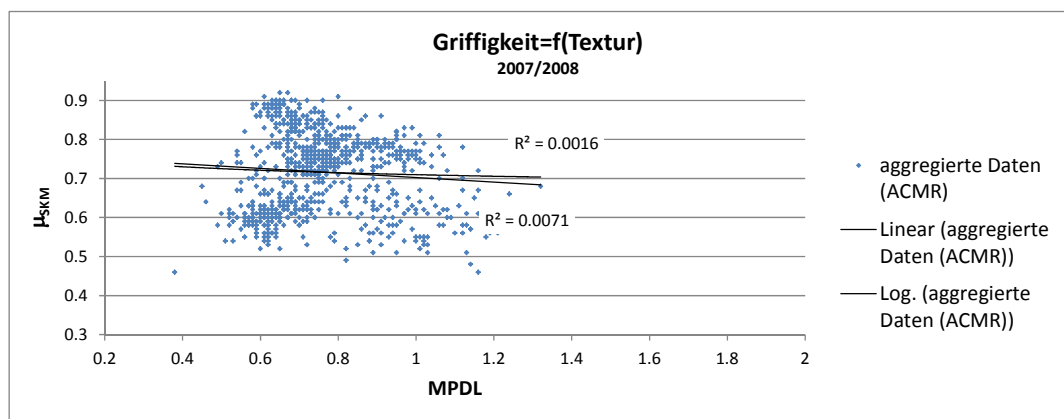
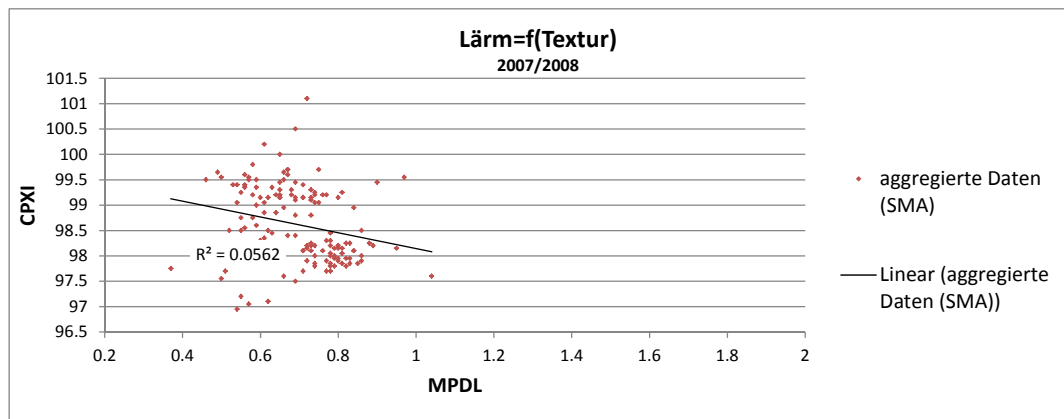


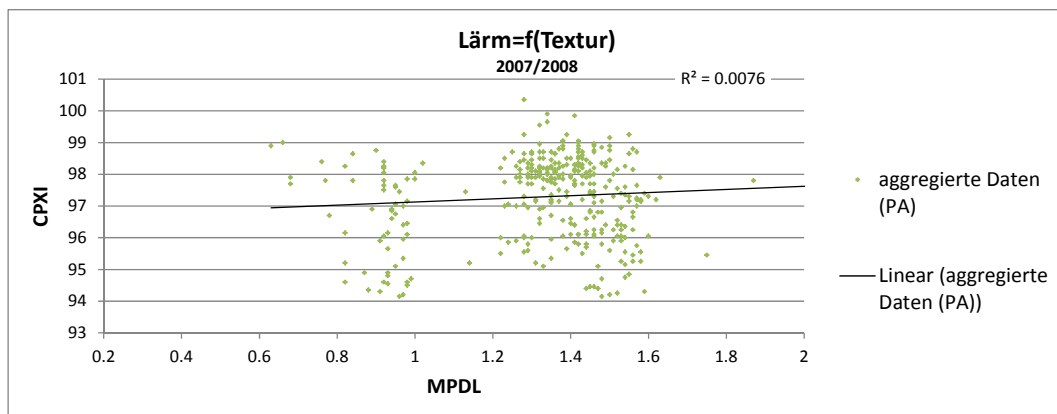
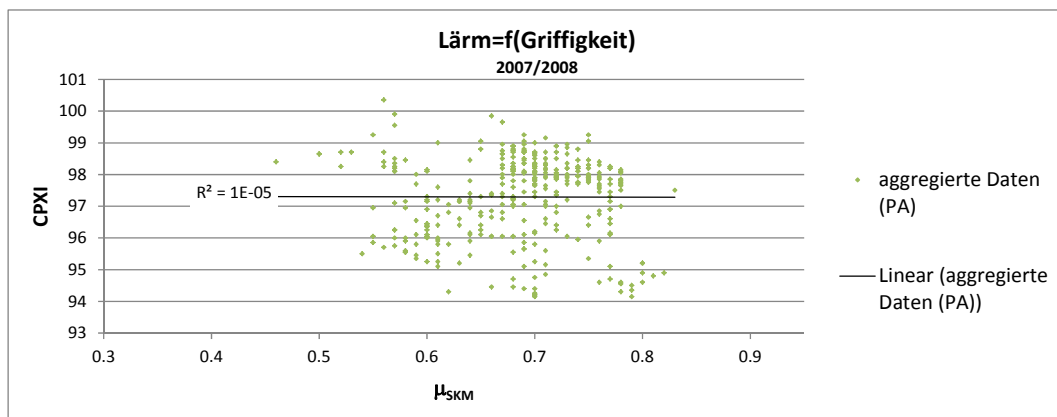
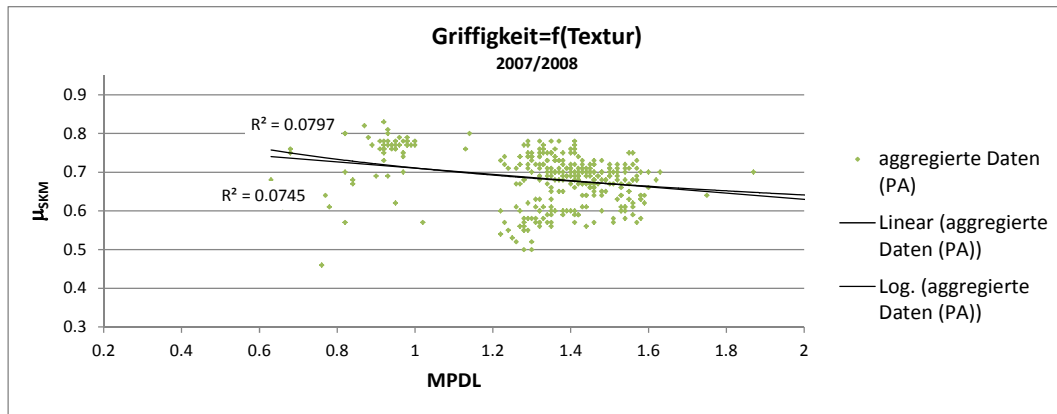




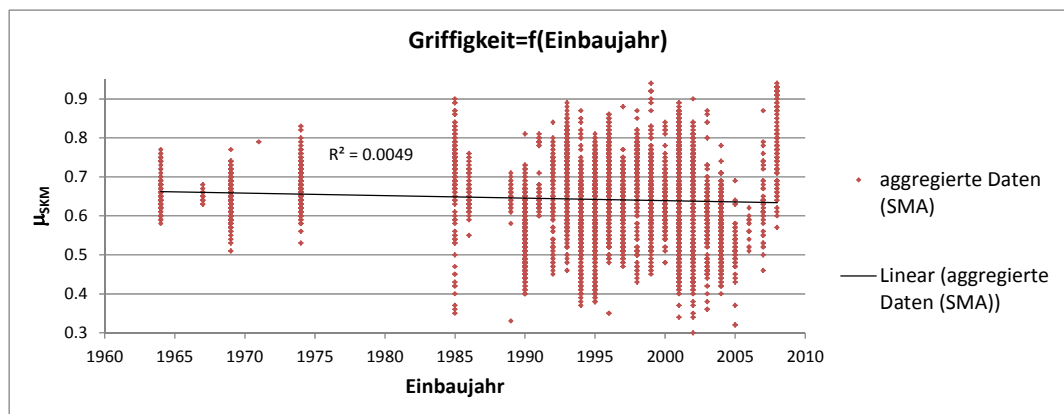
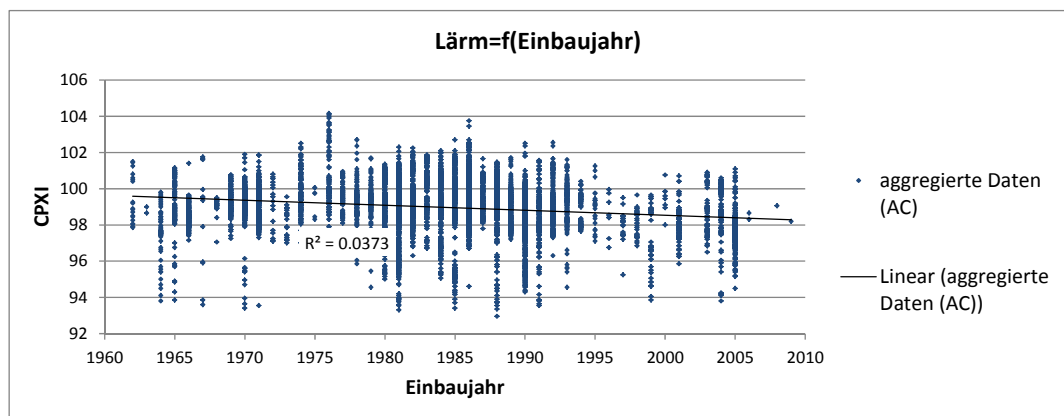
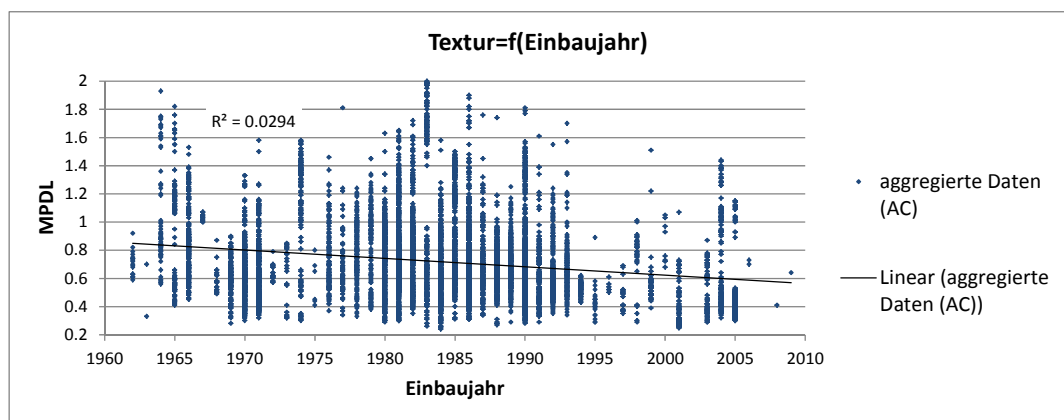
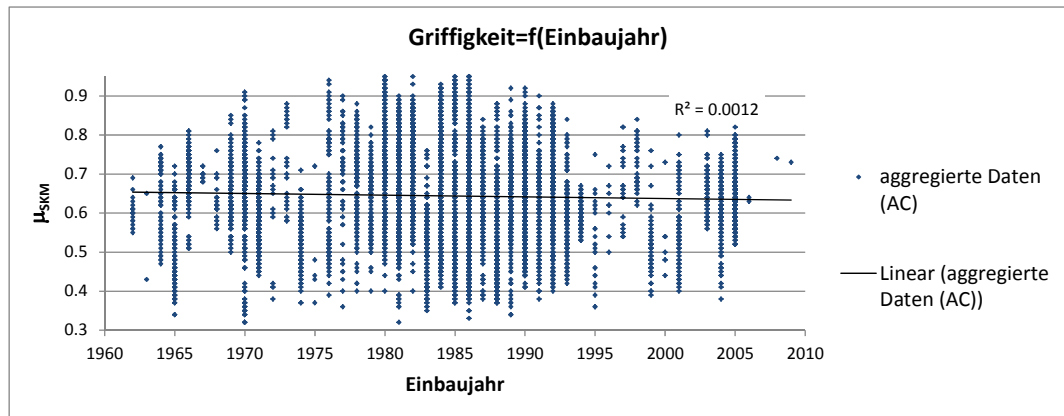
### V.1.11 Abhängigkeiten für Deckschichttypen für Einbaujahre 2007/2008

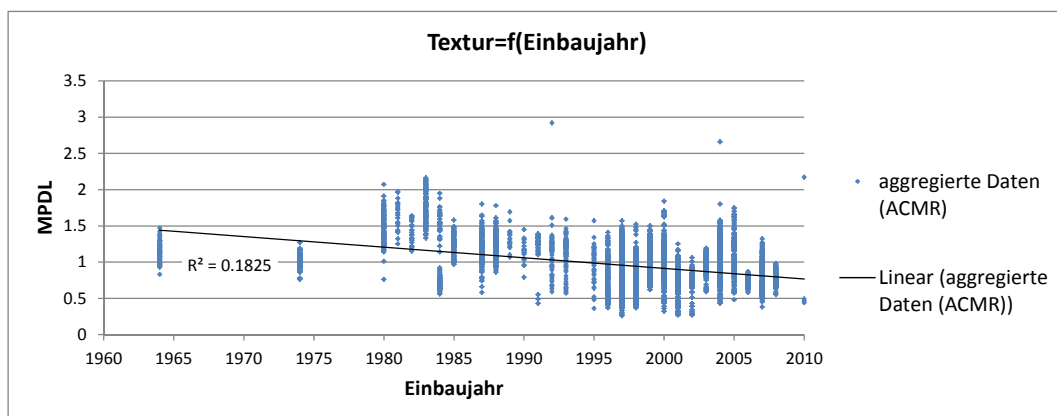
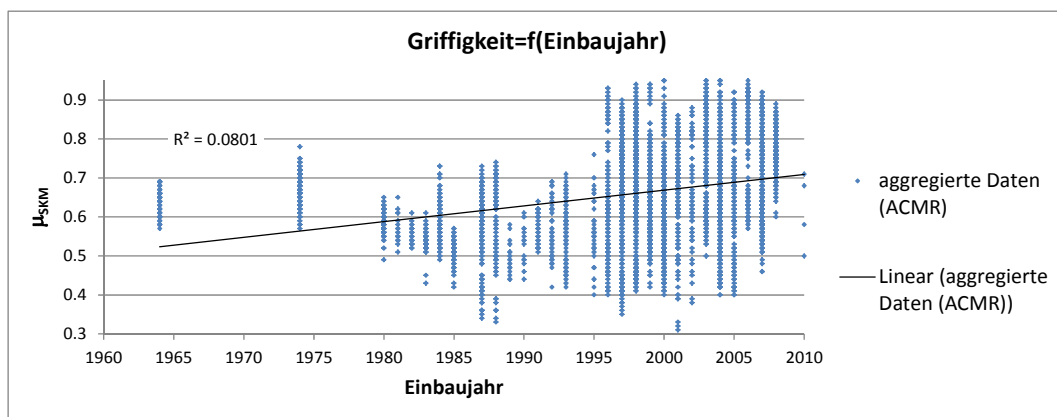
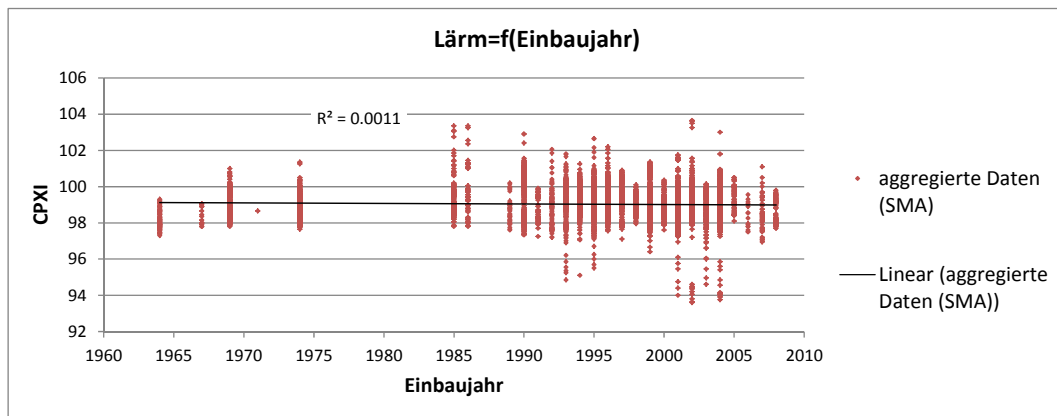
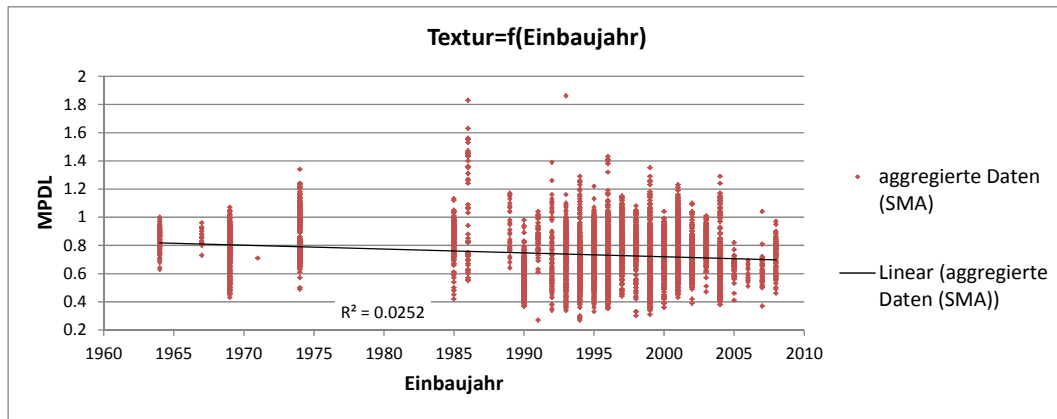


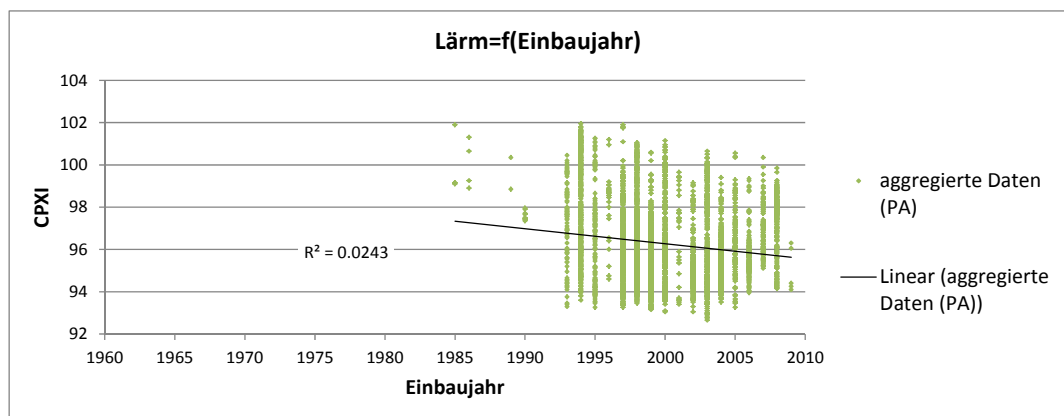
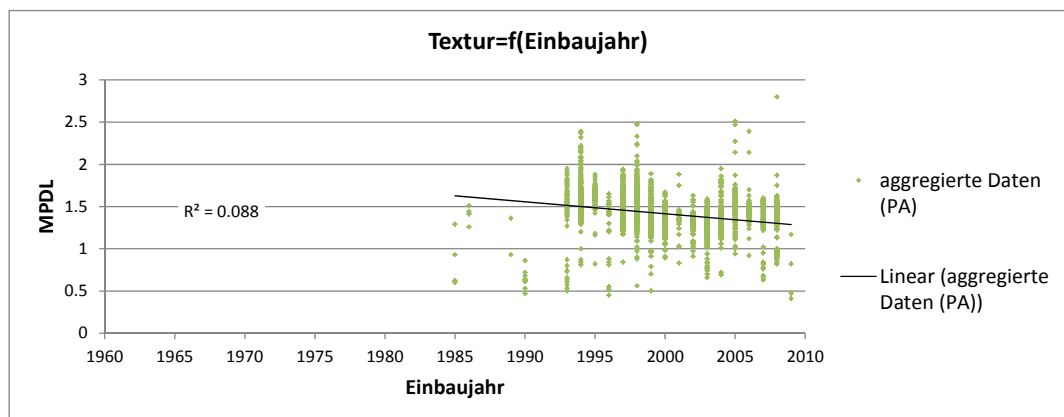
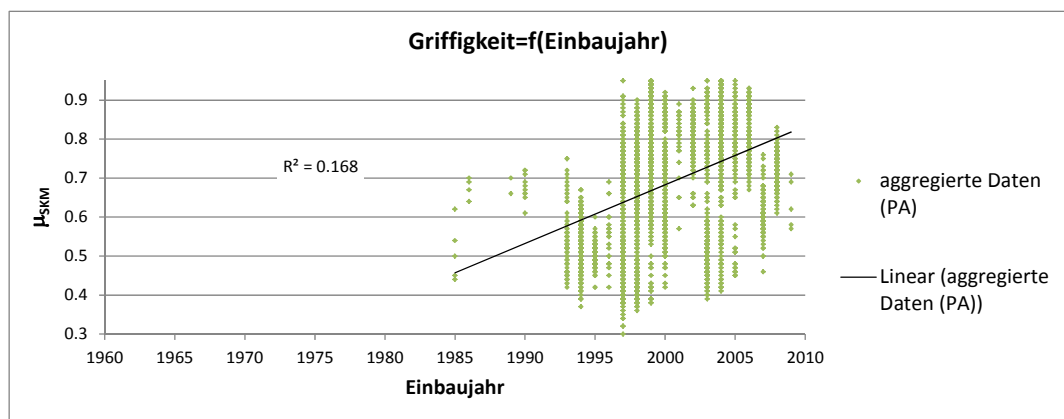
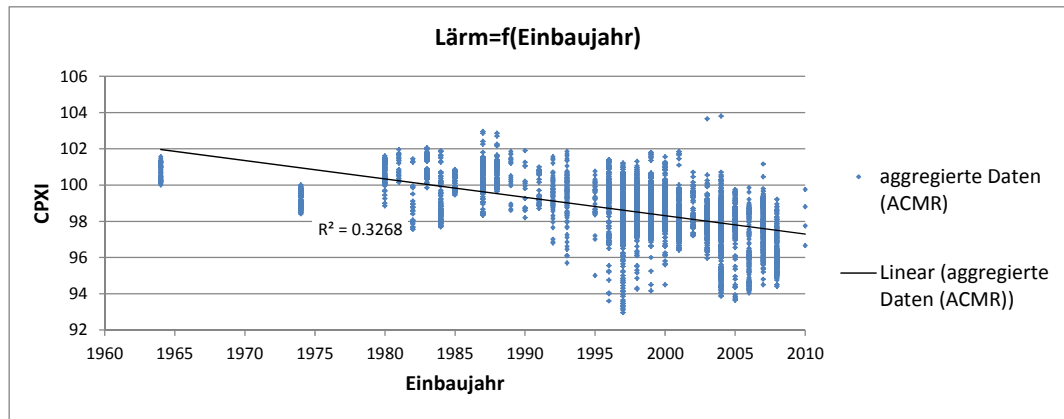


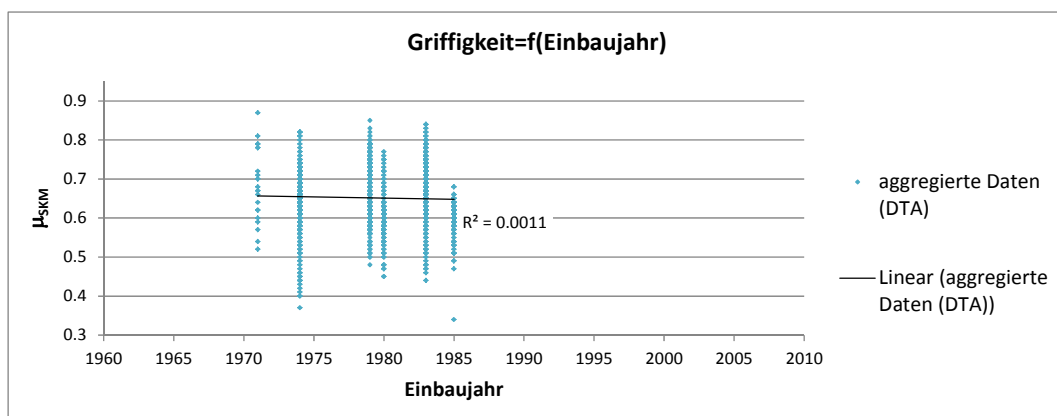
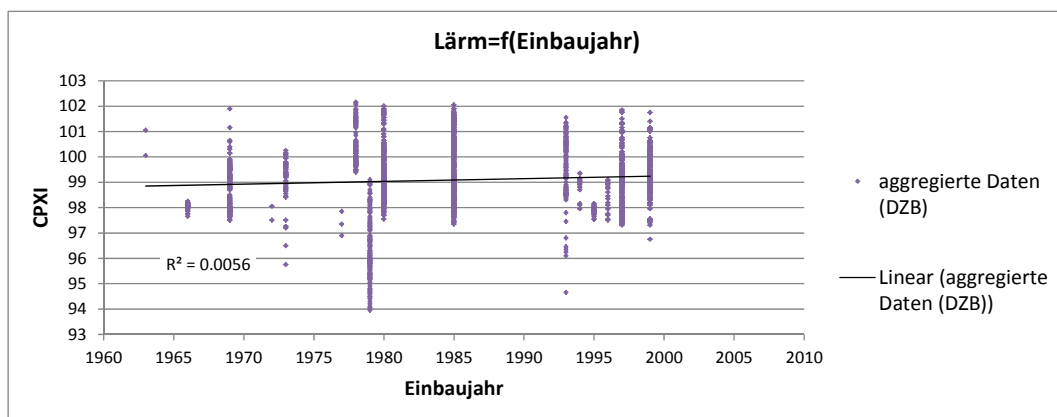
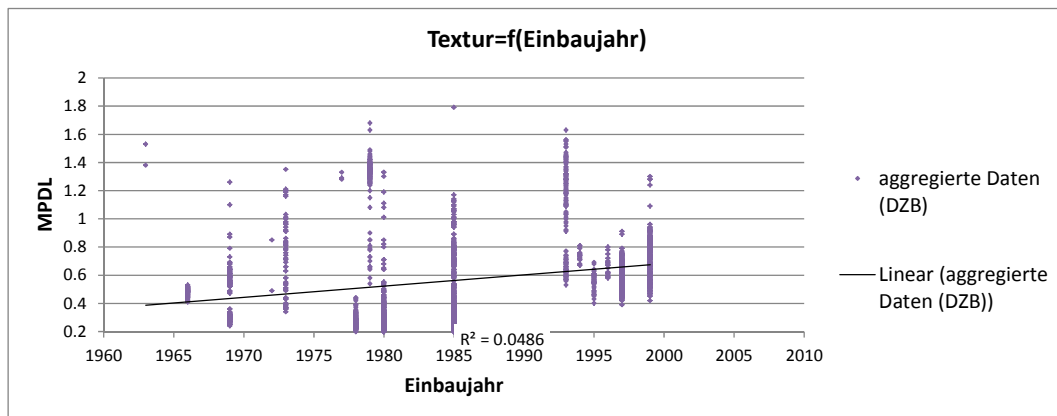
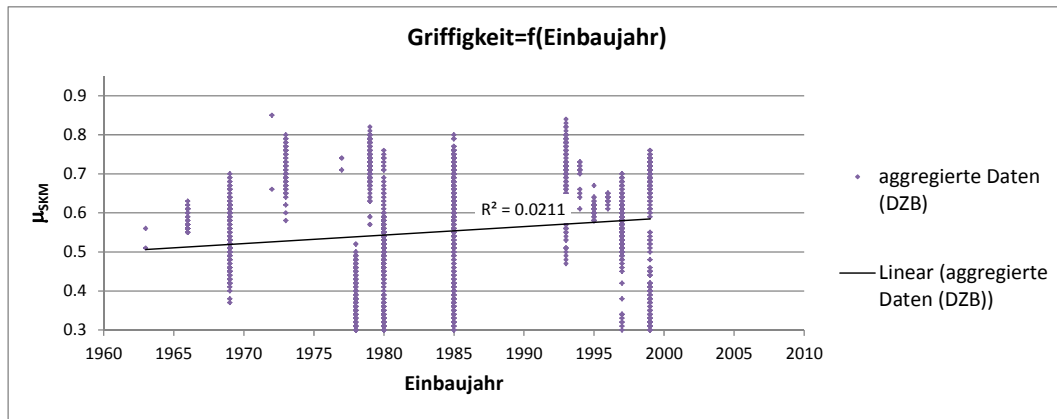


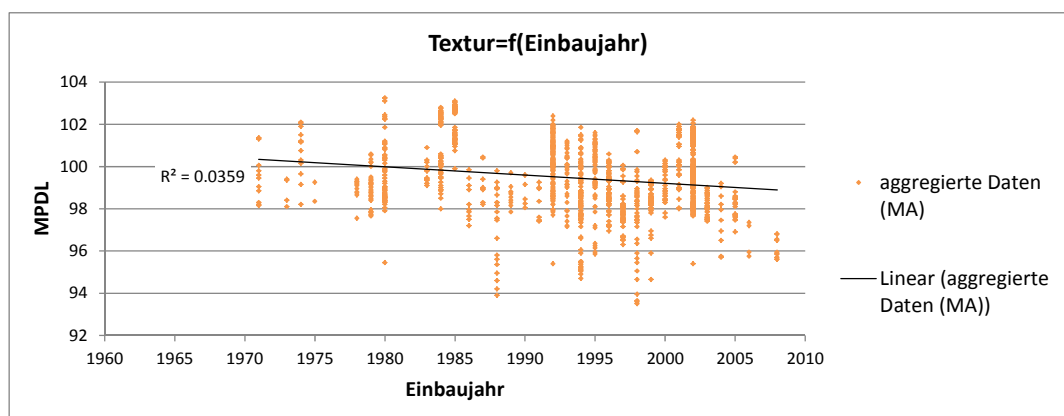
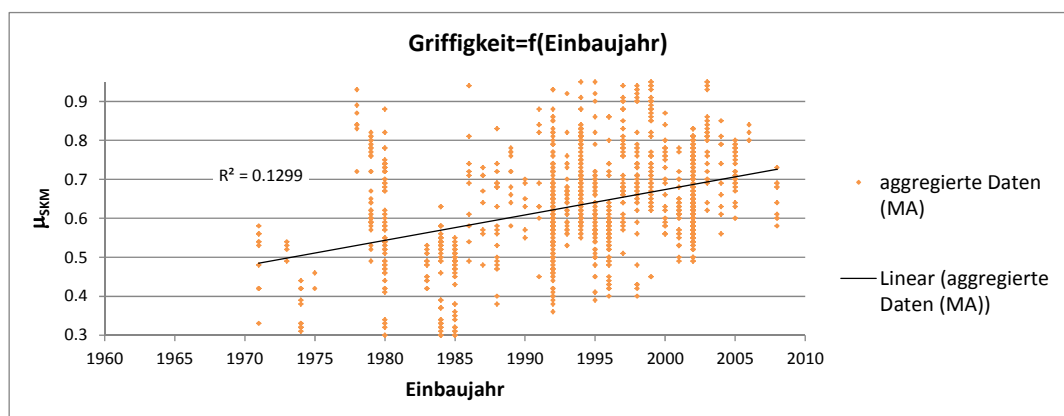
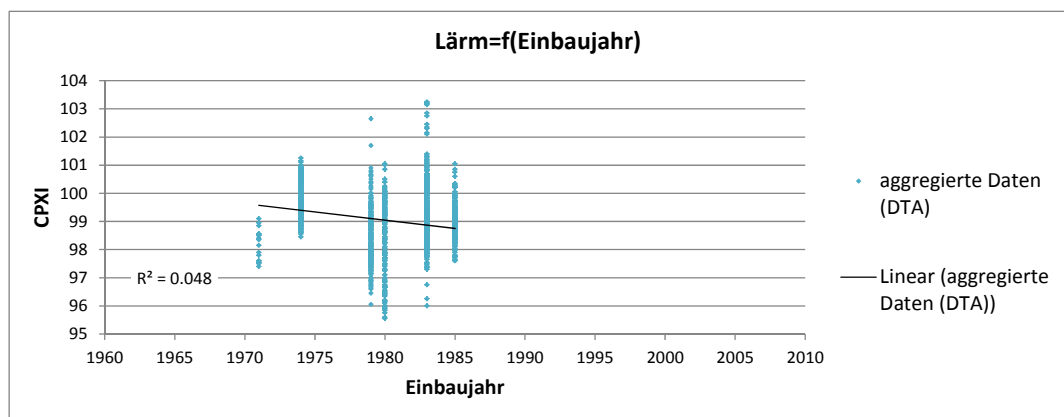
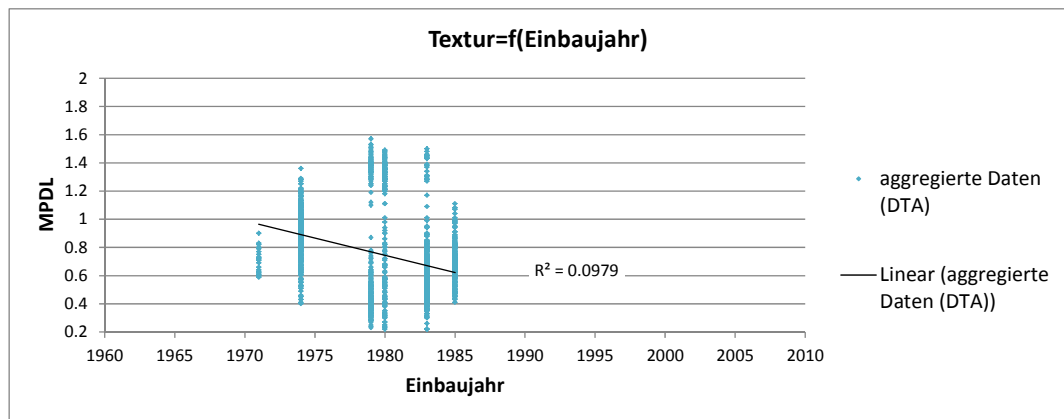
## V.2 Zusammenhänge in Abhängigkeit der Altersstruktur und der Deckschichtgruppen

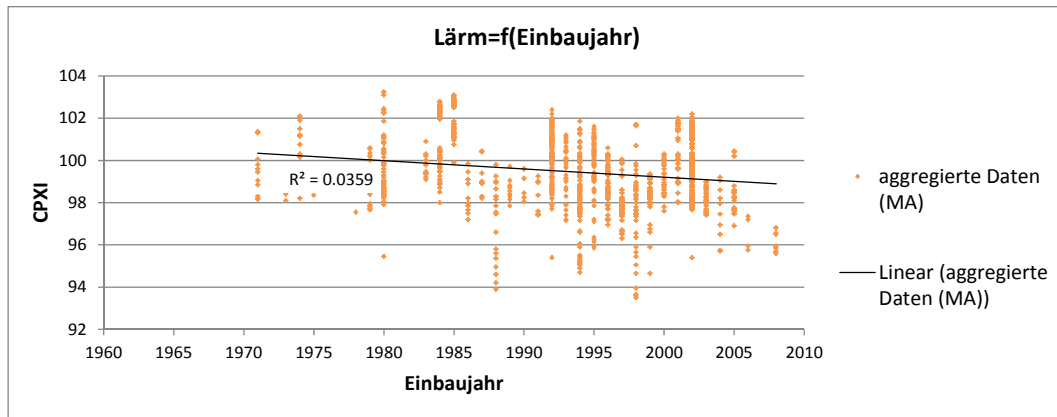












## Literaturverzeichnis

- [1] Lindenmann, H. P., Schiffman, F., Weber, T., Mäder, J.J., Baer, D. und M. Fontana (2003) Zustandserfassung und –bewertung Nationalstrassen Fahrbahnen ZEB- NS (1999-2002), Schlussbericht, IVT und ASTRA, Bern
- [2] Schweizer Norm SN 640 925b (2003) Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF), Zustandserhebung und Indexbewertung, Verband Schweiz. Strassen und Verkehrsfachleute VSS, Zürich
- [3] Schweizer Norm SN 640 520a (1977) Ebenheit, Prüfung der Geometrie, Verband der Schweiz. Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, Zürich
- [4] Schweizer Norm SN 640 521c (2003) Ebenheit, Qualitätsanforderungen, Verband der Schweiz. Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, Zürich
- [5] Schweizer Norm SN 640 510b (1985) Griffigkeit, Messverfahren, Verband der Schweizer. Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, Zürich
- [6] Schweizer Normen SN 640 511b (1984) Griffigkeit, Bewertung und SN 640 511a (2011) Eigenschaften der Fahrbahnoberflächen, Textur, Verband der Schweiz. Strassen- und Verkehrsfachleute, Zürich
- [7] Bitelli, G., Simone, A., Girardi, F. und C. Lantieri (2012) Laser Scanning on road pavements: A new approach for characterising surface texture, Sensors (Basel) 12(7), p. 9110-28, Basel
- [8] Schweizer Norm SN 640 016 (1998) Strassenverkehrsunfälle, Lokalisierung und Rangierung von Unfallschwerpunkten, Verband Schweiz. Strassen- und Verkehrsfachleute, Zürich
- [9] Europäische Norm EN ISO 13473-5 (2009) Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen – Teil 5: Bestimmung der Megatextur, Brüssel
- [10] Europäische Norm CEN/TS 15901-6 (2009) Oberflächeneigenschaften von Strassen und flugplätzen, teil 6: Verfahren zur Bestimmung der Griffigkeit von Fahrbahndecken durch Messung des Seitenreibungsbeiwerts (SFCS): das SCRIM-Griffigkeitsmessgerät, Brüssel
- [11] Merkblatt M BGriff (2003) Merkblatt zur Bewertung der Strassengriffigkeit bei Nässe, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Köln
- [12] Zeller, P., Ed. (2009) Handbuch Fahrzeugakustik – Grundlagen, Berechnung, Versuch, Vieweg + Teubner
- [13] Eggenschwiler, K., Heutschi, K., Wunderli, J.M. und E. Frieder (2008) Lärmbekämpfung, Vorlesungsscript, Eidg. Material und Prüfungsanstalt EMPA, Dübendorf
- [14] Litzka, J. und J. Haberl (2007) Interaktion zwischen Reifen und Fahrbahn – Zielkonflikte und Optimierungsmöglichkeiten aus strassenbaulicher Sicht, Technische Universität Wien, Institut für Strassenbau und Strassenerhaltung, Wien
- [15] Europäische Norm ISO/CD 11819-2 (2000) Acoustic – Measurements of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: The close-proximity method, ISO

- [16] Bundesamt für Strassen ASTRA (2004) Lärmarme Strassenbeläge innerorts, Statusbericht 2003, Bern
- [17] Kennedy, C.K., Young, A. E. und I.C. Butler (1990) Measurement of Skidd Resistance and Surface Texture and the Use of Results in the United Kingdom, Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies, ASTM STP 1031, Seiten 87-102, Philadelphia, USA
- [18] COST 354 (2008) Performance Indicators for Road Pavement, Final Report, FVS und COST, Wien
- [19] Müller, I. (2010) Textureinfluss auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahnoberflächen, Strassenoberflächen, Seiten 892-897
- [20] Beckenbauer, T. (2002) Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch, Bundesministerium für Verkehr, Bau – und Wohnungswesen, Abteilung Strassenbau, Bonn
- [21] Arbeitspapier W2 (2013) Textureinfluss auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Köln
- [22] Haberl, J. und J. Litzka (2005) Bewertung der Nahfeldgeräuschemission österreichischer Fahrbahndeckschichten, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), Strassenforschung, Heft 554, Wien
- [23] Bundesamt für Strassen ASTRA (2010) Pilotdatensatz Zustandsdaten Werte QAFRTSCR (Reibungskoeffizient), MPDL Mittlere Profiltiefe mit Laser-Profilometer, CPX (Akustische Belagsgüte), VA\_PVL\_N1 (aktuelle Sicht Beläge N1), Bern (unveröffentlicht)
- [24] Bundesamt für Strassen ASTRA (2011) Ausgangsdatensatz der ZEBNS09, Daten Textur MPDL), Griffigkeit (ySKM) und Lärmemission (CPXI) und Deckschichten, Bern (unveröffentlicht)
- [25] Nipp, K. und D. Stoffer (2002) Lineare Algebra, Eine Einführung für Ingenieure unter besonderer Berücksichtigung numerischer Aspekte, ETH Zürich, vdf Hochschulverlag, Zürich
- [26] Brosius, F. (2007) SPSS for Dummies
- [27] Faber, M. H. (2007) Statistics and Probability Theory, Lecture Notes, Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK), Departement BAUG, ETH Zürich, Zürich
- [28] Sachs, L. (1988) Statistische Methoden: Planung und Auswertung, 6. Auflage, Springer-Verlag, Berlin
- [29] Cohen, J., Cohen, P. West, S.G. und L.S.Aiken (2003) Applied multiple Regression/Correlation Analysis for the Behaviour Science, Third edition
- [30] Podstransky, P. (2011) Zusammenhang zwischen Textur und Griffigkeit von Fahrbahnen und Einflüsse auf die Lärmemission, Masterarbeit Studiengang Raumentwicklung und Infrastruktur-systeme, Departement BAUG, ETH Zürich, Zürich
- [31] Bär, H., Lindenmann, H. P und E. Kälin (2014) Grundlagen zur Revision der Normen über die visuelle Erhebung des Oberflächenzustandes, VSS2010/701, Schlussbericht 1466, UVEK, Bern

# Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 09.10.2014

#### Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS2009/703  
Projekttitel: Zusammenhang Textur und Griffigkeit von Fahrbahnen und Einflüsse auf die Lärmemission  
Enddatum: 19.9.2014

#### Texte

##### Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Zur situativen Beurteilung der Qualität von Fahrbahnoberflächeneigenschaften und der damit verbundenen Belagswahl bei Erhaltungsmaßnahmen sind Kenntnisse der Zusammenhänge zwischen der Textur, der Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche und deren Auswirkungen auf die Lärmemissionen grundlegende Voraussetzung.

Von zentralen Interesse im Rahmen dieser Forschungsvorhabens war einerseits der Zusammenhang Textur und Griffigkeit zwecks Ersatz der Griffigkeitsmessung durch Texturmessung und andererseits der Zusammenhang Textur und Lärmemission (Rollgeräusch am Belag) zur Beurteilung der Belagswahl je nach örtlichen Bedürfnissen des Lärmschutzes und unter Beachtung unterschiedlicher Lebensdauern bestimmter Beläge.

Als Datengrundlagen für die Durchführung der Forschungsarbeit dienten die Erhebungen und Auswertungen der im Jahre 2009 durch das Bundesamt für Strassen (ASTRA) durchgeführten, dritten Zustandserhebung und -bewertung der Schweizerischen Nationalstrassen. Bei dieser dritten Erhebung wurden neben den Oberflächenschäden, der Längs- und Querebenheit, der Griffigkeit zusätzlich die Belagstextur und die Lärmemissionen netzweit für alle Nationalstrassen inkl. Rampen und Anschlüsse erfasst und auf 100m-Fahrstreifenintervalle ausgewertet. Die örtlich vorliegenden Belagsarten der Fahrbahnoberflächen stammen aus einem ASTRA-internen Belagskataster, worin neben der Deckschichtart auch das Einbaujahr der zurzeit vorhandenen Schicht erkennbar ist.

Aufgrund der grossen Datensätze und der vielfältigen Einflüsse an den verschiedensten Orten der Nationalstrassen wie Alter der Deckschichten, Verschiedenartigkeit der Deckschichten, unterschiedlichste Nutzungen der Strassenabschnitte, unterschiedlichste Witterungseinflüsse in den verschiedenen Regionen der Schweiz sowie unterschiedliche Erhebungsbedingungen für Textur, Griffigkeit und Lärmemissionen musste erwartet werden, dass sich die einzelnen, zu untersuchenden Zusammenhänge nicht sehr deutlich ausgeprägt zeigen würden. Dass auch bei Aufspaltung der Gesamtdatensätze nach Deckschichtgruppen und nach Altersgruppen (Liegzeit der Deckschicht) sich ebenfalls nur ganz wenige Trends bei den Zusammenhängen nachweisen liessen, war indessen eher erstaunlich und unerwartet. Dennoch liessen sich einige interessante neue und zum Teil beständige Erkenntnisse gewinnen.

Der in der Literatur festgestellte, allerdings mehrheitlich qualitativ beschriebene, Zusammenhang zwischen der Griffigkeit und der Textur (Makrotextur), liess sich im Rahmen dieser Untersuchung teilweise ebenfalls bestätigen.

Der in der Literatur häufig beschriebene Zusammenhang zwischen den Lärmemissionen und der Textur konnte im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nur teilweise und nur qualitativ erkannt werden, weil nur sehr schwache Korrelationen festgestellt wurden und weil sich bei den einzelnen Deckschichtgruppen teilweise unplausible und unerklärliche Abhängigkeiten zeigten. Eher erstaunlich erweist sich die Feststellung, dass sowohl die Griffigkeit als auch die Textur in 45 Jahren über alle Deckschichten betrachtet sich nur relativ wenig verschlechtern. Damit direkt verbunden dürfte auch die geringe Verschlechterung der Lärmemissionen über die grosse Zeitspanne stehen.

Aufgrund der Erkenntnisse hinsichtlich des schwachen und unsicheren Zusammenhangs Griffigkeit in Abhängigkeit der Textur (Makrotextur) kann die Texturprofilmessung bei bitumenhaltigen Deckschichten kein vollständiger Ersatz für die Griffigkeitsmessung darstellen. Die Texturmessung als Ersatz für Griffigkeitsmessungen bei Zementbetonbelägen und -deckschichten ist jedoch zu prüfen.

Aufgrund der sehr schwachen Korrelationen und damit den sehr unsicheren Zusammenhängen sowie der vorhandenen Widersprüchlichkeiten lassen sich anhand der Ergebnisse keine generellen Aussagen zum Lärmverhalten via Textureigenschaften (Makrotextur) machen.

Die zum Teil widersprüchlichen Ergebnisse beim Zusammenhang Griffigkeit und Textur zwischen den Deckschichtgruppen AC, SMA und den Deckschichtgruppen ACMR und PA bedürfen weiterer Erklärungen und allfälliger Untersuchungen.

Aufgrund der Erkenntnisse wäre zu prüfen, ob partielle Auswertungen mit homogenen Teildatensätzen zielführender zu quantitativer stärkeren und sichereren Aussagen führen könnten.



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

#### Zielerreichung:

Die gemäss bewilligtem Forschungsgesuch verfolgten Zielsetzungen

- Erkennen von quantifizierten Zusammenhängen zwischen der Belagstextur und der Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen verschiedener Beläge.
- Analyse der Einflüsse und Auswirkungen von Veränderungen der Textur (und der Griffigkeit) auf die Lärmemissionen.
- Ableitung von Grundlagen für die Bewertung der Textur als alltägliches weiteres Zustandsmerkmal zur Gesamtbewertung von Fahrbahnzuständen: liessen sich mit den durchgeführten Auswertungen und Analysen anhand der verwendeten Daten nur zum Teil erreichen.

Die angestrebten quantitativ zu beschreibenden Zusammenhänge,

- Zusammenhang zwischen der Belagstextur und der Griffigkeit von Fahrbahnbelägen
- Zusammenhang zwischen den Lärmemissionen (Rollgeräusch) und der Griffigkeit
- Zusammenhang zwischen den Lärmemissionen und der Belagstextur

konnten zum grössten Teil nur unsicher erkannt werden und verfügen nicht über die nötige Signifikanz für die Formulierung von quantitativen Abhängigkeiten. Schliesslich liess sich auch der Zusammenhang Griffigkeit und Textur statistisch nicht sicher nachweisen, so dass fortan kein Ersatz der Griffigkeitsmessung durch eine Texturmessung erfolgen kann.

Immerhin konnten aus dem grossen Datensatz viele aus der Literatur bekannten Zusammenhänge wiederum qualitativ nachgewiesen und somit bestätigt werden. Insbesondere interessant ist der trendmässig erkannte Zusammenhang zwischen der Griffigkeit und der Lärmemission, wonach generell mit zunehmender Griffigkeit bei Betrachtung über die Gesamtheit der Deckschichten sowie auch bei den einzelnen Deckschichtgruppen die Lärmemissionen abnehmen.

#### Folgerungen und Empfehlungen:

Aus der vorliegenden Untersuchung ist der interessante, in der Literatur selten beschriebene, direkte Zusammenhang zwischen der Lärmemissionen und der Griffigkeit sowohl bei Gesamtdatensatz als auch bei verschiedenen Teildatensätzen als zumindest einheitlich, wenn auch schwach und damit unsicher, mehrfach erkannt worden. Danach nehmen die Lärmemissionen mit zunehmender Griffigkeit ab.

Aufgrund der Erkenntnisse hinsichtlich des schwachen und unsicheren Zusammenhangs Griffigkeit in Abhängigkeit der Textur (Makrotextur) kann die Texturprofilmessung bei bitumenhaltigen Deckschichten kein vollständiger Ersatz für die Griffigkeitsmessung darstellen. Die Texturmessung als Ersatz für Griffigkeitsmessungen bei Zementbetonbelägen und -deckschichten wäre jedoch prüfenswert.

Aufgrund der sehr schwachen Korrelationen und damit sehr unsicheren Zusammenhängen sowie der vorhandenen Widersprüchlichkeiten lassen sich anhand der Ergebnisse keine generellen Aussagen zum Lärmverhalten via Textureigenschaften allein (Makrotextur) machen.

Aufgrund der Erkenntnisse wäre zu prüfen, ob partielle Auswertungen mit homogenen Teildatensätzen zielführender zu quantitativen stärkeren und sichereren Aussagen führen könnten. Allerdings müssten im Vorfeld einer solchen Untersuchung eine genauere Analyse der Datengrundlagen vorgenommen werden.

Aufgrund der Ergebnisse lassen sich keine allgemein gültigen, quantitativen Gesetzmässigkeiten formulieren, welche Gegenstand einer Normierung darstellen können.

#### Publikationen:

Lindenmann, H.P., Schiffmann, F., und Baumgartner, F., Kälin, E. und R. Braber (2014)  
Zusammenhang Textur und Griffigkeit von Fahrbahnen und Einflüsse auf die Lärmemission,  
VSS2009/703, Schriftenreihe UVEK, Bern

#### Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Lindenmann, Prof.

Vorname: Hans Peter

Amt, Firma, Institut: Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT) der ETH Zürich

#### Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

#### Beurteilung der Begleitkommission:

##### Beurteilung:

Aufgrund der grossen Datensätze und der vielfältigen Einflüsse auf die einzelnen Daten wie Alter und Art der Deckschichten, unterschiedlichste Nutzungen der Strassenabschnitte, unterschiedlichste Witterungseinflüsse in den verschiedenen Regionen der Schweiz sowie unterschiedliche Erhebungsbedingungen für Textur, Griffigkeit und Lärmemissionen musste erwartet werden, dass sich die einzelnen, zu untersuchenden Zusammenhänge nicht sehr deutlich zeigen würden. Dass die weiteren, vertieften Untersuchungen nach den einzelnen Deckschichtgruppen und Altersgruppen keine näheren Erkenntnisse hervorbrachten ist unerwartet.

Als interessant kann der festgestellte Zusammenhang Lärmemission und Griffigkeit, wenn auch schwach und damit unsicher nachgewiesen, angesehen werden. Danach nehmen die Lärmemissionen mit zunehmender Griffigkeit ab. Leider liess sich auch der Zusammenhang zwischen der Textur und der Griffigkeit nicht erhärten, so dass der Ersatz der aufwendigen Griffigkeitsmessungen durch die kostengünstigere Texturmessung nicht möglich sein wird.

Die Begleitkommission hat die Ergebnisse der Forschungsarbeit mit Interesse zur Kenntnis genommen und kann die Erkenntnisse der Forschungsstellen bestätigen. Sie ist einverstanden mit den aus den Untersuchungen hervorgegangenen Folgerungen und Empfehlungen.

##### Umsetzung:

Die Ergebnisse der Forschungsarbeit führen zu keinen direkt umsetzbaren Erkenntnissen in Normen.

##### weitergehender Forschungsbedarf:

Auch wenn die Forschungsergebnisse nicht zu den erhofften Erkenntnissen geführt haben, stellen sie immerhin eine Grundlage für das Verständnis der Zusammenhänge zwischen Griffigkeit bzw. Textur und Lärmemission dar. Wie weit vertiefte Untersuchungen und Analysen zu den gesuchten Zusammenhängen zu sichereren, quantitativen Abhängigkeiten führen würden, ist offen. Vor weiteren Untersuchungen wären die Eignung und Qualität der Datengrundlagen näher zu prüfen.

##### Einfluss auf Normenwerk:

Aufgrund der Ergebnisse lassen sich keine allgemein gültigen, quantitativen Gesetzmässigkeiten formulieren, welche Gegenstand einer Normierung darstellen können.

#### Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Seiler

Vorname: Luzia

Amt, Firma, Institut: Bundesamt für Strassen (ASTRA), UVEK, Bern

#### Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

14.10.2014

# Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Stand: 15.06.2014

| Bericht-Nr. | Projekt Nr.    | Titel                                                                                                                                                                                                                                           | Jahr |
|-------------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1465        | ASTRA 2000/417 | Erfahrungen mit der Sanierung und Erhaltung von Betonoberflächen                                                                                                                                                                                | 2014 |
| 1462        | ASTRA 2011/004 | Ermittlung der Versagensgrenze eines T2 Norm-Belages mit der mobiles Grossversuchsanlage MLS10                                                                                                                                                  | 2014 |
| 1460        | SVI 2007/017   | Nutzen der Verkehrsinformation für die Verkehrssicherheit                                                                                                                                                                                       | 2014 |
| 1459        | VSS 2002/501   | Leichtes Fallgewichtsgesetz für die Verdichtungskontrolle von Foundationsschichten                                                                                                                                                              | 2014 |
| 1458        | VSS 2010/703   | Umsetzung Erhaltungsmanagement für Strassen in Gemeinden - Arbeitshilfen als Anhang zur Norm 640 980                                                                                                                                            | 2014 |
| 1457        | SVI 2012/006   | Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 5: Medizinische Folgen des Strassenunfallgeschehens                                                                                                                                                           | 2014 |
| 1456        | SVI 2012/005   | Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 4: Einflüsse des Wetters auf das Strassenunfallgeschehen                                                                                                                                                      | 2014 |
| 1455        | SVI 2012/004   | Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 3: Einflüsse von Fahrzeugeigenschaften auf das Strassenunfallgeschehen                                                                                                                                        | 2014 |
| 1454        | SVI 2012/003   | Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 2: Einflüsse von Situation und Infrastruktur auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1                                                                                                                         | 2014 |
| 1453        | SVI 2012/002   | Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 1: Einflüsse von Mensch und Gesellschaft auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1                                                                                                                             | 2014 |
| 1452        | SVI 2012/001   | Forschungspaket VeSPA: Synthesebericht Phase 1                                                                                                                                                                                                  | 2014 |
| 1451        | FGU 2010/006   | Gasanalytik zur frühzeitigen Branddetektion in Tunneln                                                                                                                                                                                          | 2013 |
| 1450        | VSS 2002/401   | Kaltrecycling von Ausbauasphalt mit bituminösen Bindemitteln                                                                                                                                                                                    | 2014 |
| 1449        | ASTRA 2010/024 | E-Scooter - Sozial- und naturwissenschaftliche Beiträge zur Förderung leichter Elektrofahrzeuge in der Schweiz                                                                                                                                  | 2013 |
| 1448        | SVI 2009/008   | Anforderungen der Güterlogistik an die Netzinfrastruktur und die langfristige Netzentwicklung in der Schweiz. Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt C | 2014 |
| 1447        | SVI 2009/005   | Informationstechnologien in der zukünftigen Gütertransportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt E                                          | 2013 |
| 1446        | VSS 2005/454   | Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut: EP3: Stofffluss- und                                                                                                                                                              | 2013 |

| Bericht-Nr. | Projekt Nr.      | Titel                                                                                                                                                                                                                                                                       | Jahr |
|-------------|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
|             |                  | Nachhaltigkeitsbeurteilung                                                                                                                                                                                                                                                  |      |
| 1445        | VSS 2009/301     | Öffnung der Busstreifen für weitere Verkehrsteilnehmende                                                                                                                                                                                                                    | 2013 |
| 1444        | VSS 2007/306     | Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von Anlagen des leichten Zweirad- und des Fussgängerverkehrs                                                                                                                                                                        | 2013 |
| 1443        | VSS 2007/305     | Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit des strassengebundenen ÖV                                                                                                                                                                                                           | 2013 |
| 1442        | SVI 2010/004     | Messen des Nutzens von Massnahmen mit Auswirkungen auf den Langsamverkehr - Vorstudie                                                                                                                                                                                       | 2013 |
| 1441_2      | SVI 2009/010     | Zielsystem im Güterverkehr. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz - Teilprojekt G                                                                                                                | 2013 |
| 1441_1      | SVI 2009/010     | Effizienzsteigerungspotenziale in der Transportwirtschaft durch integrierte Bewirtschaftungsinstrumente aus Sicht der Infrastrukturbetreiber<br>Synthese der Teilprojekte B3, C, D, E und F des Forschungspakets Güterverkehr anhand eines Zielsystems für den Güterverkehr | 2013 |
| 1440        | SVI 2009/006     | Benchmarking-Ansätze im Verkehrswesen                                                                                                                                                                                                                                       | 2013 |
| 1439        | SVI 2009/002     | Konzept zur effizienten Erfassung und Analyse der Güterverkehrsdaten<br>Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz von Verkehrsmitteln im Güterverkehr der Schweiz TP A                                                                              | 2013 |
| 1438_2      | SVI 2009/011     | Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 2. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H                                                                    | 2013 |
| 1438_1      | SVI 2009/011     | Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 1. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H                                                                    | 2013 |
| 1437        | VSS 2008/203     | Trottoirüberfahrten und punktuelle Querungen ohne Vortritt für den Langsamverkehr                                                                                                                                                                                           | 2013 |
| 1436        | VSS 2010/401     | Auswirkungen verschiedener Recyclinganteile in ungebundenen Gemischen                                                                                                                                                                                                       | 2013 |
| 1435        | FGU 2008/007_OBF | Schadstoff- und Rauchkurzschlüsse bei Strassentunneln                                                                                                                                                                                                                       | 2013 |
| 1434        | VSS 2006/503     | Performance Oriented Requirements for Bituminous Mixtures                                                                                                                                                                                                                   | 2013 |
| 1433        | ASTRA 2010/001   | Güterverkehr mit Lieferwagen: Entwicklungen und Massnahmen<br>Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B3                                                                                        | 2013 |
| 1432        | ASTRA 2007/011   | Praxis-Kalibrierung der neuen mobilen Grossversuchsanlage MLS10 für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen in der Schweiz                                                                                                                                 | 2013 |
| 1431        | ASTRA 2011/015   | TeVeNOx - Testing of SCR-Systems on HD-Vehicles                                                                                                                                                                                                                             | 2013 |
| 1430        | ASTRA 2009/004   | Impact des conditions météorologiques extrêmes sur la chaussée                                                                                                                                                                                                              | 2013 |

| Bericht-Nr. | Projekt Nr.        | Titel                                                                                                                                                                                                     | Jahr |
|-------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1429        | SVI 2009/009       | Einschätzungen der Infrastrukturnutzer zur Weiterentwicklung des Regulativs Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP F         | 2013 |
| 1428        | SVI 2010/005       | Branchenspezifische Logistikkonzepte und Güterverkehrsaufkommen sowie deren Trends Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B2 | 2013 |
| 1427        | SVI 2006/002       | Begegnungszonen - eine Werkschau mit Empfehlungen für die Realisierung                                                                                                                                    | 2013 |
| 1426        | ASTRA 2010/025_OBF | Luftströmungsmessung in Strassentunneln                                                                                                                                                                   | 2013 |
| 1425        | VSS 2005/401       | Résistance à l'altération des granulats et des roches                                                                                                                                                     | 2013 |
| 1424        | ASTRA 2006/007     | Optimierung der Baustellenplanung an Autobahnen                                                                                                                                                           | 2013 |
| 1423        | ASTRA 2010/012     | Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP3: Betrieb und Unterhalt lärmarmen Beläge                                                                                                                    | 2013 |
| 1422        | ASTRA 2011/006_OBF | Fracture processes and in-situ fracture observations in Gipskeuper                                                                                                                                        | 2013 |
| 1421        | VSS 2009/901       | Experimenteller Nachweis des vorgeschlagenen Raum- und Topologiemodells für die VM-Anwendungen in der Schweiz (MDATrafo)                                                                                  | 2013 |
| 1420        | SVI 2008/003       | Projektierungsfreiräume bei Strassen und Plätzen                                                                                                                                                          | 2013 |
| 1419        | VSS 2001/452       | Stabilität der Polymere beim Heisseinbau von PmB-haltigen Strassenbelägen                                                                                                                                 | 2013 |
| 1418        | VSS 2008/402       | Anforderungen an hydraulische Eigenschaften von Geokunststoffen                                                                                                                                           | 2012 |
| 1417        | FGU 2009/002       | Heat Exchanger Anchors for Thermo-active Tunnels                                                                                                                                                          | 2013 |
| 1416        | FGU 2010/001       | Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prüfung nach SIA 262/1, Anhang D                                                                                                     | 2013 |
| 1415        | VSS 2010/A01       | Wissenslücken im Infrastrukturmanagementprozess "Strasse" im Siedlungsgebiet                                                                                                                              | 2013 |
| 1414        | VSS 2010/201       | Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen der Strassenausstattung                                                                                                                                         | 2013 |
| 1413        | SVI 2009/003       | Güterverkehrsintensive Branchen und Güterverkehrsströme in der Schweiz Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz Teilprojekt B1    | 2013 |
| 1412        | ASTRA 2010/020     | Werkzeug zur aktuellen Gangliniennorm                                                                                                                                                                     | 2013 |
| 1411        | VSS 2009/902       | Verkehrstelematik für die Unterstützung des Verkehrsmanagements in ausserordentlichen Lagen                                                                                                               | 2013 |
| 1410        | VSS 2010/202_OBF   | Reduktion von Unfallfolgen bei Bränden in Strassentunneln durch Abschnittsbildung                                                                                                                         | 2013 |
| 1409        | ASTRA 2010/017_OBF | Regelung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall                                                                                                                                                 | 2013 |
| 1408        | VSS 2000/434       | Vieillissement thermique des enrobés bitumineux en laboratoire                                                                                                                                            | 2012 |

| Bericht-Nr. | Projekt Nr.        | Titel                                                                                                                       | Jahr |
|-------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1407        | ASTRA 2006/014     | Fusion des indicateurs de sécurité routière : FUSAIN                                                                        | 2012 |
| 1406        | ASTRA 2004/015     | Amélioration du modèle de comportement individuel du Conducteur pour évaluer la sécurité d'un flux de trafic par simulation | 2012 |
| 1405        | ASTRA 2010/009     | Potential von Photovoltaik an Schallschutzmassnahmen entlang der Nationalstrassen                                           | 2012 |
| 1404        | VSS 2009/707       | Validierung der Kosten-Nutzen-Bewertung von Fahrbahn-Erhaltungsmassnahmen                                                   | 2012 |
| 1403        | SVI 2007/018       | Vernetzung von HLS- und HVS-Steuerungen                                                                                     | 2012 |
| 1402        | VSS 2008/403       | Witterungsbeständigkeit und Durchdruckverhalten von Geokunststoffen                                                         | 2012 |
| 1401        | SVI 2006/003       | Akzeptanz von Verkehrsmanagementmassnahmen-Vorstudie                                                                        | 2012 |
| 1400        | VSS 2009/601       | Begrünte Stützgitterböschungssysteme                                                                                        | 2012 |
| 1399        | VSS 2011/901       | Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Incentivierung                                                                        | 2012 |
| 1398        | ASTRA 2010/019     | Environmental Footprint of Heavy Vehicles Phase III: Comparison of Footprint and Heavy Vehicle Fee (LSVA) Criteria          | 2012 |
| 1397        | FGU 2008/003_OBF   | Brandschutz im Tunnel: Schutzziele und Brandbemessung Phase 1: Stand der Technik                                            | 2012 |
| 1396        | VSS 1999/128       | Einfluss des Umhüllungsgrades der Mineralstoffe auf die mechanischen Eigenschaften von Mischgut                             | 2012 |
| 1395        | FGU 2009/003       | KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau                                            | 2012 |
| 1394        | VSS 2010/102       | Grundlagen Betriebskonzepte                                                                                                 | 2012 |
| 1393        | VSS 2010/702       | Aktualisierung SN 640 907, Kostengrundlage im Erhaltungsmanagement                                                          | 2012 |
| 1392        | ASTRA 2008/008_009 | FEHRL Institutes WIM Initiative (Fiwi)                                                                                      | 2012 |
| 1391        | ASTRA 2011/003     | Leitbild ITS-CH Landverkehr 2025/30                                                                                         | 2012 |
| 1390        | FGU 2008/004_OBF   | Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Belchentunnel                                    | 2012 |
| 1389        | FGU 2003/002       | Long Term Behaviour of the Swiss National Road Tunnels                                                                      | 2012 |
| 1388        | SVI 2007/022       | Möglichkeiten und Grenzen von elektronischen Busspuren                                                                      | 2012 |
| 1387        | VSS 2010/205_OBF   | Ablage der Prozessdaten bei Tunnel-Prozessleitsystemen                                                                      | 2012 |
| 1386        | VSS 2006/204       | Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich                                                                         | 2012 |
| 1385        | VSS 2004/703       | Bases pour la révision des normes sur la mesure et l'évaluation de la planéité des chaussées                                | 2012 |
| 1384        | VSS 1999/249       | Konzeptuelle Schnittstellen zwischen der Basisdatenbank und EMF-, EMK- und EMT-DB                                           | 2012 |

