



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

Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen

Schadensprozesse und Zustandsverläufe

Processus de dégradation et lois d'évolution

Pavement damage processes and performance curves

Scazziga Ivan, dipl. Ing. ETH

**Forschungspaket Massnahmenplanung im
Erhaltungsmanagement, Forschungsauftrag VSS 2004/712
inkl. VSS 2004/716, Einzelprojekt 2, auf Antrag des
Schweizerischen Verbandes der Strassen- und
Verkehrsfachleute (VSS)**

August 2008

1304

Inhaltsverzeichnis

	Seite
INHALTSVERZEICHNIS	2
ZUSAMMENFASSUNG	5
RÉSUMÉ	7
ABSTRACT	9
1. EINLEITUNG	11
1.1 AUFTRAG UND ZIEL.....	11
1.2 AUFTRAGSABGRENZUNG.....	11
1.3 ERGÄNZUNG DES AUFTRAGES.....	11
1.4 VORGEHEN	12
1.4.1 <i>Methodik und Ausgangsdaten</i>	12
1.4.2 <i>Datenaggregation</i>	12
1.4.3 <i>Bezugsgrösse für die Modellbildung</i>	12
1.5 AUFBAU DES BERICHTES.....	12
2. AUSGANGSLAGE	14
2.1 ALLGEMEINE PROBLEMSTELLUNG.....	14
2.1.1 <i>Definition des Forschungsthemas</i>	14
2.1.2 <i>Verwendung von Verhaltensmodellen</i>	15
2.2 VORARBEITEN IN DER SCHWEIZ.....	16
2.2.1 <i>Langzeitbeobachtung ausgewählter Strassenabschnitte</i>	17
2.2.2 <i>Grossversuche (Rundlauf ETHZ, Halle fosse EPFL)</i>	17
2.2.3 <i>Beobachtungstrecken</i>	17
2.2.4 <i>Forschungsarbeiten zum Thema Verhaltensmodelle</i>	18
2.2.5 <i>Weitere Untersuchungen zu Verhaltensmodellen</i>	21
2.3 FOLGERUNGEN FÜR DIE ORGANISATION DER ARBEIT.....	27
2.3.1 <i>Vorgehensmethodik</i>	27
2.3.2 <i>Datenaufbereitung</i>	27
3. AUSWERTUNG DER AUSLÄNDISCHEN FACHLITERATUR	28
3.1 ORGANISATION DER AUSWERTUNGSARBEIT	28
3.2 BEGRIFFE: VERHALTEN (PERFORMANCE).....	28
3.3 VERHALTENSMODELLE ALS FIXES THEMA BEI INTERNATIONALEN KONFERENZEN ZUM ERHALTUNGSMANAGEMENT DER FAHRBAHNEN	28
3.3.1 <i>Gesamtüberblick</i>	28
3.3.2 <i>Ergebnisse Längsebenheit</i>	31
3.3.3 <i>Ergebnisse Querebenheit</i>	31
3.3.4 <i>Ergebnisse Griffigkeit</i>	31
3.3.5 <i>Ergebnisse Tragfähigkeit</i>	32
3.3.6 <i>Ergebnisse Oberflächenschäden</i>	32
3.4 AUSWERTUNG VON EINZELBEITRÄGEN.....	33
3.4.1 <i>Der AASHTO-Strassentest</i>	33
3.4.2 <i>Die HDM-Modelle [11]</i>	33
3.4.3 <i>Europäische Forschungsprojekte</i>	34
3.4.4 <i>Deutsche Untersuchungen</i>	35
3.4.5 <i>Arbeiten aus Österreich</i>	38
4. SCHADENSPROZESSE	39
4.1 SCHADENBILDUNG UND DIMENSIONIERUNGSKRITERIEN	39
4.1.1 <i>Schadenbildung</i>	39

4.1.2	<i>Dimensionierungskriterien</i>	40
4.2	SCHÄDEN INFOLGE VERKEHRSBELASTUNG (ERMÜDUNG, VERFORMUNG UND ABRIEB)	41
4.3	SCHÄDEN UNABHÄNGIG VON VERKEHRSBELASTUNG	42
4.4	KOMBINATION BEIDER VERURSACHER	43
4.5	SCHÄDEN INFOLGE EINBAUFEHLER UND MATERIALMÄNGEL	43
4.5.1	<i>Einbaufehler</i>	44
4.5.2	<i>Materialmängel</i>	45
5.	VERHALTENSMODELLE: MERKMALSGRUPPEN DER VISUELLEN ZUSTANDSERFASSUNG	46
5.1	VORBEMERKUNGEN ZUR ZUVERLÄSSIGKEIT DER ERHOBENEN ZUSTANDSDATEN	46
5.2	VORGEHEN	47
5.2.1	<i>Aufteilung nach Strassenkategorien</i>	47
5.2.2	<i>Bestimmung der Ausreisser</i>	49
5.3	INDEX IA1: OBERFLÄCHENGLÄTTE.....	50
5.3.1	<i>Gemeindestrassen</i>	50
5.3.2	<i>Kantonsstrassen</i>	51
5.3.3	<i>Nationalstrassen</i>	53
5.4	INDEX IA2: BELAGSCHÄDEN	54
5.4.1	<i>Gemeindestrassen</i>	54
5.4.2	<i>Kantonsstrassen</i>	55
5.4.3	<i>Nationalstrassen</i>	57
5.5	INDEX IA3: VERFORMUNGEN	58
5.5.1	<i>Gemeindestrassen</i>	58
5.5.2	<i>Kantonsstrassen</i>	59
5.5.3	<i>Nationalstrassen</i>	60
5.6	INDEX IA4: STRUKTURELLE SCHÄDEN	61
5.6.1	<i>Gemeindestrassen</i>	61
5.6.2	<i>Kantonsstrassen</i>	62
5.6.3	<i>Nationalstrassen</i>	64
5.7	INDEX IA5: FLICKE.....	65
5.7.1	<i>Gemeindestrassen</i>	66
5.7.2	<i>Kantonsstrassen</i>	67
5.7.3	<i>Nationalstrassen</i>	69
6.	VERHALTENSMODELLE: LÄNGSEBENHEIT (INDEX I2)	70
6.1	AUSGANGSLAGE.....	70
6.2	VORGEHEN	70
6.2.1	<i>Aufteilung nach Strassenkategorien</i>	70
6.2.2	<i>Bestimmung der Ausreisser</i>	70
6.2.3	<i>Bestimmung der massgebenden Einflussfaktoren</i>	71
6.3	GEMEINDESTRASSEN.....	72
6.4	MODELLE FÜR KANTONSSTRASSEN	74
6.4.1	<i>Allgemeine Ebenheitsverhältnisse auf Kantonsstrassen</i>	74
6.4.2	<i>Ergebnisse der Auswertung</i>	74
6.5	MODELLE FÜR NATIONALSTRASSEN.....	76
6.5.1	<i>Allgemeine Ebenheitsverhältnisse auf Nationalstrassen</i>	76
7.	VERHALTENSMODELLE: QUEREBENHEIT (INDEX I3)	78
7.1	AUSGANGSLAGE.....	78
7.2	VORGEHEN	78
7.2.1	<i>Aufteilung nach Strassenkategorien</i>	78
7.2.2	<i>Bestimmung der Ausreisser</i>	79
7.2.3	<i>Bestimmung der massgebenden Einflussfaktoren</i>	79
7.3	MODELLE FÜR GEMEINDESTRASSEN.....	81
7.4	MODELLE FÜR KANTONSSTRASSEN	82
7.5	MODELLE FÜR NATIONALSTRASSEN.....	83

7.6	STREUUNG DER ERGEBNISSE AUF NATIONALSTRASSEN	85
8.	VERHALTENSMODELLE: GRIFFIGKEIT (INDEX I4).....	87
8.1	ALLGEMEINES	87
8.2	TEILANALYSE NATIONALSTRASSEN	87
8.3	MODELLBILDUNG GEMÄSS DEUTSCHEN FORSCHUNGSERGEBNISSEN	89
8.3.1	<i>Untersuchungen Versuchsstrecke A70 Bamberg [79]</i>	89
8.3.2	<i>Untersuchungen Netz der deutschen Bundesautobahnen [78]</i>	89
8.4	MODELLE FÜR NATIONALSTRASSEN.....	91
8.5	MODELLE FÜR KOMMUNALE VERHÄLTNISSSE	94
8.6	MODELLE FÜR KANTONSSTRASSEN	97
9.	VARIATION DER TRAGFÄHIGKEIT	98
9.1	ALLGEMEINES	98
9.2	NACHWEIS DER STABILITÄT DER DEFLEKTIONSWERTE	99
9.3	FOLGERUNGEN FÜR DIE MODELLBILDUNG	103
10.	ALTERNATIVE VERFAHREN UND ANPASSUNG DER MODELLE	104
10.1	VERFAHREN BEI UNKENNTNIS DER ALTERSANGABEN.....	104
10.2	WAHL EINES VERHALTENSMODELLS AUS EINER VORGEgebenEN KURVENsCHAR	104
10.3	ANPASSUNG DER MODELLE AN DEN AUSGANGSWERT	105
11.	NORMIERUNG DER THEMATIK "VERHALTENSMODELLE"	107
11.1	GRUNDSÄTZLICHES	107
11.2	SCHEMA FÜR DEN NORMAUFBAU.....	107
12.	ZUSAMMENFASSUNG UND BEWERTUNG DER ERGEBNISSE	109
12.1	ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE	109
12.2	BEWERTUNG DER ERGEBNISSE.....	112
12.3	ZUSAMMENARBEIT	113
13.	LITERATURVERZEICHNIS.....	114

Zusammenfassung

Die systematische Massnahmenplanung bei Fahrbahnen stellt im Erhaltungsmanagement von Strassenverkehrsanlagen einen der zentralen und entscheidenden Prozesse dar. Sie zeigt, welche Erhaltungsmassnahmen in einem längeren Betrachtungszeitraum wann auszuführen sind, um den wirtschaftlich höchsten Nutzen mit den getätigten Aufwendungen zu erzielen. Die Grundlagen für diese Planungs- und Optimierungsaufgabe wurden im Rahmen des Forschungspaketes VSS 2004/710-716 für die Schweiz erarbeitet.

Die engen Beziehungen zwischen den in den Einzelprojekten zu entwickelnden Planungsinstrumenten konnten in den Forschungsarbeiten durch die Vernetzung in einem Forschungspaket herausgearbeitet werden. Dies ermöglichte eine optimale Abstimmung der Forschungsergebnisse. Die Hauptresultate der fünf Einzelprojekte und deren Verwendung im Tätigkeitsablauf der systematischen Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement sind im Synthesebericht zum Forschungspaket aufgezeigt.

Das Einzelprojekt 2 VSS 2004/712 „Schadensprozesse und Zustandsverläufe“, welches auch den Zusatzauftrag VSS 2004/716 beinhaltet, liefert für eine Vielzahl von definierten Zustandsmerkmalen der Fahrbahnoberfläche ihre Schadensentwicklung in Abhängigkeit der Nutzungsdauer und damit die dazugehörigen Verlaufskurven.

Dieser Bericht befasst sich in eingehender Weise mit der Thematik des Verhaltens von Strassen indem einerseits typische Zerfallprozesse in Zusammenhang mit der Strassendimensionierung und in Abhängigkeit verschiedener Ursachen behandelt werden – dabei wird auch auf das frühe Erscheinen von Schäden infolge Mängel der eingebauten Materialien und der Ausführung der Bauarbeiten eingegangen – und andererseits durchwegs mittels einer empirischen Vorgehensweise Verhaltensmodelle für Gemeinde-, Kantons- und Nationalstrassen mit bitumenhaltigen Belägen erarbeitet werden.

Im Bericht werden verschiedene Untersuchungen, die in der Schweiz zu diesem Thema bisher durchgeführt wurden umfassend beschrieben. Die Auswertung der internationalen Fachliteratur erfolgte mittels einer Gesamtübersicht aus der Analyse aller Beiträge zur Thematik der Verhaltensmodelle aus internationalen Konferenzen und durch die Hervorhebung einzelner besonders interessanter Arbeiten.

Verhaltensmodelle wurden für verschiedene Hauptgruppen der visuellen Zustandserfassung sowie für die messtechnisch erhobenen Grössen der Längsebenheit, der Spurrinnenbildung, der Griffigkeit und der Tragfähigkeit untersucht. Für die zuletzt genannte Grösse wurden schon im Vorfeld der Arbeitsaufnahme Zweifel über die Aussicht auf ein Ergebnis im Sinne einer zeitabhängigen Entwicklung angemeldet, die dann durch die Auswertung einiger Ergebnisse bestätigt werden konnten. Für alle anderen Kenngrössen wurden separat nach Strassenkategorie in erster Linie Modelle in Abhängigkeit der Verkehrslastklasse entwickelt, teilweise auch, bei entsprechender Abhängigkeit der Kenngrösse und einer genügenden Datenmenge auch in Abhängigkeit der strukturellen Eigenschaften (gemessen an der Tragfähigkeit).

Die Qualität der entwickelten Modelle steht in direktem Zusammenhang mit der Qualität der bei der Auswertung verfügbaren Daten. Während bei den messtechnisch ermittelten Grössen unter der Annahme fehlerfreier Datensätzen bezüglich der dazugehörigen Altersangaben von einer hohen Zuverlässigkeit des gemessenen Wertes ausgegangen werden darf, kann dies bezüglich der Ergebnisse der visuellen Zustandserfassung nicht behauptet werden. Die entsprechenden Modelle werden denn auch durch Unsicherheiten bei der Bewertung von Ausmass und Schwere der Schäden und durch kaum vermeidbare Fehler in der Zuordnung des beobachteten Mangels zur richtigen Merkmalsgruppe beeinflusst.

Aus der Sicht der praktischen Anwendung liefert der Bericht auch Ansätze zu alternativen Lösungen für die Ausarbeitung von Verhaltensmodellen bei fehlenden Altersangaben oder ungenügendem Datenumfang und zeigt auf, wie die Modelle im Rahmen einer Entwicklungsprognose für einen betrachteten Strassenabschnitt an die Ausgangsgrösse angepasst werden können.

Die im Bericht für verschiedene Randbedingungen vorgestellten Modelle ergeben eine in der Schweiz bisher einmalige Zusammenstellung von Verhaltenskurven für alle Zustandsindizes und alle Strassenkategorien dar. Die Modelle beruhen auf die Auswertung visuell erhobener oder gemessener Zustandswerte aus einer Auswahl von einigen Tausend km schweizerischer Strassen denen meist zumindest auch Angaben über das Alter der Beläge, teilweise auch solche über die Tragfähigkeit oder die Höhenlage zugeordnet werden konnten. Die im Bericht vorgestellten Modelle werden nicht als eine abschliessende Untersuchung zum Thema betrachtet, zumal die verfügbaren Datensätze die Kenntnis weiterer für die Analyse interessanter Grössen – z.B. über verschiedene Belagsarten – nicht in einer für die statistische Auswertung genügenden Menge liefern konnten. In einem Umfeld, welches von einer zunehmenden Bedeutung des Managements der Strassenerhaltung geprägt ist und wo auch mit der Zeit vermehrt Daten verfügbar sein werden, ist die laufende Auswertung der Zustandserfassung – und dazu gehört auch die Verfeinerung und Weiterentwicklung von Verhaltensmodellen – an sich eine Pflicht und Daueraufgabe. Unter diesen Voraussetzungen wurde auch ein einfaches Konzept für die Ausarbeitung einer Norm zum Thema Verhaltensmodelle vorgeschlagen.

Résumé

La planification systématique des mesures d'entretien pour les chaussées est un des processus principaux et décisifs pour la gestion de l'entretien des infrastructures routières. Elle démontre, pour une période d'observation donnée, quelles mesures d'entretien doivent être exécutées à quel moment afin d'atteindre le meilleur rapport coûts bénéfiques avec les moyens disponibles. Les bases pour cette tâche de planification et d'optimisation ont été élaborées pour la Suisse dans le cadre du projet de recherche VSS 2004/710-716.

Les relations étroites entre les instruments de planification – développés dans des projets individuels – ont pu être établies dans différents projets de recherche grâce à leur intégration dans un programme de recherche. Ceci a permis une coordination idéale des résultats de recherches. Le rapport de synthèse sur le programme de recherche met en évidence les principaux résultats des cinq projets individuels et leur utilisation dans le cadre de la planification systématique relative à la gestion de l'entretien des infrastructures routières.

Le projet 2 VSS 2004/712 "Processus de dégradation et lois d'évolution" – qui comprend également le projet VSS 2004/716 – fournit des lois d'évolution (courbes de performance) qui mettent en évidence le développement des dégradations pour de nombreuses caractéristiques d'état des surfaces de roulement en fonction de la durée d'utilisation.

Ce rapport s'occupe en détail du sujet du comportement des chaussées, d'une part par la description des différents mécanismes de dégradation des chaussées en fonction de leur dimensionnement et d'autres facteurs d'influence – sans oublier de mentionner aussi les dégradations sur enrobés jeunes à la suite de défauts de matériaux ou de pose – et d'autre part par le développement d'une série de lois d'évolution pour des routes communales, cantonales et nationales avec revêtement hydrocarboné sur la base d'une approche systématiquement empirique.

Le rapport contient une description exhaustive des différentes études sur le sujet entreprises en Suisse jusqu'ici. Les résultats de la recherche bibliographique internationale sont présentés par moyen d'une analyse de toutes les contributions sur les lois d'évolution publiées pour différentes conférences internationales et par une mise en évidence particulière de quelques publications d'intérêt particulier.

La recherche de lois d'évolution s'est occupée de l'ensemble des groupes principaux du relevé visuel et des paramètres mesurés tels que la planéité longitudinale, l'orniérage, l'adhérence et la portance des chaussées. Pour ce dernier paramètre, des doutes qui avaient déjà été formulés avant le début des travaux quant aux possibilités de trouver une évolution en fonction du temps ont été confirmés par l'exploitation d'un certain nombre de données. Pour tous les autres paramètres ou indices il a été possible de développer pour chaque catégorie de route des modèles en fonction de la classe de trafic de dimensionnement, partiellement aussi, en dépendance de la disponibilité de données et de la pertinence du facteur d'influence, des caractéristiques structurelles (portance).

La qualité des modèles présentés a un lien très direct avec la qualité des données disponibles pour l'exploitation. Si l'on peut admettre une très grande fiabilité des données mesurées, pour autant que les indications correspondantes de l'âge des revêtements soient correctes, il n'en est pas de même dans le cas du relevé visuel. Les modèles correspondants reflètent forcément les incertitudes dans l'évaluation de l'étendue et de la gravité des dégradations et les erreurs inévitables dans l'attribution d'un défaut observé à la catégorie de dégradation correcte.

Le rapport présente aussi des procédures alternatives pour le développement de modèles de comportement, applicables dans les cas d'indisponibilité de données sur l'âge des revêtements ou d'un jeu de données trop réduit et donne des indications sur les procédures à suivre pour l'adaptation des modèles à la valeur initiale d'un tronçon de chaussée lors d'applications pratiques du pronostic de l'évolution future.

Les différents modèles applicables pour différentes conditions à tous les paramètres d'état et toutes les catégories de route représentent un ensemble global de lois d'évolution tel qu'il n'a jamais été présenté jusqu'ici en Suisse. Les modèles sont le résultat de l'exploitation des relevés et mesures de valeurs d'état sur plusieurs milliers de km de routes suisses, auxquels ont pu être généralement associées des indications sur l'âge des chaussées, partiellement aussi des indications sur la portance ou la zone climatique (altitude). Les lois d'évolution présentées dans le rapport ne sont pas considérées comme une solution "finale", surtout en considérant que les données disponibles n'ont pas permis de pouvoir disposer d'une quantité suffisante aux analyses statistiques d'autres données intéressantes pour les exploitations, par exemple les types de couche de surface. Dans un contexte professionnel caractérisé par une importance croissante de la gestion de l'entretien des chaussées et par le potentiel d'une disponibilité de données bien plus complètes, l'exploitation continue des relevés d'état – et le développement et l'accroissement du niveau de détail des lois d'évolution en font partie intégrale – est à la fois un devoir et une tâche continue. Le concept pour la structure d'une norme sur les lois d'évolution proposé dans le rapport prend en compte les considérations ci-dessus.

Abstract

Systematic action planning is a central and crucial process within the management of road maintenance. It demonstrates for a given observation period at what time which interventions for road maintenance are to be performed in order to attain the best cost-benefit ratio with the given financial resources. The fundamentals for this planning and optimizing task have been compiled for Switzerland within the research package VSS 2004/710-716.

The close relations between the planning instruments – developed within individual research projects – could be worked out thanks to their integration into a research package. This enabled the optimized adjustment of the research results. The synthesis report of this research package demonstrates the main results of all individual research projects and their use for systematic action planning within the management of road maintenance.

Project 2 VSS 2004/712 “Pavement damage processes and performance curves“ – with inclusion of VSS 2004/716 – delivers performance curves indicating the development of damage for a number of defined road surface attributes in relation to service life.

The report deals in detail with the subject of the performance of pavements from two different points of view. A first approach covers the description of different damage processes in dependence both from the design of the pavement and from different other causes; this includes also the discussion of early damage appearances due to poor quality of the materials used or to poor quality of construction work (spreading and compacting). The second and main approach relates to the development of different sets of performance curve for asphalt pavements for communal, cantonal and national roads by means of an empirical solution.

The results of different previous studies on performance models conducted in Switzerland are described in detail in the report. The international literature survey focuses on one side on the overview of all the contributions to the subjects presented at international conferences and on the other side on the individual presentation of some reports of specific interest.

The development of performance models covers the different main damage groups ("damage families") evaluated by means of visual distress surveys, and the measured values for roughness, rutting, skid resistance and bearing capacity. Doubts had already been expressed before the beginning of the studies about the practical possibility to be able to show a time dependent development of bearing capacity and these doubts have been confirmed by the results of the analysed data. For all the other condition indicators models have been developed primarily as a function of design traffic categories and additionally – where clear evidence of a correspondent dependency was given and when the data set was sufficiently large – of structural properties (determined by bearing capacity).

The quality of the models derived in the study is directly related to the quality of the data available for the analysis. Under the assumption of correct indications of the age of the analysed data sets a high level of reliability can be admitted for data obtained through measurements carried out in condition surveys. On the contrary, a similar level of reliability cannot be expected from data obtained by means of visual distress surveys. The uncertainties derived from the determination of extent and severity of the damages and from unavoidable errors in assigning observed damages to the appropriate damage type have clearly an influence on the models obtained through the analysis of the corresponding data.

From the point of view of practical application of models the report also gives indications on alternate solutions for the development of models in cases of missing data on the age of the pavements and of data sets of limited size and it also shows how the models can be adapted to the initial value of a given pavement section when a performance prediction has to be carried out.

The models presented in the report for specific boundary conditions represent a so far unique collection of performance models for all condition indicators and all road categories in Switzerland. The models rely on the analysis of condition data collected by means of measurements or by visual inspection on some thousands of km of roads in Switzerland with associated indication on the age of the pavement, partially also on their bearing capacity and altitude. The models which are presented in the report are not considered to be the final answer to the search of performance models. In fact the available amount of information did generally not include other data of specific interest for the task, as for instance the type of pavement materials, and when such data were available, their amount was still not sufficient for an appropriate statistical analysis. In an environment which is characterised by the increasing importance of pavement maintenance management and by growing amounts of available data regarding type, age and condition of pavements, the processing of condition data, and this task includes refinements and further development of performance models, is a must and a continuous task. Under these conditions, a simple concept for the preparation of a standard specification on the topic of performance models has been proposed.

1. Einleitung

1.1 Auftrag und Ziel

Auf Antrag der VSS hat das Bundesamt für Strassen ASTRA mit Brief vom 13. Juli 2005 die Forschungsstelle mit der Durchführung des Forschungsprojektes "*Forschungspaket: Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen; Einzelprojekt 2: Schadensprozesse und Zustandsverläufe*" beauftragt.

Das Gesuch und das detaillierte Vorgehenskonzept der Forschungsstelle war auf der Grundlage einer Ausschreibung entsprechender Forschungsarbeiten durch die Fachkommission 7 Erhaltungsmanagement ausgearbeitet worden. In der Ausschreibung wurden die Ziele der Forschungsarbeit wie folgt formuliert:

Das Forschungsprojekt hat folgende Ziele:

- *Bestimmung von Verhaltenskurven (Form und Zyklus) für strukturelle Oberflächenschäden, Längs- und Querunebenheit, Griffigkeit und Tragfähigkeit in Abhängigkeit verkehrlicher und örtlicher Einflüsse für verschiedene standardisierte Erhaltungsmassnahmen.*
- *Erarbeitung der Grundlagen für einen Normentwurf.*

1.2 Auftragsabgrenzung

Die im Rahmen dieser Forschungsarbeit ausgearbeiteten Modelle beziehen sich auf die Zustandsmerkmale und/oder Zustandsindizes, die in den Normen SN 640 925b "Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF) - Zustandserhebung und Indexbewertung" und SN 640 926 "Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF) – Visuelle Zustandserhebung: Einzelindizes" definiert sind, wobei ausschliesslich Fahrbahnbeläge in bituminöser Bauweise behandelt werden.

Angaben zur Entwicklung der Längsebenheit von Betonbelägen finden sich in einem früheren Forschungsbericht [3]; die vor allem in Innerortsbereichen vorhandenen Pflästerungen werden nicht behandelt.

1.3 Ergänzung des Auftrages

Ergänzend zum Forschungsauftrag 2004/712 "Schadensprozesse und Zustandsverläufe" (Gegenstand dieses Berichtes) wurde durch das Bundesamt für Strassen ASTRA an die Firma SACR der Auftrag 2004/716 erteilt. Dieser Auftrag bezweckt die Zusammenstellung von Zustandsdaten kommunaler Strassen als Grundlage für die Analysen von Verhaltensmodellen für diese Strassengruppe im Rahmen von FA 2004/712. Die zusammengestellten und übermittelten Daten beziehen sich auf das Strassennetz der Stadt Genf.

1.4 Vorgehen

1.4.1 Methodik und Ausgangsdaten

Für die Entwicklung der in diesem Bericht vorgestellten Verhaltensmodelle wurde durchwegs ein deterministischer Ansatz gewählt, bei welchem die Entwicklung eines Parameters in Abhängigkeit des Alters dargestellt wird. Weitere Einflussfaktoren (vor allem die Verkehrslastklasse) werden ebenfalls berücksichtigt. Die Umsetzung dieses Ansatzes erfordert die Verfügbarkeit von Datensätzen, bei welchem das Alter des Abschnittes bekannt ist. Solche Datensätze waren für die hier beschriebene Aufgabe für das Nationalstrassennetz im Gebiet des Kantons Tessin und für das kantonale Strassennetz des Kantons Freiburg vorhanden. Diese Daten sind primär in die Entwicklungsarbeiten eingeflossen. Zusätzlich wurden Erfahrungswerte aus Zustandsdaten der kantonalen Strassennetze von Neuenburg, Schaffhausen, Tessin und Wallis mitberücksichtigt und die aufgrund der Netzaufnahmen von 1999-2001 bekannte Zustandsverteilung auf dem ganzen Nationalstrassennetz.

1.4.2 Datenaggregation

Im Hinblick darauf, dass die praktische Verwendung von Verhaltensmodellen auf den Einsatz von Erhaltungsmanagement-Systemen (PMS) hinzielt, bei denen die Art und der optimale Zeitpunkt von Massnahmen für alle Abschnitte in einem untersuchten Netz gesucht wird, wird dieser Bezug auf den "Abschnitt" auch bei der Herleitung von Verhaltensmodellen berücksichtigt. Dies kommt dadurch zum Ausdruck, dass die als Grundlage für die Regressionsrechnungen verwendeten Daten durchwegs aggregierte Abschnittswerte darstellen. Bezüglich der Datenaggregation wurde das bei PMS-Anwendungen in Verbindung mit STRADA-DB festgelegte Konzept übernommen [5], wonach sich der massgebende Abschnittswert aller Indizes aus der Summe von Mittelwert und einfacher Standardabweichung berechnet.

1.4.3 Bezugsgrösse für die Modellbildung

Im Bewusstsein der möglichen periodischen Änderungen der Umwandlungsregeln zwischen der gemessenen Grösse eines Parameters und dem dazugehörigen Indexwert (so geschehen bei der Herausgabe der Norm SN 640 925b) wird grundsätzlich der gemessene Wert (z.B. Spurtiefe T) als Bezugsgrösse für die Modellbildung verwendet und nicht der Indexwert, dessen Beziehung zum Messwert von der Strassenkategorie abhängig sein kann. Von diesem vorgehen wird einzig bei den Oberflächenschäden abgewichen, die welchen keine eigentliche "Messgrösse" vorhanden ist (Quantifizierung über das Produkt von Ausmass und Schwere).

1.5 Aufbau des Berichtes

Die beiden ersten folgenden Kapitel befassen sich mit den vorhandenen Grundlagen. In Kapitel 2 werden neben einer grundsätzlichen Betrachtung über den Zwecke und die Verwendung von Verhaltensmodellen vor allem die bisherigen Untersuchungen zum Thema aus der Schweiz aufgelistet und deren Ergebnisse zusammengefasst. Diese bisherigen Untersuchungen umfassen die Langzeitbeobachtung einzelner Strecken, die

periodische Protokollierung der Zustandsentwicklung im Rahmen von Grossversuchen im "Zeitraffer" beim Rundlauf der ETH und der "halle fosse" der ETH Lausanne, bisherige Forschungsprojekte mit direktem und indirektem Bezug zu Verhaltensmodellen sowie projektbezogene Studien in Zusammenhang mit der Auswertung einer entzweiten Zustandserfassung oder dem Aufbau von PMS-Anwendungen für verschiedene Kantone.

Kapitel 3 wendet sich hingegen der Literaturlauswertung aus internationaler Sicht zu, in welchem neben den Hinweisen und Kommentaren zu einzelnen Publikationen eine Querschnittsauswertung aller Beiträge zur Thematik der Verhaltensmodellen aus verschiedenen internationalen Konferenzen zum Management der Strassenerhaltung ausgewertet wurden.

In Kapitel 4 werden Schadenmechanismen und entsprechende Dimensionierungskriterien vorgestellt. Die Beanspruchung der Strassen wird in verschiedene lastabhängige und lastunabhängige Faktoren unterteilt, deren Wirkung auf die Schadenbildung aufgezeigt wird. Die Ausführungen in diesem Kapitel werden mit Hinweisen auf das vorzeitige Auftreten von Schäden infolge Ausführungsfehler oder Materialmängel ergänzt und die kurz- und langfristigen Folgen der verschiedenen Mängel zusammengefasst.

Die Kapitel 5 bis 9 enthalten, gegliedert nach Gemeinde-, Kantons- und Nationalstrassen, die Ergebnisse der Auswertungen der vorhandenen Daten im Hinblick auf die Bestimmung von Verhaltensmodellen mittels Regressionsrechnung. Bei sämtlichen Modellen wird das Belagsalter als Bezugsgrösse verwendet. Die weiteren Variablen sind bei Gemeinde- und Kantonsstrassen die Verkehrslastklasse und die Tragfähigkeit, bei den Nationalstrassen, welche den Verkehrslastklassen T5 und T6 zugeordnet werden, werden die einzelnen Fahrstreifen als weitere Variable verwendet. Die einzelnen Kapitel enthalten auch merkmalspezifische Bemerkungen und die Angaben zum Vorgehen für eine allfällige Aussortierung von Datensätzen, welche als Ausreisser betrachtet werden.

Die in Kapitel 10 enthaltenen Ergänzungen betreffen einerseits alternative Möglichkeiten der Beschaffung von Verhaltensmodellen mittels vereinfachten Verfahren oder durch die Definition theoretisch-empirisch definierter Standardkurven und andererseits praktische Probleme der konkreten Modellanwendung, bei welchen es darum geht ein vorhandenes Modell und den tatsächlichen Ausgangswert auf einem Abschnitt in die korrekte Beziehung zueinander zu bringen.

Im Kapitel 11 wird die Normierung von Verhaltensmodellen angesprochen, wobei die Gründe aufgelistet werden, warum sich eine Norm zu diesem Thema in erster Linie auf Vorgehens- und Anwendungsgrundsätze beschränken sollte, und von der Nennung konkreter Modelle Abstand nehmen sollte. Der Vorschlag für den schematischen Aufbau der Norm ergänzt die Ausführungen.

2. Ausgangslage

2.1 Allgemeine Problemstellung

2.1.1 Definition des Forschungsthemas

Die in diesem Bericht vorgestellten Ergebnisse einer Forschungsarbeit beziehen sich auf die in Strasse und Verkehr Nr. 9 / 2004 veröffentlichte Ausschreibung von Forschungsvorhaben zum Thema "Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen", insbesondere zum Einzelprojekt 2 "Schadensprozesse und Zustandsverläufe (Verhaltenskurven)", welches wie folgt umschrieben wird:

Beschreibung des Themas

Schadensprozesse und Zustandsverläufe von Strukturschäden und Rissen, Längs- und Querunebenheit, Griffigkeit und Tragfähigkeit (Verhaltenskurven).

Ziele der Forschungsarbeit:

Das Forschungsprojekt hat folgende Ziele:

- Bestimmung von Verhaltenskurven (Form und Zyklus) für strukturelle Oberflächenschäden, Längs- und Querunebenheit, Griffigkeit und Tragfähigkeit in Abhängigkeit verkehrlicher und örtlicher Einflüsse für verschiedene standardisierte Erhaltungsmassnahmen.
- Erarbeitung der Grundlagen für einen Normentwurf.

Notwendigkeit und Zeile der Forschungsarbeit sind durch die Definition des Forschungspaketes "Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen" und der Einzelprojekte 1 bis 5 seitens der Fachkommission 7 der VSS vorgegeben, welche auch die von der Forschungsarbeit erwarteten Resultate festgelegt hat.

Erwartete Resultate:

Es werden folgende konkrete Resultate bei der Durchführung der Forschungsarbeit erwartet:

- Verlaufskurven für Strukturschäden, Längsunebenheit, Spurrinnen, Griffigkeit und Tragfähigkeit in Abhängigkeit der Lebensdauer je mit und ohne Instandsetzungsmassnahmen.
- Methodik zur Verwendung der Verlaufskurven, unter Berücksichtigung der zurückliegenden Zustandsentwicklung (Zustandserhebung) zur Formulierung der Zustandsentwicklung (Prognose).
- Geltungsbereich der Verlaufskurven für Strassen innerorts und Strassen ausserorts, für flaches und coupiertes Gelände und für Mittelland und höhere Lagen.
- Problemstellung wie in Ausschreibungstext beschrieben

Verhaltensmodelle sind eine auf mathematischen Gleichungen beruhende Darstellung des Verlaufs bestimmter Zustandsmerkmale der Strassenoberfläche. Sie stellen eine wesentliche Entscheidungsgrundlage für die mittel- und langfristige Planung von Erhaltungsmassnahmen dar und insbesondere erleichtern die damit den Vergleich

verschiedener Massnahmen aus einer Kosten/Nutzen-Betrachtung über längere Zeiträume.

Die netzweite Simulation der Entscheidungsprozesse für die Wahl der Erhaltungsmassnahmen im Rahmen der rechnergestützten Erhaltungsplanung (Management der Erhaltung von Fahrbahnen, die allgemein mit der angelsächsischen Kürzel PMS (Pavement Management System) bezeichnet wird.

Die Fachkommission 7 "Management der Strassenerhaltung" der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute VSS hat die Dringlichkeit der Verfügbarkeit von Verhaltensmodellen für alle Strassen der Schweiz erkannt

2.1.2 Verwendung von Verhaltensmodellen

Das Thema der Forschungsarbeit wurde durch die FK7 "Management der Strassenerhaltung" der VSS formuliert, mit dem Ziel entsprechende Kenngrössen für deren Implementierung in EDV-Lösungen – besser bekannt unter dem Begriff PMS oder Pavement Management System - festzulegen. Damit ist bereits eine erste, allgemeine Bedarfsaussage gegeben:

Zustandsindizes (oder: Kenngrössen des Strassenzustandes) sind eine der wichtigen Eingangsgrössen in einem PMS-Prozess und stellen eine der Grundvoraussetzungen für die Anwendung solcher Systeme dar.

Eine engere Auseinandersetzung mit der Frage der Verwendung von Zustandsindizes und der dazugehörigen Verhaltensmodelle wurde bereits in einer früheren Forschungsarbeit [7] eingehender behandelt aus welcher einige Aussagen hier zitiert werden.

Die Berücksichtigung der Zustandsindizes in einem PMS-Prozess hängt im Besonderen auch noch davon ab, nach welchen Hauptkriterien für die Entscheidung ein PMS-Prozess aufgebaut ist. So kann insbesondere unterschieden werden einerseits nach Verfahren, welche auf eine Dringlichkeitsreihung oder Prioritätenliste basieren und andererseits nach Methoden bei denen die Massnahmenvorschläge aufgrund einer Optimierung vorgenommen werden. Bei letzterer kann überdies noch unter den folgenden Hauptkriterien der Optimierung unterschieden werden:

- *Kosten des Strassenbetreibers (Minimierung der Kosten, bzw. Maximierung des Nutzens des Strassenbetreibers),*
- *Kosten des Strassennutzers,*
- *gesamte Transportkosten.*

Unabhängig von der gewählten Art der Methodik und des Optimierungskriteriums gilt es zunächst sich über den konkreten Verwendungsbedarf von Zustandsindizes im Klaren zu sein [21]. Zu dieser Klarheit gelangt man, wenn man sich beispielsweise folgende Fragen stellt:

- *warum erleiden Strassen Schäden?, und*
- *wie können diese Schäden behoben werden?*

Die Beantwortung dieser Fragen führt zunächst zu den Mechanismen der Schadenbildung im Strassenbau und darüber hinaus zum Erkennen der Symptome, welche den Anlass für

eine Erhaltungsentscheidung bilden. Das Verständnis der Schadenmechanismen und der "Auslösersymptome" stellt den ersten Schritt in Prozess der Definition der in einem Pavement Management System benötigten Zustandsindikatoren dar. Bei diesem Prozess geht es auch darum, die bewährte Praxis in ein PMS einzubringen.

Im speziellen gibt es vier Gründe, warum ein Pavement Management System Zustandsindikatoren braucht:

- *Massnahmen auswählen und zuordnen*
- *Kosten berechnen*
- *den Zustand des Strassennetzes evaluieren*
- *und die Verwendung desselben Bewertungsmassstabes für den Vergleich einzelner Abschnitte/Strassen/Teilnetze.*

Die zur Verwendung kommenden Indizes müssen für mindestens eine der erwähnten Bestimmungen brauchbar sein, sonst sind sie unnötig und der entsprechende Erhebungsaufwand vollkommen nutzlos.

Unter Berücksichtigung der allgemeinen Ziele eines Pavement Management Systems kann die Verwendung von Indizes allgemein mit den folgenden Entscheidungselementen in Verbindung gebracht werden:

- *Darstellung eines Gesamtzustandes eines Abschnittes oder eines Strassennetzes,*
- *Bezeichnung von Qualitätsstufen,*
- *Wahl der richtigen Massnahme (Massnahmenwahl),*
- *Angabe eines Schwellenwertes, bei welchem bestimmte Massnahmen ausgelöst werden müssen,*
- *Verwendung als Verhaltensmodell,*
- *Darstellung der Verbesserung nach Durchführung der Massnahme und damit Möglichkeit der Definition eines Nutzens aus der durchgeführten Massnahme.*
- *und die Verwendung desselben Bewertungsmassstabes für den Vergleich einzelner Abschnitte/Strassen/Teilnetze.*

2.2 Vorarbeiten in der Schweiz

Die Thematik des Verhaltens von Strassen ist in der Schweiz in verschiedenen Projekten angesprochen worden, die man wie folgt einteilen könnte.

- Untersuchungen zur Feststellung des Verhaltens ohne direkte Ableitung von Verhaltensmodellen. Dazu zählen die Projekte:
- Langzeitbeobachtung ausgewählter Strassenabschnitte (ETHZ)
- Grossversuche (Rundlauf ETHZ, halle fosse EPFL)
- Beobachtungsstrecken, z.B. NE, VS (LAVOC, EPFL)
- Studien mit dem Ziel der Herleitung von Verhaltensmodellen
- Studien zur Vorgehensweise bei der Entwicklung von Verhaltensmodellen

Schliesslich können unter dem Titel "Vorarbeiten in der Schweiz" und aus der Sicht dieser Forschungsarbeit die auf kommunaler, kantonaler und nationaler Ebene durchgeführten netzweiten Zustandsaufnahmen zu nennen, welche die für einen empirischen Ansatz bei der Entwicklung von Verhaltensmodellen benötigten Daten liefern.

2.2.1 Langzeitbeobachtung ausgewählter Strassenabschnitte

Das Forschungsprojekt der Langzeitbeobachtung ausgewählter Strassenabschnitte dürfte eines der am längsten dauernden Forschungsprojekte sein, wurde es doch bereits Mitte der 60er Jahre des letzten Jahrhunderts in Angriff genommen und mit einem letzten Bericht im Jahre 1996 abgeschlossen (weitere Berichte dazu wurden, neben weiteren Publikationen in den Jahren 1973, 1976 und 1981 veröffentlicht).

Die systematische Beobachtung und Zustandsmessung verschiedener Abschnitte des Nationalstrassennetzes, ursprünglich mit der Absicht der Überprüfung der auf der Grundlage der Ergebnisse des AASHTO Strassentests aufbauenden Dimensionierungsnormen der VSS in Angriff genommen, hat eine Fülle von Daten erzeugt, die in verschiedenen weiteren Forschungsprojekten verwendet wurden. Bezüglich der ursprünglichen Absicht konnte festgestellt werden, dass ... *Die bisherigen Ergebnisse auf Strassen mit bituminösen Belägen und auf Strassen mit Betonbelägen im Allgemeinen ein gutes Verhalten der Oberbauten zeigen, d.h. die gemessenen Werte sind höher als die zu erwartenden (berechneten) Werte. Die zugrunde liegende Dimensionierungsmethode kann deshalb als generell zutreffend betrachtet werden mit vielleicht einer leichten Tendenz zur sicheren Seite.*

In anderen Worten: die Entwicklung der für die Bestimmung des Befahrbarkeitsindex massgebenden Parameter Längsebenheit, Spurrinnenbildung (nur bei Belägen mit bitumenhaltigen Schichten), Risse und Flickstellen ist von wenigen erklärbaren Ausnahmen abgesehen (Einbau verformungswilliger Beläge als – verfrühte – Reaktion auf die mangelnde Abriebfestigkeit gegenüber Spikesreifen und Folgen des übermässig heissen Sommers 1976) wesentlich langsamer erfolgt, als dies hätte erwartet werden können.

Eine zusätzliche Auswertung der im Rahmen dieses Auftrages erhobenen Daten erfolgte bei der Bearbeitung eines ersten Forschungsauftrages zum Thema Verhaltensmodelle.

2.2.2 Grossversuche (Rundlauf ETHZ, Halle fosse EPFL)

Die auf der Rundlaufanlage der ETH Zürich sowie mit dem ornièreur lourd der halle fosse der ETH Lausanne durchgeführten Forschungen hatten wie die Langzeitbeobachtung ebenfalls das primäre Ziel, die Grundlagen der Dimensionierungsnormen zu vertiefen. Dazu wurden die untersuchten Versuchsfelder periodisch bezüglich der Entwicklung ihres Zustandes gemessen und der daraus abgeleitete Verhaltenstrend als eine der Grundlagen für die Formulierung der Schlussfolgerungen bezüglich der Dimensionierung mitverwendet. Auch aus diesen Forschungsaufträgen konnten Daten für spezifische Untersuchungen zum Thema Verhaltensmodelle herangezogen werden.

2.2.3 Beobachtungsstrecken

Weitere Projekte, welche die periodischen Messung und Beobachtung einer Auswahl von Strecken betrafen wurden unter anderem in Kantonen Neuchâtel und Wallis (hier mit Beobachtungsmandat an das Institut LAVOC der ETH Lausanne) angelegt. Die Beobachtungsstrecken in Kanton Neuenburg [8] verfolgten gezielt den Zweck, Verhaltensgrundlagen für die dort pionierhaft realisierte erste PMS-Applikation in der

Schweiz zu gewinnen. Bei den im Kanton Wallis auf der N9 bei Sitten angelegten Versuchsstrecken ging es hingegen in erster Linie um den Langzeitvergleich unterschiedlicher modifizierter Bindemittel, welcher wiederum über die Erfassung verschiedener Zustandsparameter ermittelt wurde.

2.2.4 Forschungsarbeiten zum Thema Verhaltensmodelle

Modelle für bleibende Verformungen (FA 31/84, Teil 1)

Dieses Forschungsprojekt [1] gehörte zum ersten "Forschungspaket" der neuen VSS Kommission über das Management der Strassenerhaltung (Die Grundidee dazu wurde sogar vor der Konstituierung der Kommission in die Wege geleitet). Im Rahmen einer an der ETH Zürich durchgeführten Studie mit ausführlicher Literaturlauswertung und der Bearbeitung von Datensätzen aus der Langzeitbeobachtung und den Rundlaufversuchen wurden Vorschläge für die Entwicklung der Spurrinnenbildung erarbeitet, welche die Empfehlung zur Wahl der folgenden Gleichungsform enthielten:

$$T = A + B \log \text{Alter}$$

Wobei:

T = Spurtiefe in mm

A = eine Konstante, zeigt den Schnittpunkt der Geraden mit den y-Achse (T) an

B = eine (materialabhängige) Konstante, zeigt die Steigung der Geraden an

Alter = Alter der Deckschicht in Jahren

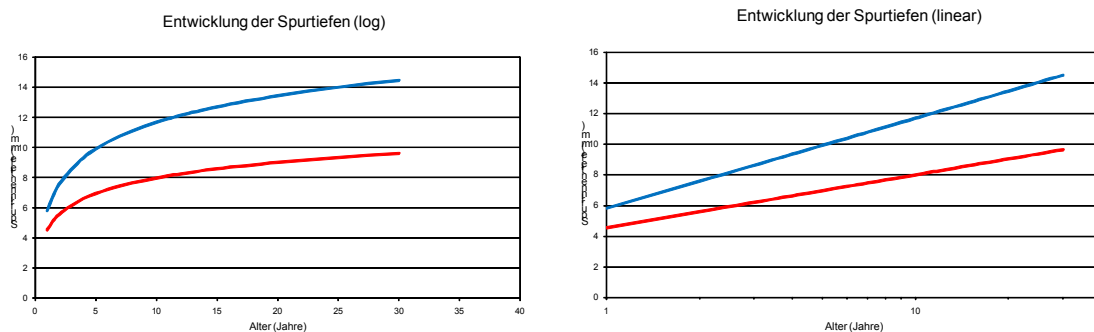


Abb. 1: genereller Verlauf der Modelle der Spurrinnenentwicklung im linearen und logarithmischen Massstab für die x-Achse (Alterskala).

Im linearen Massstab dargestellt (Abbildung 1), zeigt die oben erwähnte Gleichung eine Entwicklung der Spurtiefe mit einer starken anfänglichen Steigung, die dann mit der Zeit abflacht. Das gleiche Verhaltensmuster kann übrigens bei den für die Beurteilung des Verformungswiderstandes von bitumenhaltigen Belägen üblichen Kriechversuchen beobachtet werden.

Modelle für Betonbeläge (FA 31/84, Teil 2)

Der zweite im Rahmen des Forschungsauftrages 31/84 ausgearbeitete und veröffentlichte Bericht [3] befasst sich mit der Bildung eines Verhaltensmodells für den Befahrbarkeitswert von Betonbelägen, wobei im wesentlichen die Ebenheitskomponente berücksichtigt wird. Das Modell ist für unarmierte, verdübelte Betonplatten auf ungebundener Unterlage (Foundationsschicht aus Kiessand) gültig, wie sie auf den Autobahnen in der Schweiz gebaut wurden.

Die Ergebnisse dieser Studie beruhen auf die Auswertung wiederholter Messungen auf insgesamt 85 km der Nationalstrasse N1 in den Kantonen Aargau und Solothurn. Die untersuchten Abschnitte wiesen zum Teil ein unterschiedliches Alter und auch eine nach Fahrrichtung unterschiedliche Verkehrsbelastung auf.

Durch Zuordnung der entsprechenden Befahrbarkeitswerte und äquivalenten Verkehrslasten W auf den verschiedenen Abschnitten gelang es eine Verhaltenskurve herzuleiten, die mit einer einfachen Formel der folgenden Form dargestellt werden kann:

$$PSI = 4.5 - (0.01 \times W^{5.6} \times 10^{-6})$$

Wobei:

PSI = Befahrbarkeitswert (Max 5.0, Min. 0.0, Endbefahrbarkeit auf Autobahnen: 2.5)
 W = kumulierte äquivalente Verkehrsbelastung nach SN 640 321.

Entwicklung der Lastübertragung an den Fugen von Betonbelägen (FA 2001/501: Kombinierte Beläge)

Aufgrund früherer Voruntersuchungen des Verfassers wurde im Rahmen der Messungen und Auswertungen für den Forschungsauftrag Kombinierte Beläge [84] die zeitliche Veränderung des Lasttransfers unverdübelter Betonplatten auf ungebundener Unterlage vertieft untersucht. Dabei konnte ein deutlicher, linearer Zusammenhang zwischen dem mittels FWD-Messungen ermittelten Lasttransfer und der kumulierten äquivalenten Verkehrsbelastung gefunden werden (Abbildung 2).

Für eine konkrete praktische Anwendung wird empfohlen, grundsätzlich von einer linearen Beziehung zwischen Lastübertragung und kumulierter äquivalenter Verkehrslast auszugehen, eine Lastübertragung von 95% für neue Betondecken anzunehmen und damit direkt aufgrund der Lastübertragung im Zeitpunkt der Messung und eines Grenzwertes der Lastübertragung von 40 % (darüber hinaus ist mit einer deutlichen Stufenbildung mit Absätzen bis 20 mm zu rechnen) die Restnutzungsdauer zu bestimmen, wie dies in Abbildung 3 angedeutet wird.

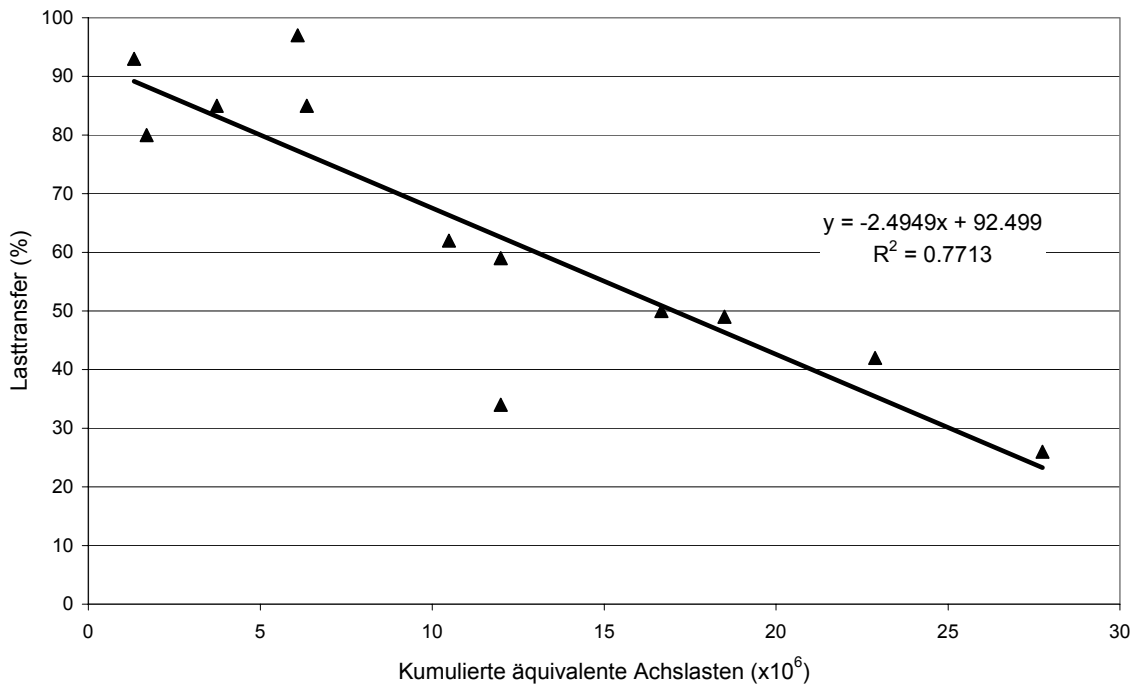


Abb. 2: Beziehung zwischen dem Lasttransfer zwischen aufeinander folgenden Betonplatten und der kumulierten äquivalenten Verkehrslast W

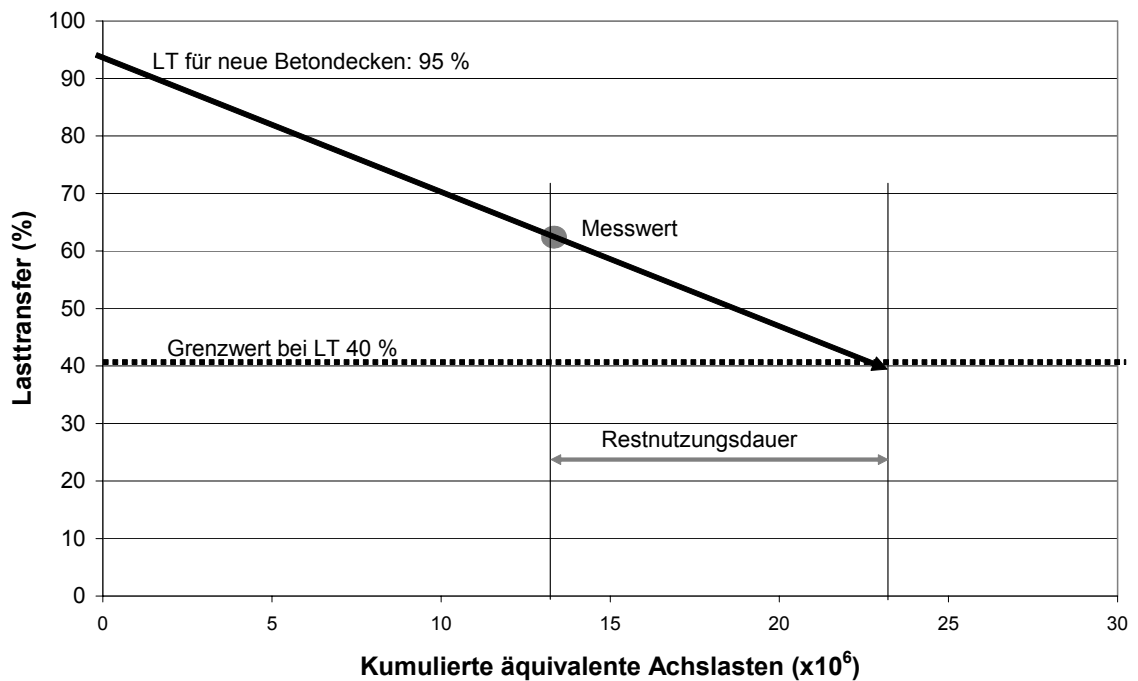


Abb. 3: Schematisches Vorgehen für die Bestimmung der Restnutzungsdauer in Abhängigkeit des Lasttransfers und der kumulierten äquivalenten Verkehrslast W

Entwicklung der Griffigkeit von Strassenbelägen verschiedener Strassentypen in der Schweiz (FA 11/96)

Die von ETH Zürich durchgeführten Untersuchungen [22] haben in Bezug auf die Herleitung eines Verhaltensmodells zu keinem konkreten Ergebnis geführt. Zum einen hat die Tatsache, dass eine Vielzahl der für die Auswertung verfügbaren Messwerte im Rahmen der Einbaukontrolle vor Verkehrsfreigabe gewonnen wurde bloss die allgemeine Erfahrung stützen können, dass sich die Griffigkeitsverhältnisse nach einer Anfangsphase infolge Abtragens des Bindemittelfilms auf dem Splitt verbessern und zum anderen wurden insgesamt, bei länger dauernden Beobachtungsperioden, relativ konstante Verhältnisse festgestellt, welche teilweise durch ansonsten nicht weiter begründete Schwankungen gewisse Unstetigkeiten aufweisen.

Analyse des modèles de comportement des Chaussées (FA 11/99)

Diese Forschungsarbeit [10] verfolgte im wesentlichen zwei Ziele:

- die Zusammenstellung und allfällige Ergänzung der in der Schweiz und im Ausland vorhandenen Verhaltensmodelle und
- die Ausarbeitung einer Methodik um die vorhandenen Wissenslücken auszufüllen

Im Bezug auf die erste Zielsetzung wurden die zum Zeitpunkt der Durchführung der Arbeit bekannten Grundlagen aus der Schweiz zusammengestellt (die in diesem Bericht in den Abschnitten 2.2.4 und 2.2.5 separat behandelt werden) sowie Auszüge aus den Vorschlägen und Zusammenstellungen der Ergebnisse der europäischen Forschungsprojekte COST 324 "Long Term performance of road pavements" [14] und PARIS (Performance Analysis of Road InfraStructure) [13].

Bei der Analyse einiger im Ausland angewendeten Modelle wird grundsätzlich die mögliche Übernahme für die Schweiz bejaht, allerdings unter Beachtung einer notwendiger Kalibrierung und der Überprüfung der genauen Definition der verwendeten Kenngrössen. Ebenso wird im Bericht auch darauf hingewiesen, dass viele der im Ausland entwickelten Modelle die Kenntnis vieler Detailinformationen voraussetzen, die im netzweiten praktischen Einsatz vielfach fehlen.

Die Vorschläge für die Vorgehensmethodik bei der Ausarbeitung zusätzlicher Modelle sind für ein empirisches Vorgehen, sei es mittels der Analyse von Zeitreihen von Daten ("méthode vidéo" gemäss Formulierung im Bericht), sei es mittels einmaliger Netzaufnahme und Möglichkeit der Zuordnung von Altersdaten ("méthode photo").

2.2.5 Weitere Untersuchungen zu Verhaltensmodellen**Verhaltensmodelle Spurrinnenbildung (Untersuchungen N13 GR)**

Eine erste Möglichkeit der praktischen Anwendung der im Rahmen von Forschungsauftrag 31/84 vorgeschlagenen Verhaltensmodellen für die Spurrinnenbildung hat sich im Rahmen der Auswertung von zwei Zeitserien von Zustandserfassungen auf der N 13 im Kanton Graubünden ergeben [2]. Dabei konnten auch genauere Angaben zur Art der gewählten Materialien für die Deckschicht berücksichtigt werden.

Die Darstellung aller Werte (Abbildung 4, oben links) zeigt eine recht grosse Streuung der Ergebnisse, welche unter anderem auch zwei Abschnitte mit Betonbelag umfasste (Alter 29 Jahre). Bei der separaten Betrachtung einer der am meisten verwendeten bitumenhaltigen Belagsart (Abbildung 4, oben rechts) ergab sich bereits eine starke Reduktion der Streuungen. Um die Zufälligkeiten aus der unterschiedlichen Abschnittslänge zu eliminieren wurden dann nach Länge gewichtete Mittelwerte pro Altersklasse gebildet und mit diesen Ergebnissen dann eine logarithmische Trendlinie gesucht (Abbildung 4, unten links und rechts).

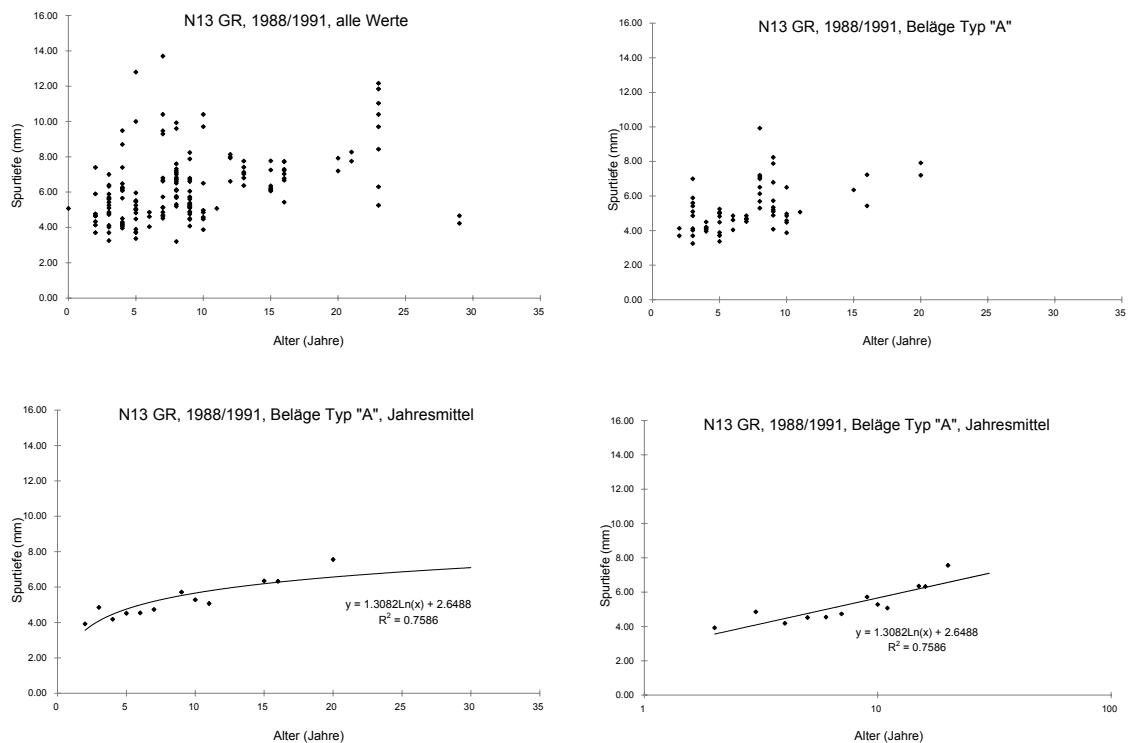


Abb. 4: Vorgehensschritte bei der Ausarbeitung eines Verhaltensmodelles

Verhaltensmodelle für Kantonsstrassen (Projekt PMS VS-NE)

Das Projekt PMS VS-NE stellte den ersten konkreten Schritt in Richtung PMS im Rahmen des STRADA-Projektes dar, die einerseits zum vereinfachten Ansatz einer Massnahmenzuordnung aufgrund des Zustandsbildes im Rahmen einer "approche exploratoire" führte (STRADA-PMS), andererseits aber zu einer von Koppelung STRADA mit dem Programm VIAPMS führte, was erst eine zielorientierte Massnahmenplanung im Rahmen einer Langzeitoptik ermöglichte. Dazu waren aber als Input Verhaltensmodelle notwendig.

Aufgrund der Auswertungen von Daten aus den Kantonen Wallis und Neuenburg wurden durch die Büros Ertec SA und Viagroup AG [6] nach Verhaltensmodellen für die Parameter Oberflächenschäden, Längsebenheit, Querebenheit, Griffigkeit und Tragfähigkeit gesucht.

Als Beispiel der Ergebnisse seien nachfolgend die aus Daten der N5 im Kanton Neuchâtel abgeleiteten Modelle aufgeführt (die genannten Indizes beziehen sich auf die Norm SN 640 925 von 1990):

$$\text{Index I1} = 5.3 - 0.13 \times \text{Alter}$$

$$\text{Index I3} = 0.552 \text{ Log}(\text{Alter}) + 4.1813$$

Für den Index I2 (Längsebenheit) haben die verfügbaren Daten zu keinem konkreten Ergebnis geführt. Die Schlussfolgerungen in Bezug auf die Indizes I4 (Griffigkeit, Messung mit dem Skiddometer) und I5 (Tragfähigkeit) aufgrund der ausgewerteten Daten waren die Annahme eines konstanten Verhaltens. Dies traf insbesondere für die Messergebnisse der Griffigkeit zu (siehe die Ergebnisse der Messreihen der 2 untersuchten Abschnitte in Abbildung 5), während dem die Tragfähigkeitswerte eher eine Verbesserung infolge Nachverdichtung und Konsolidation des Untergrundes anzeigten.

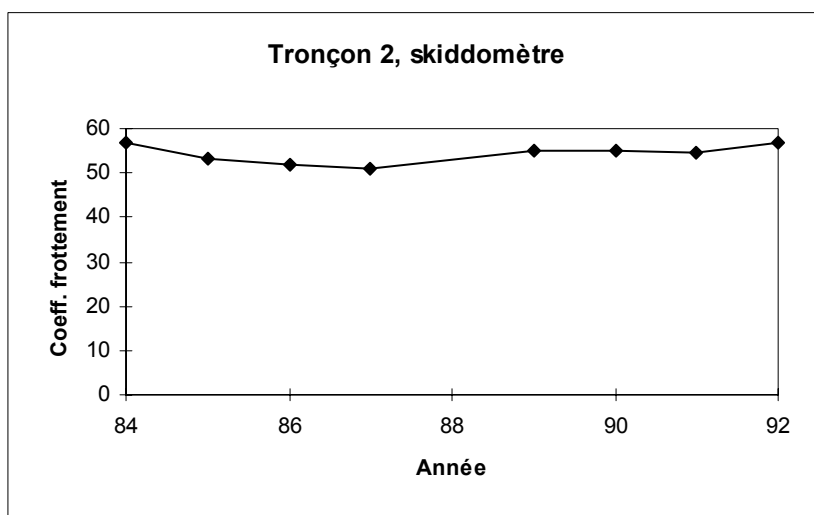
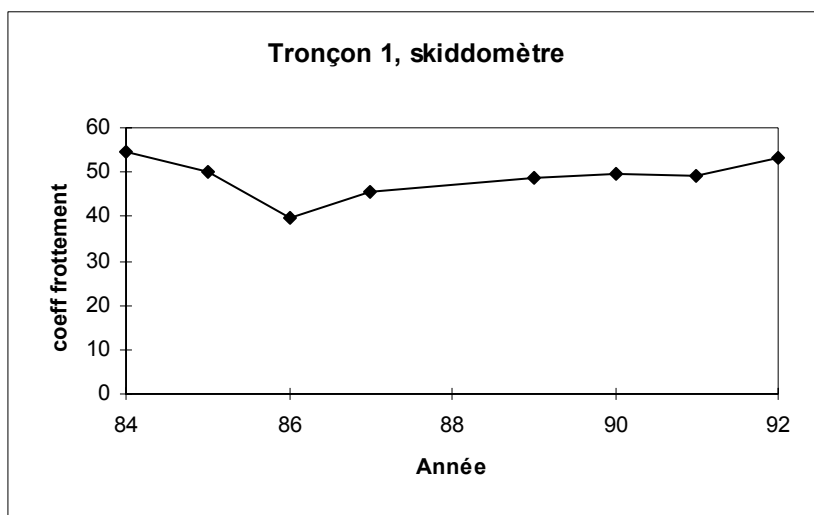


Abb. 5: Zeitlicher Verlauf der Griffigkeitswerte (Skiddometer, 80 km/h) auf zwei Beobachtungsabschnitten der N5 im Kanton Neuchâtel

Verhaltensmodell für den Index I1 (Ing. Büro B+S, Kanton Bern)

Das Büro B+S Ingenieur hat ein PMS-Modell für das Kantonsstrassennetz des Kantons Bern entwickelt, in welchem die Massnahmenplanung an die Entwicklung des Indexes der Oberflächenschäden I1 gekoppelt ist. Für diesen Index sind den auch aufgrund von Forschungsberichten von Blumer und eigenen Auswertungen Verhaltensmodelle für die Verkehrslastklassen nach SN 640 324 entwickelt worden. Die in Abbildung 6 dargestellten Modelle stellen die weiterentwickelte Version eines ursprünglich noch für die alte Werteskala gemäss SN 640 925a ausgearbeiteten Grundmodells.

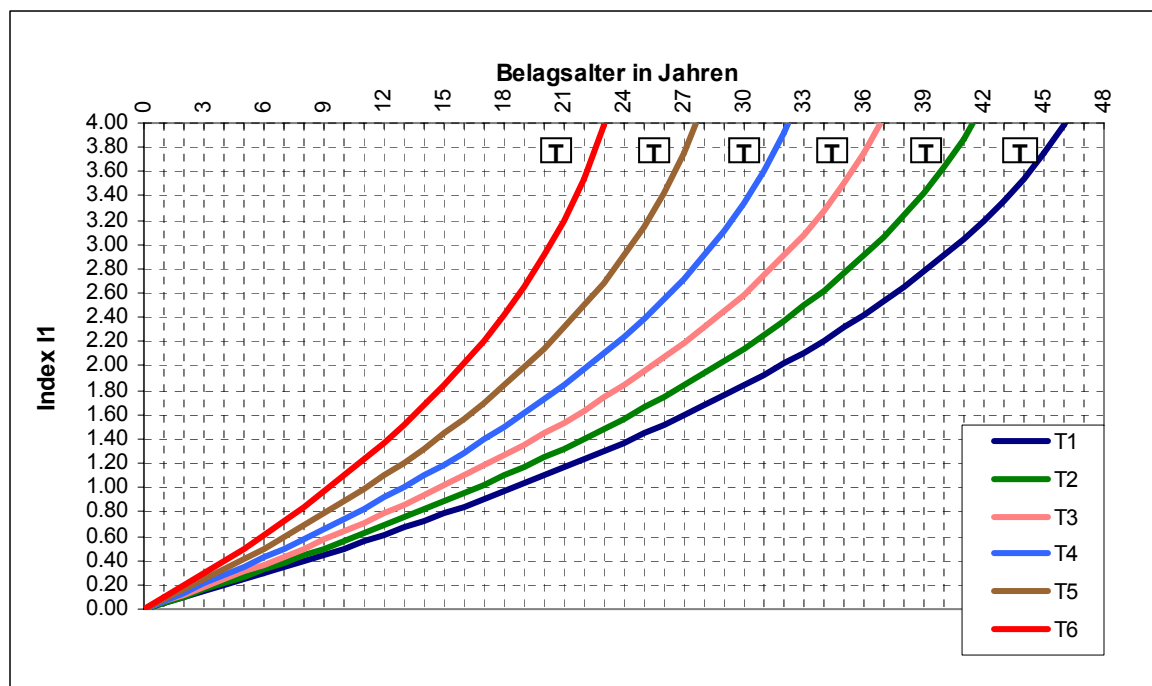


Abb. 6 : Verhaltensmodelle für den Index I1 gemäss Vorschlag für ein PMS-System für den Kanton Bern (BERNA-PMS, Verhaltensmodell für bituminöse Beläge, Ausgabe 2005)

Verhaltensmodelle Kantonsstrassen (NE, VS, SH)

Erste Ansätze zur Entwicklung von Verhaltensmodellen im konkreten Umfeld des Aufbaus eines Erhaltungsmanagementsystems für die Fahrbahnen (PMS) erfolgten im Zeitraum 1994 bis 1996 in Zusammenhang mit dem Aufbau eines PMS für Das Strassennetz des Kantons Neuchâtel [4]. Dabei wurde der Schon für die Auswertung der Entwicklung der Spurrinnenbildung auf der N 13 im Kanton Graubünden gewählte Ansatz verwendet, bei welchem jeweils pro Altersklasse ("Jahrgang") der Deckschichten ein nach der Abschnittslänge gewichteter Mittelwert gebildet wird. Die ausgearbeiteten Verhaltensmodelle Modelle sind linearer Natur für die Indizes I1 (Normfassung 1990) und I2 und logarithmischer Natur für den Index I3.

Im Rahmen des Aufbaus eines PMS-Konzeptes für die Strassennetze der Kantone Wallis [8] und Schaffhausen im Jahr 2003 konnte auf netzweit verfügbare Zustandsdaten zurückgegriffen werden, bei welchen allerdings keine Angaben zum Alter der Beläge vorhanden waren. Gleichzeitig ergab sich auch die Notwendigkeit Verhaltensmodelle für

die neu eingeführten Indizes IA1 bis IA5 (welche die Zuordnung von Massnahmen verfeinern) herzuleiten, wobei für alle Indizes ein neuer, vereinfachter Ansatz angewendet wurde, welcher auf folgende Annahmen beruht:

- die Lebensdauer der Beläge beträgt auf dem Kantonsstrassennetz 25 Jahre
- bei einem Belagsalter von 3 Jahren haben die Strassen noch einen Zustandwert entsprechend dem Neuzustand, bzw. einer Note von 0.5
- bei einem Alter von 12 Jahren, entsprechend der Hälfte der Gebrauchsdauer, haben die Strassen einen Indexwert entsprechend dem Mittelwert aller Werte (entsprechend dem 50%-Wert für die Summenkurve)
- bei einem Alter von 25 Jahren haben die Strassen einen Indexwert entsprechend dem 85%-Wert für die Summenkurve.

Abbildung 7 illustriert dieses Prinzip; gemäss diesem Beispiel hätte man bei 12 Jahren einen Indexwert von 1.0 und bei 25 Jahren einen solchen von 1.75.

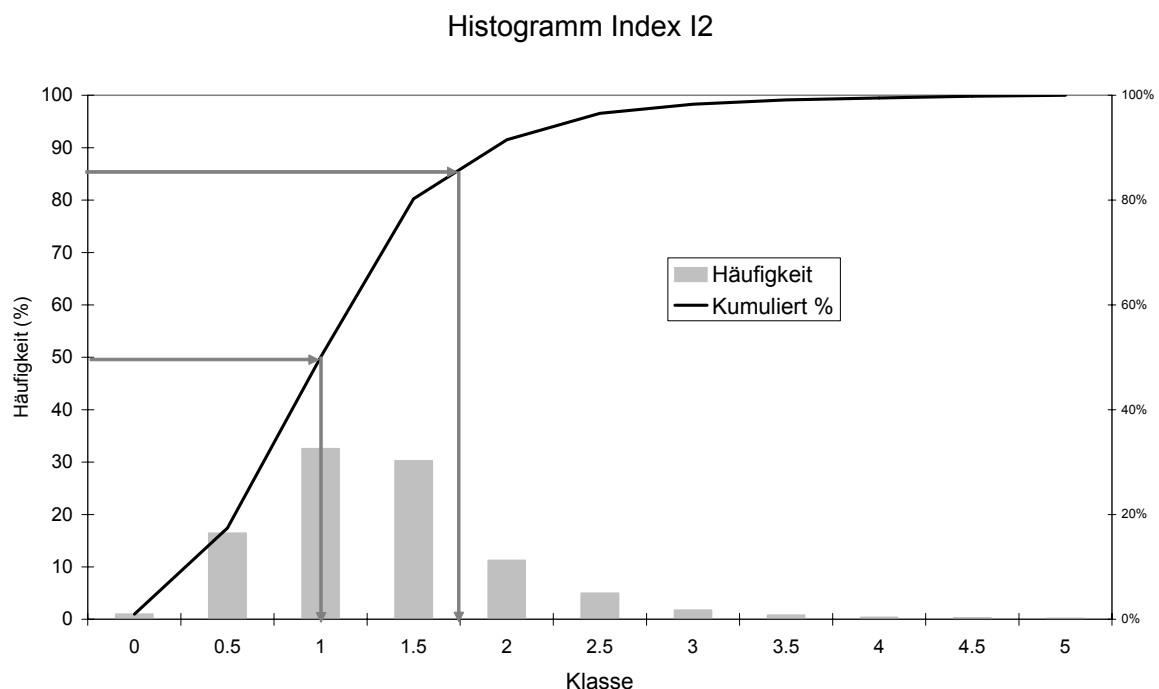


Abb. 7 : Schematische Darstellung des Vorgehens für die Herleitung der Werte für die Berechnung eines Verhaltensmodells für die Indizes I_{A1} bis I_{A5}, I2 und I3

Entsprechend den Erfahrungen bei ähnlicher Problemstellung auf einem anderen Strassennetz und ausgehend von der Tatsache, dass die Verkehrsverhältnisse, und teilweise auch der Aufbau, auf Hauptstrecken HS (als solche werden alle über-regionalen und regionalen Strassen verstanden) und auf Nebenstrecken NS (als solche werden alle lokalen Strassen verstanden) unterschiedlich sind und demnach zu anderen Verhaltenstrends führen kann, wurden die Auswertung separat für die genannten Strassenkategorien vorgenommen.

Die Auswertung aller nach dieser Vorgehensart bestimmten Werte hat die Ermittlung von Verhaltensmodellen mittels Regression ermöglicht, siehe Tabelle 1 und Beispiel in der folgenden Abbildung 8.

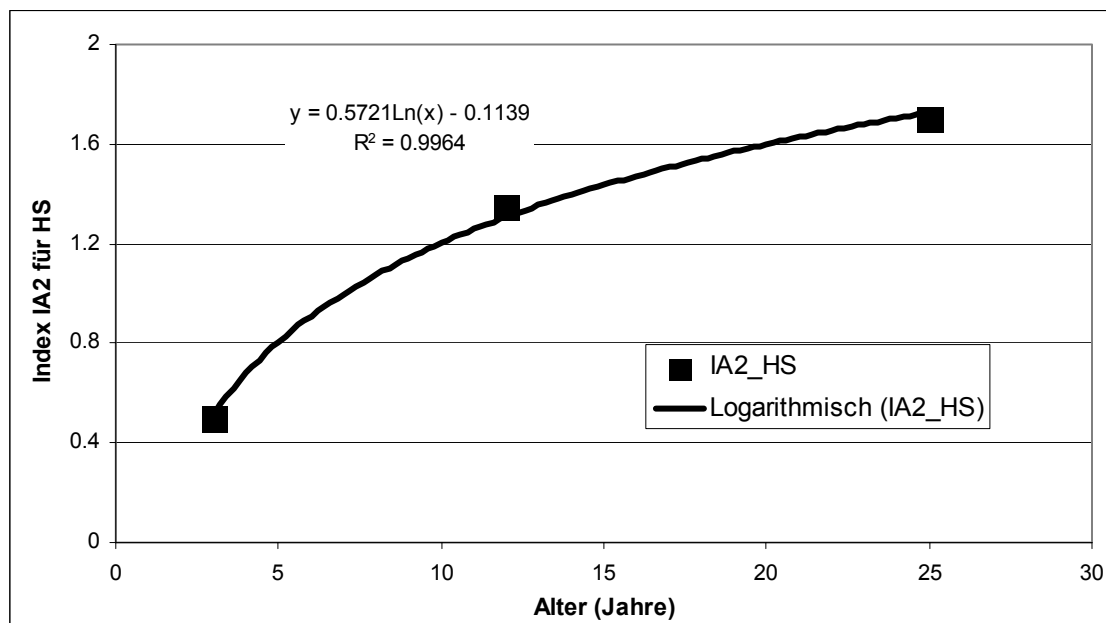


Abb. 8.: Regression für Index I_{A2} auf Hauptstrassen

Index	3 Jahre	12 Jahre	25 Jahre	Verhaltensmodell
I_{A1_HS}	5	4.4	1.6	$y = 0.4601\ln(x) - 0.4767$
I_{A1_NS}	5	4.05	3.55	$y = 0.8699\ln(x) - 0.9057$
I_{A2_HS}	5	4	3.2	$y = 0.5721\ln(x) - 0.1$
I_{A2_NS}	5	3.1	2.3	$y = 0.6131\ln(x) - 0.17$
I_{A3_HS}	5	3.75	2.75	$y = 0.0591x + 0.3227$
I_{A3_NS}	5	3.5	2.8	$y = 0.0545x + 0.3364$
I_{A4_HS}	5	4.15	3.25	$y = 0.3546\ln(x) - 0.3874$
I_{A4_NS}	5	3.6	2.4	$y = 0.3546\ln(x) - 0.3874$
$IA5_HS$	5	2.6	1.6	$y = 0.0807x - 0.3263$
$IA5_NS$	5	2.6	1.6	$y = 0.0796x - 0.2451$
$I2_HS$	5	2.6	1.6	$y = 0.0569x + 0.3249$
$I2_NS$	5	2.6	1.6	$y = 0.0656x + 0.3253$
$I3_HS$	5	2.6	1.6	$y = 0.6905\ln(x) - 0.299$
$I3_NS$	5	2.6	1.6	$y = 0.5944\ln(x) - 0.1977$

Tab. 1: Ausgangswerte und Verhaltensmodelle für alle Indizes

2.3 Folgerungen für die Organisation der Arbeit

2.3.1 Vorgehensmethodik

Viele der in diesem Kapitel vorgestellten Vorarbeiten aus der Schweiz haben gezeigt, dass ein empirisches Vorgehen mit der Gegenüberstellung von Zustands- und Altersdaten als ein gangbarer und vermutlich Erfolg versprechender Weg für die Entwicklung von Verhaltensmodellen betrachtet werden kann.

Seit Beginn der Arbeiten an der Thematik von Verhaltensmodellen in der Schweiz und der Einführung der Normen über die Zustandserfassung von Strassen hat die Menge an erhobenen Daten rasant zugenommen und die Einführung von Datenbanken hat auch die Erhebung und Speicherung zusätzlicher Informationen ermöglicht.

Die oben genannten Voraussetzungen sprechen für eine Weiterführung der bisherigen Arbeiten auf empirischer Grundlage; wobei dies die Berücksichtigung anderer Erkenntnisse nicht ausschliesst.

2.3.2 Datenaufbereitung

Erfahrungen bei der Datenanalyse zu Zwecken der Bildung von Verhaltensmodellen zu verschiedenen Zeitpunkten haben gezeigt, dass es von Vorteil ist, Verhaltensmodelle aufgrund der erhobenen Messgrössen und nicht aufgrund der daraus abgeleiteten Indexwerte zu bestimmen. Während die Erhebungsgrössen über die Zeit relativ konstant bleiben (vorbehältlich gerätespezifischer Grössen wie beispielsweise im Fall der Griffigkeitsmessungen), kann dies von den Indexwerten nicht behauptet werden. So wurde in der Schweiz bei aufeinander folgenden Normrevisionen nicht nur die Richtung der Bewertungsskala geändert sondern auch die Umwandlungskurven zwischen Messwert und Indexwert geändert.

Die praktische Anwendung von Verhaltensmodellen erfolgt im Rahmen der Erhaltungsplanung, bei welcher ein Strassennetz in einzelne "homogene" Erhaltungsabschnitte eingeteilt wird. Die Bestimmung der massgebenden Zustandswerte der Erhaltungsabschnitte (PMS-Objekte nach der im Umfeld von STRADA-DB üblichen Terminologie) erfolgt über eine Datenaggregation, bei welcher zum Mittelwert aller Einzelwerte im betreffenden Abschnitt die einfache Standardabweichung aller Einzelwerte hinzuaddiert wird. Dieses Vorgehen der Datenaggregation kommt auch im Rahmen der Auswertungen dieser Forschungsarbeit zur Anwendung, das heisst, dass die Eingangsgrösse für alle Modelle jeweils die aggregierten Abschnittswerte sind.

3. Auswertung der ausländischen Fachliteratur

3.1 Organisation der Auswertungsarbeit

Die Auswertung der internationalen Fachliteratur (Beiträge aus der Schweiz sind in Kapitel 2.2 Vorarbeiten in der Schweiz behandelt) erfolgt auf zwei verschiedenen Ebenen. Einerseits wird im Rahmen einer Auswertung aller Beiträge zum Thema Verhaltensmodelle aus bedeutenden internationalen Konferenzen zum Thema des Erhaltungsmanagements der Fahrbahnen ein Gesamtüberblick über die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Bezug auf Verhaltensmodelle gegeben, wobei unter anderem die verwendeten Ansätze und die tatsächlich angesprochenen Zustandsparameter interessieren. Ergänzend dazu werden in einer separaten Betrachtung auf einzelne Publikationen – unter anderem international anerkannte "Grundlagen" sowie neuere Untersuchungsergebnisse aus benachbarten Ländern – in vertiefter Weise eingegangen.

Den detaillierten Ausführungen zur Literatursauswertung werden noch einige Präzisierung zum Begriff des Verhaltens vorangestellt.

3.2 Begriffe: Verhalten (performance)

Der Begriff "pavement performance" auf Deutsch "Verhalten der Strassen", wurde erstmals in grösserem Umfang in Zusammenhang mit dem AASHO-Strassentest eingeführt. Im Rahmen der Entwicklung des "serviceability-performance"-Konzepts wurden erstmals gemessene Grössen verschiedener Zustandsparameter als Grundlage für die Quantifizierung des Zustandes (serviceability = Befahrbarkeit; damit wird ausgedrückt, wie gut eine Strasse dem Benutzer dienlich ist) angewendet. Die Veränderung des Zustandes im Verlaufe der Zeit, und unter der entsprechenden Verkehrsbelastung, wurde dann als Verhalten (performance) definiert.

3.3 Verhaltensmodelle als fixes Thema bei internationalen Konferenzen zum Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen

3.3.1 Gesamtüberblick

Um ein Gesamtüberblick über den weltweiten Stand der Kenntnisse im Bereich der Verhaltensmodelle zu erhalten und dabei das Risiko zu vermindern in der äusserst umfangreichen Bibliographie nicht zu verlieren (der Begriff "pavement performance" führt bei der Suche in Google zu 137'000 Hinweisen) wurde die Gesamtheit der Kongressbeiträge zu diesem Thema an den internationalen Tagungen zum Thema des Pavement oder Asset Managements ausgewertet. Die Auswertung umfasst die Konferenzen der "amerikanischen" Serie sowohl die seit dem Jahr 2000 neu angelaufene Serie europäischer Konferenzen zu diesem Thema. Im Detail sind es die folgenden Veranstaltungen, bei denen insgesamt 55 Beiträge die Verhaltensmodelle zum Hauptthema hatten.

"Internationale PMS-Konferenzen"

- Second North American Conference on Managing Pavements, Toronto, 1987 [22-31]
- Third International Conference on Managing Pavements, San Antonio, 1984 [32-37]

- Fourth International Conference on Managing Pavements, Durban, 1998 [17,38-43, 77]
- Fifth International Conference on Managing Pavements, Seattle, 2001 [44-52]
- Sixth International Conference on Managing Pavements, Brisbane, 2004 [69-76]

"Europäische PMS-Konferenzen"

- First European Pavement Management Systems Conference, Budapest, 2000 [53-63]
- Second European Pavement and Asset Management Conference, Berlin, 2004 [64-68]

Mit dieser "Querschnittsanalyse" war die Absicht verbunden, Erkenntnisse zu gewinnen über:

- die gewählten Ansätze für die Entwicklung und Formulierung von Verhaltensmodellen
- die Häufigkeit des Vorkommens verschiedener Zustandsparameter in den einzelnen Untersuchungen

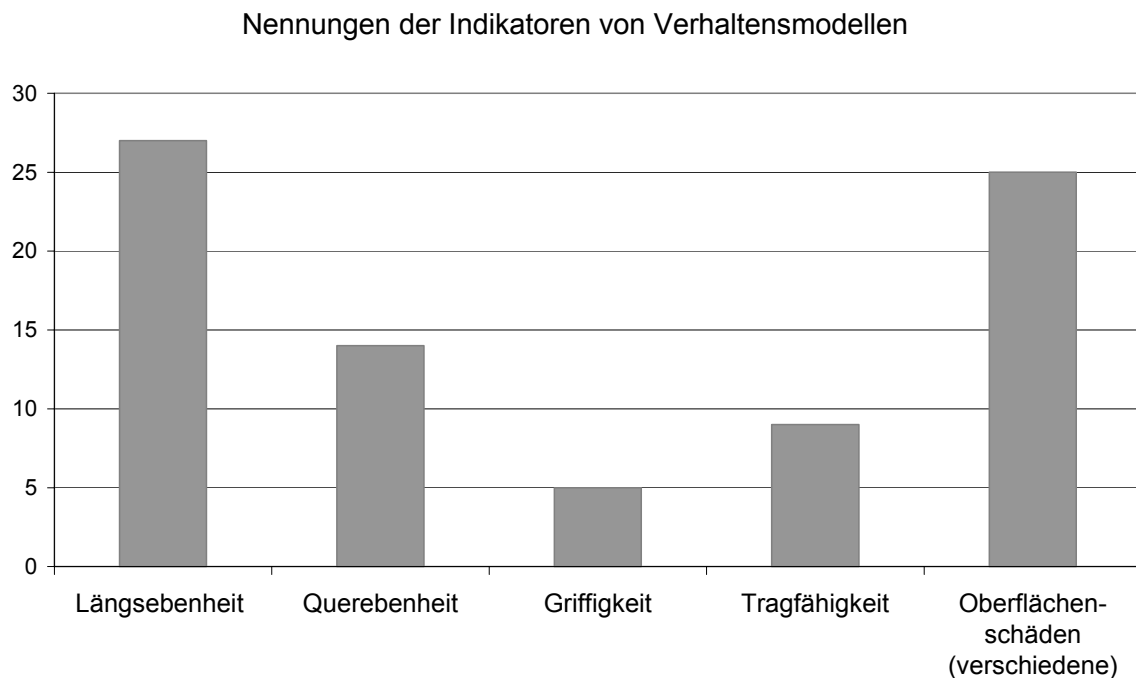


Abb. 9: Häufigkeit des Vorkommens von Zustandsparametern als Gegenstand der Entwicklung eines Verhaltensmodells aus der Auswertung der Kongressbeiträge internationaler Konferenzen zum Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (PMS)

Das in Abbildung 9 dargestellte Ergebnis der Auswertung aller Konferenzbeiträge zeigt, dass sich die Hälfte aller Publikationen mit der Längsebenheit befasst und dass diese der weitaus am häufigsten untersuchte Zustandsparameter ist. Die Gruppe der im Rahmen visueller Erhebungen erfassten Oberflächenschäden weist eine praktisch gleiche Häufigkeit auf, allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass aus Gründen einer vereinfachten Auswertung unter dem Begriff Oberflächenschäden eine ganze Auswahl einzelner Zustandsmerkmale enthalten ist, die für sich allein betrachtet, wesentlich geringere Häufigkeiten haben.

Abbildung 10 enthält die Ergebnisse der Auswertung der Literaturrecherche in Bezug auf die Art der gewählten Ansätze für die Entwicklung und Formulierung von Verhaltensmodellen. Wie aus der Abbildung hervorgeht, ist die Verwendung deterministischer Ansätze aufgrund von empirischen Daten die weitaus am meisten verwendete Lösung.

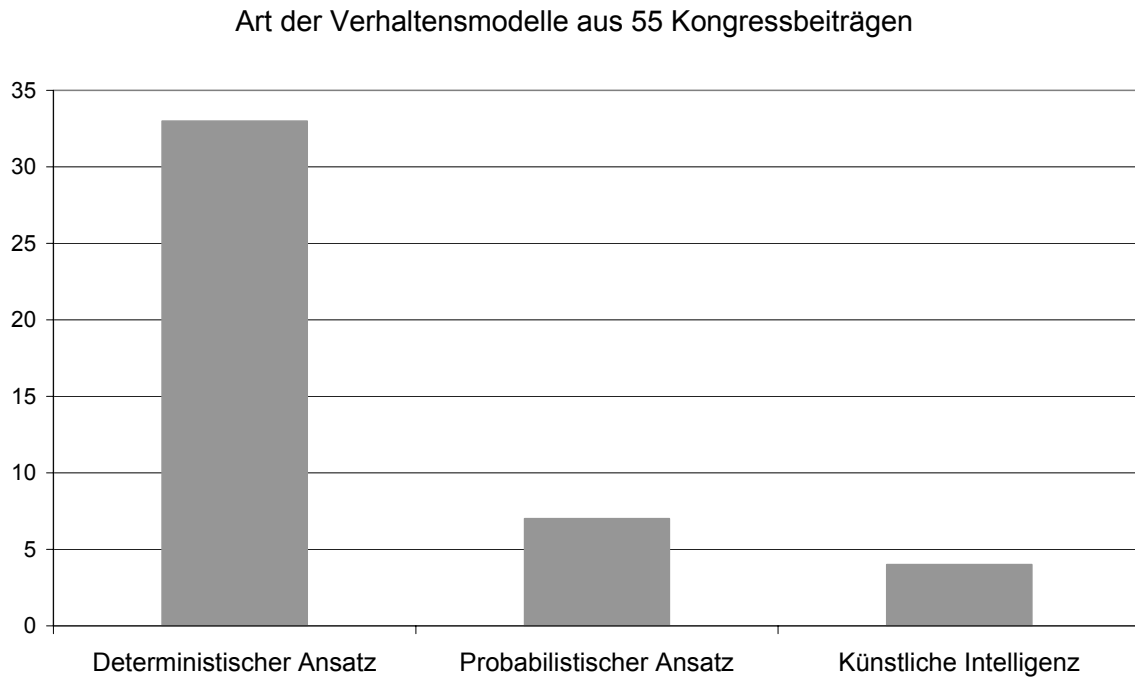


Abb. 10: Häufigkeit der Typologie von Verhaltensmodellen aus der Auswertung der Kongressbeiträge internationaler Konferenzen zum Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (PMS)

In den nachfolgenden Tabellen wurden aus einer Auswahl der ausgewerteten Publikationen die mittels Formeln oder zumindest mit der detaillierten Angabe der Einflussgrößen beschriebenen Modelle aufgelistet. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Methodik der Erhebung eines Messwertes je nach Quelle und eingesetztem Gerät ganz unterschiedlich ist, insbesondere auch der Bereich der normalerweise gemessenen Zahlenwerte.

3.3.2 Ergebnisse Längsebenheit

Quelle	Parameter	Modell	Bemerkungen
[27]	PSI	Ergänzung der AASHO-Formeln für den Befahrbarkeitswert mit Faktoren zur Berücksichtigung der Materialeigenschaften	
[29]	Längsebenheit	$C = C_0 \exp(\alpha \cdot 10^{-5} \times N)$	C: Längsebenheitswert C ₀ : Anfangswert α: Konstante N: Anzahl Achslasten (kum.)
[30]	PSR: Längsebenheit	$PSR = A - (B \times \text{Alter})$	A: Anfangswert B: Konstante
[32]	QI: Längsebenheit	QI = f(Alter, kumulierte Verkehrslast, Strukturkennzahl, Tragfähigkeit)	
[33]	R: Längsebenheit	R = f(Ausgangswert, Verkehrslast, Oberflächenzustand, Alter, Tragfähigkeit, Unterhaltsintensität)	
[36]	PSI, BI: Längsebenheit	$PSI = 12.5 - 4.25 \times \log BI$ $BI = (a \times \text{Alter}^2) + (b \times \text{Alter}) + c$	PSI: Indexwert Ebenheit BI: Messwert Ebenheit a, b, c: Konstanten
[39]	QI: Längsebenheit	$QI = 18.348 + 1.1635 \times \text{Alter}$	
[53]		$P = P_0 - 2e^{(a - b \times c^t)}$	P: Ebenheitsindex P ₀ : Anfangswert t = log (1/Alter) a, b, c: Konstanten

Tab. 2: Modelle für die Längsebenheit aus der Literaturlauswertung

3.3.3 Ergebnisse Querebenheit

Quelle	Parameter	Modell	Bemerkungen
[31]	Spurtiefe, Abrieb	Spurtiefe* = A + (B x DTV) *: Zunahme pro Jahr	A, B: Konstanten Modell für Spikesabrieb
[39]	Spurtiefe RD	$RD = 1.8228 + 0.2325 \times \text{Alter}$	
[40]	Spurtiefe RD	$RD = 1.44 \times 10^{-6} \times N^{0.2.3} \times \mu^{1.536}$	N: Anzahl Achslasten μ: Vertikalspannung auf den Untergrund

Tab. 3: Modelle für die Querebenheit (Spurrinnenbildung) aus der Literaturlauswertung

3.3.4 Ergebnisse Griffigkeit

Quelle	Parameter	Modell	Bemerkungen
[35]	Reibungswert	AC-Belag: $Y = -0.0026 \times \text{Alter} + 0.634$ SMA: $Y = -0.0035 \times \text{Alter} + 0.66229$	Alter in Monate
[45]	Seitenkraftreibung SFC	$SFC = -2.207^{-14} \times TC^2 - 4.330 \times 10^{-7} \times TC + SFC_0$	TC: Verkehrslast SFC ₀ : Anfangswert

Tab. 4: Griffigkeit aus der Literaturlauswertung

3.3.5 Ergebnisse Tragfähigkeit

Quelle	Parameter	Modell	Bemerkungen
[39]	Deflektion	$D = 24.288 + 3.5458 \times \text{Alter}$	Deflektion (Benkelman) in 1/100 mm

Tab. 5: Modelle für die Tragfähigkeit aus der Literaturlauswertung

3.3.6 Ergebnisse Oberflächenschäden

Unter dem Begriff Oberflächenschäden werden im folgenden verschiedene Kongressbeiträge behandelt die entweder einen oder mehrere Einzelmerkmale betreffen oder aber eine Kombination verschiedener Einzelmerkmale, analog dem Index I1 gemäss schweizerischer Praxis. Dabei ist allerdings auch zu beachten, dass ähnlich tönende Definitionen nicht immer das genau gleiche Schadenbild betreffen und dass die Verfahren für die Quantifizierung von Oberflächenschäden (in der Schweiz z.B. mit je 3-stufigen Bewertungen von Ausmass und Schwere) ebenfalls ganz unterschiedlich gehandhabt werden.

Quelle	Parameter	Modell	Bemerkungen
[24]	PCR Zusammen- gesetzter Index	$PCR = C - mA^B$	C: Konstante \approx Max. Wert A: Alter m: Konstante B: Konstante
[27]	PSI Befahrbar- keitswert	$PSI_{\text{Beton}} = 4..32 + BF + AF + JF - LF$	BF: Tragschichtfaktor AF: Faktor für Zuschlagstoffe JF: Faktor für Fugen LF: Faktor für Belastung
[30]	DISTRESS versch. Merkmale	$DISTRESS = e^{-K/\text{Alter}}$	K: merkmalsabhängiger Zunahmefaktor
[32]	Risse	Risse = f(Alter, kumulierte Verkehrslast, Tragfähigkeit)	
[33]	D: Ober- flächenschäden	D = f(Ausgangswert, Verkehrslast, Alter, Tragfähigkeit, Unterhaltsintensität)	
[38]	DISTRESS versch. Merkmale	$D = e^{-(k/\text{Alter})^{ab}}$	D: Schadenintensität zwischen 0 und 100 k, b: merkmalsabhängige Konstanten
[44]	Ermüdungs- risse F	F = f(kumul. Verkehrslast, Frosthebung, min. und max. Belagstemperaturen in der bit. Tragschicht)	

Tab. 6: Modelle für Oberflächenschäden aus der Literaturlauswertung

3.4 Auswertung von Einzelbeiträgen

3.4.1 Der AASHTO-Strassentest

Wenn im Rahmen dieser Literaturlauswertung auf den AASHTO Strassentest (oder auch: AASHTO-Strassentest gemäss der zur Zeit der Versuchsdurchführung gültigen Bezeichnung) hingewiesen wird, so geschieht dies weniger in Zusammenhang mit einem besonderen Verhaltensmodell, welcher sich für den praktischen Einsatz eignet, sondern vielmehr weil der AASHTO-Strassentest

- das Verhalten erstmals überhaupt definiert hat und
- aus den Versuchsergebnissen auch das erste Verhaltensmodell entwickelt wurde.

Die Definition des Verhaltens und einer entsprechenden Beurteilungsskala für die "Befahrbarkeit", die Umsetzung der Anwendung mittels eines "panel ratings" (subjektive Beurteilung durch einen repräsentativen Querschnitt aller Strassenbenutzer) und schliesslich die Korrelation der subjektiven Beurteilungen mit einer Kombination verschiedener Messgrössen sind wesentliche Ergebnisse des AASHTO-Strassentests, welche die ganze Entwicklung im Bereich der Strassenbauforschung nachhaltig beeinflusst haben.

Die allgemeinen aus den Versuchsergebnissen abgeleiteten mathematischen Modelle für die Dimensionierung des Strassenoberbaus sind eigentlich nichts anderes als eine Verhaltensmodell für den Befahrbarkeitswert, welcher das Kriterium für die Dimensionierung.

3.4.2 Die HDM-Modelle [11]

Die im Rahmen der ursprünglich von der Weltbank initiierten und in einer späteren Phase von der AIPCR weitergeführten Entwicklungsarbeiten von Verhaltensmodellen unter dem Oberbegriff HDM-Modelle (für: Highway Design and Maintenance) dürften weltweit die am meisten zitierten Modelle darstellen. Entsprechend dem eigentlichen Einsatzgebiet für Investitionsprojekte der Weltbank, beruhen die ursprünglichen Studien auf die typischen Verhältnisse von Entwicklungs- und Schwellenländer und die ersten Studien für die Modellbildung wurden aufgrund von Datenmaterial aus Brasilien, Indien und Kenia durchgeführt. Für die Verwendung der Ursprungsmodelle unter anderen geographischen, klimatischen und wirtschaftlichen Bedingungen wird eine lokale "Kalibrierung" der Modelle empfohlen. Dazu sind detaillierte Vorgehenshinweise vorhanden.

Die Tiefe der Untersuchungen bei der Modellentwicklung beruht auch auf eine sehr umfassende Berücksichtigung einer Vielzahl von Einflussparametern, insbesondere über detailliert erhobene Eigenschaften der verwendeten Materialien und des Untergrundes. Daraus haben sich Modelle ergeben, welche einerseits sehr komplex sind und andererseits eine sehr grosse Menge an Detailinformationen (Daten) benötigen, um überhaupt angewendet werden zu können. Dies stellt eines der hauptsächlichen Probleme bei der praktischen Umsetzung der aus dem HDM-Projekt hervorgegangenen Verhaltensmodelle dar.

Die Komplexität und der Bedarf an Detailinformationen der HDM-Modelle wird durch das in Abbildung 11 dargestellte Beispiel des Modells für die Zunahme der Unebenheiten, gemessen an der Änderung des IRI-Indexes, dargestellt.

$$\Delta RI_t = 134 e^{0.023 t} SNCK^{-5.0} \Delta NE_4 + 0.114 \Delta RDS + 0.0066 \Delta CRX + 0.010 \Delta PAT + Z_{pot} + 0.023 RI_t \Delta t$$

ΔRI_t = increase in roughness over time period t, m/km IRI;
 RI_t = roughness at time t, m/km IRI;
 ΔRDS = increase in rut depth standard deviation of both wheelpaths, mm
 ΔCRX = increase in indexed area of cracking, %,
 ΔPAT = increase in area of surface patching, %,
 Δt = incremental time period of analysis, years;
 ΔNE_4 = incremental number of equivalent axle loads in period Δt , million ESA/lane;
 $SNCK = 1 + SNC - 0.0000758 H CRX$;
 SNC = modified structural number of pavement strength;
 t = age of pavement or overlay (yrs);
 H = thickness of cracked layer, mm; and
 CRX = area of cracking, %;
 Z_{pot} = dummy intercepts estimated for sections with potholing.

Abb. 11: Beispiel eines Modells für die Progression der Längsebenheit aus den Arbeiten für die HDM-Modelle [11]

3.4.3 Europäische Forschungsprojekte

COST Aktion 354: Long Term Performance of Road Pavements [14]

Im Rahmen dieser mit Beteiligung der Schweiz durchgeführten COST-Aktion wurde eine Zusammenstellung der vorhandenen europäischen Studien zum Thema der Verhaltensmodelle ausgearbeitet, in welcher sowohl die Programme der Langzeitbeobachtung verschiedener Länder als auch verschiedene mathematische Modelle behandelt werden und eine Analyse der berücksichtigten Einflussfaktoren erfolgte.

Im Hinblick auf die möglichen Vorteile der Verwendung vergleichbarer Grundlagen in allen europäischen Ländern befasste die die Arbeitsgruppe auch mit der Methodik der Zustandserfassung und formulierte Vorschläge für ein einheitliches Vorgehen.

EU-Forschungsprogramm PARIS: Performance Analysis of Road Infrastructure [13]

Das EU-Forschungsprogramm PARIS folgte praktisch unmittelbar auf die COST-Aktion 324 und wurde durch eine ähnliche Gruppierung von Forschungsinstituten durchgeführt (so war die Schweiz in beiden Fällen durch das LAVOC der EPFL vertreten).

Im Rahmen dieses Projektes wurden zunächst Daten aus einer sehr grossen Zahl von Beobachtungsstrecken aber auch aus Grossversuchen (Rundlauf und ähnliche Anlagen) vereinheitlicht, zusammengetragen und in einer gemeinsamen Datenbank gespeichert, um durch deren Analyse Verhaltensmodelle für Strassen entwickeln zu können.

Die Hauptarbeiten haben sich auf die Modellierung der Rissentwicklung konzentriert, wobei diese Entwicklung in zwei unterschiedliche Phasen getrennt wird:

- Die Phase der Entstehung der Risse
- Die Phase der Ausbreitung der Risse

Dies Modelle wurden in der Schlussphase des Projektes mit Hilfe von unabhängigen Datensätzen aus einigen teilnehmenden Instituten überprüft und kalibriert.

Der Schlussbericht zum Forschungsauftrag "Analyse des modèles de comportement des chaussées (FA 11/99)" [10] enthält ebenfalls einen Auszug aus der Liste der Modelle, die im Rahmen von PARIS untersucht wurden.

3.4.4 Deutsche Untersuchungen

Katalogisierung von beschreibenden Grössen für das Gebrauchsverhalten von Fahrbahnbefestigungen und die Wirkung von Erhaltungsmassnahmen (Hinsch, Krause, Maerschalk, Rübensam) [78]

Dieser im Jahre 2005 als Heft 915 der Reihe der Berichte Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik erschienene Bericht stellt die Ergebnisse der Auswertungen von insgesamt drei Zeitreihen der netzweiten Zustandserfassung auf den Bundesautobahnen in Deutschland dar.

Bei den im Bericht enthaltenen Auswertungen der Zustandsgrössen für die 100-m-ZEB-Auswertungsabschnitte konnten zusätzlich zu den erhobenen Zustandsdaten auch Angaben über die Bauweise, den Fahrstreifen, die Art der Deck- und der Tragschicht, die Längsneigung, die Bemessung und die Verkehrsbelastung berücksichtigt werden, um "verhaltenshomogene" Gruppen für die Auswertung zu bilden. Dabei hat sich die Anzahl kumulierter Übergänge äquivalenter 10-t-Einheitsachsen als massgeblicher quantitativer Einflussfaktor erwiesen.

Die mit Hilfe von Regressionsanalysen bestimmten Verhaltensfunktionen (Verhaltenskurven) werden für die praktische Anwendung als Funktion der kumulierten Achsübergänge dargestellt und nach folgenden weiteren Kriterien aufgeschlüsselt:

- **Fahrstreifen:** es wird unterschieden zwischen dem FS1 (erster Fahrstreifen = rechter Fahrstreifen) und FSR (übrige Fahrstreifen = alle übrigen Fahrstreifen). Dabei wird in den Diagrammen des Berichtes den "übrigen Fahrstreifen FSR" jeweils die gleiche kumulierte Anzahl Achsübergänge zugeordnet wie auf dem rechten Fahrstreifen, was streng genommen nicht korrekt und für eine direkte Übertragung der Ergebnisse nicht anwendbar ist.
- **Verhaltenshomogene Gruppen:** unter diesem Stichwort ist in erster Linie die Gruppierung der Strecken primär nach Belagsart (Asphalt- und Betonstrassen) und

sekundär bei den Asphaltstrassen die Art der Deckschicht, z.T. auch der Tragschicht zu verstehen (z.B. Asphaltbeton, Dünnschichtbeläge, Gussasphalt, Splittmastix).

Ähnliche Gruppierungen wurden auch für die Untersuchungen bezüglich der Rücksetzwerte vorgenommen, bei welchen in erster Linie die Anfangswerte nach durchgeführter Massnahme ermittelt wurden.

Die untersuchten Zustandsgrössen sind:

- Unebenheitsmass AUN
- Längsebenheitswirkindex LWI
- Spurrinntiefe SPT, bzw. Querunebenheiten SPT
- Griffigkeit GRI
- Netzrisse NRI
- Flickstellen FLI
- Längs-/Querrisse LQR
- Eckabbrüche EAB
- Kantenschäden KAS

Aus der Sicht einer möglichen Übertragbarkeit der Ergebnisse der deutschen Studie auf schweizerische Verhältnisse ist darauf hinzuweisen

- dass in der deutschen Studie ausschliesslich Autobahnen ausgewertet wurden
- dass viele der untersuchten Zustandsgrössen von den in der Norm SN 640 925b berücksichtigten Zustandsparametern abweichen.

Unter diesen Umständen ist eine Übertragung der Ergebnisse nur für Autobahnen und für folgende Zustandsgrössen an sich möglich:

- Spurrinntiefe: Die Ergebnisse der Messung der Spurrinntiefe bei der ZEB auf den deutschen Autobahnen können direkt mit den Werten in der Schweiz verglichen werden.
- Griffigkeit: die deutschen Untersuchungen beruhen auf die Messung der Reibungskraft mit dem schräg gestellten Messrad (SCRIM-Gerät). Dieses Messgerät wurde in der Schweiz für die netzweite Zustandserfassung auf den Nationalstrassen im Jahre 2001 eingesetzt sowie auf ausgewählten Kantonsstrassenabschnitten. Für den Vergleich zwischen den Ergebnissen der Griffigkeitsmessung mit dem SCRIM und dem Skiddometer (bzw. dem Stuttgarter Reibungsmesser SRM) – dem Referenzgerät für die Beurteilung der Griffigkeit nach den Normen der VSS – liegen aufgrund von Vergleichsmessungen einzelne Übertragungsfunktionen vor, welche jedoch aufgrund des unterschiedlichen Messprinzips und besonderer Bedingungen bei der Kurvenfahrt und bei der Messung in Gegenwart von Spurrinnen mit Vorsicht anzuwenden sind.

Beim Vergleich der Verhaltensmodelle ist allerdings zu beachten, dass bei der deutschen Forschungsarbeit jeweils die Einzelwerte der 100-m-Messabschnitte als Grundlage für die Regressionsrechnungen verwendet wurden. Im Gegensatz dazu wird bei den Auswertungen die im vorliegenden Bericht beschreiben werden jeweils der aggregierte Wert (Mittelwert + einfache Standardabweichung) des homogenen Abschnitts berücksichtigt

Entwicklung der Oberflächeneigenschaften auf der Versuchsstrecke Bamberg A 70 (Huschek) [79]

Diese an der TU Berlin durchgeführte langjährige Forschungsarbeit befasst sich in erster Linie mit der zeitlichen Entwicklung der Griffigkeitswerte, zum Teil auch mit der zeitlichen Entwicklung des Rollgeräusches. Im Rahmen eines Forschungsauftrages konnten auf einer Teilstrecke der Autobahn A70 insgesamt 21 Versuchsfelder eingebaut werden mit einerseits einer Variation der Art der Deckschicht (Asphaltbeton und Splittmastix) und andererseits, innerhalb der gewählten Arten von Deckschichten, einer Variation der Korngrösse und der Gesteinsart (Petrographie und Provenienz des Splittes und teilweise auch der Sandfraktion).

Die erfassten Parameter der Griffigkeit waren:

- Reibungsbeiwert mit dem SCRIM-Gerät
- Reibungsbeiwert mit dem Stuttgarter Reibungsmesser
- Texturtiefe nach der profilometrischen Methode (Laser-Abtastung)
- Texturtiefe nach der Sandfleckmethode und dem Ausflussmesser

Innerhalb der Beobachtungsperiode von 10 Jahren konnten die Messungen insgesamt 10-mal wiederholt werden; die Anfangsmessungen fanden 6 Wochen nach Verkehrseröffnung statt.

Für das Verhaltensmodell der Griffigkeit werden zwei Funktionen vorgeschlagen, eine "Potenzfunktion" und eine logarithmische Funktion.

Potenzfunktion: $\mu_{SRM 80} = c \cdot (t + 1)^b$

Logarithmusfunktion: $\mu_{SRM 80} = a \cdot \ln(t + 1) + d$

wobei :

c bzw. d: Anfangswert der Griffigkeit

b bzw. a: Kennwert für die Griffigkeitsentwicklung

b bzw. a > 0 Zunahme

b bzw. a = 0 gleich bleibend

b bzw. a < 0 Abnahme

t = Liegedauer unter Verkehr [Jahre]

In beiden Modellen wird die Verkehrsbelastung indirekt über das Alter der Strecken berücksichtigt. Damit sind die Ergebnisse in erster Linie für die an der betrachteten Strecke gegebenen Verkehrsverhältnisse (DTV, Anteil Schwerverkehr) gültig. In Kenntnis der entsprechenden Werte können aber auch Modelle mit einer direkten Berücksichtigung der Verkehrsbelastung berechnet werden.

Der deutliche Unterschied in den Ergebnissen für den rechten und den linken Fahrstreifen (siehe auch Kapitel 9) weist im Übrigen sehr deutlich auf die massgebende Wirkung des Schwerverkehrs bezüglich der Griffigkeitsentwicklung hin.

3.4.5 Arbeiten aus Österreich

Bei der zügig durchgeführten Implementierung eines Pavement Management Systems für die Österreichische Autobahnverwaltung, bzw. der dafür zuständigen Gesellschaft ASFINAG mussten auch entsprechende Verhaltensmodelle bereitgestellt werden. Die entsprechende Arbeit, bei welcher sich das Ergebnis auf die Autobahnen bezieht, erfolgte im Rahmen der Dissertation von A. Weninger-Vicudyl [16] an der TU Wien in welcher neben eigenen Recherchen auch die Ergebnisse weiterer Untersuchungen [13, 46] mitberücksichtigt wurden. Die Arbeit befasst sich mit Verhaltensmodellen für die folgenden Zustandsgrößen:

- Risse
- Oberflächenschäden
- Spurrinnen
- Griffigkeit
- Längsebenheit (International Roughness Index IRI)

Wegen unterschiedlichen Definitionen der betrachteten Zustandsgrößen und einer teilweise ungenügenden Menge an Auswertungsdaten (Griffigkeit) ist einzig das Modell für die Spurrinnenbildung für einen Vergleich mit der Schweiz von Interesse.

Das Modell für die Spurrinnenbildung entspricht der folgenden Formel:

$$\text{Spurtiefe } T = \text{Alter}^{0.999} \cdot \text{VB}^{-0.0619} \cdot \text{NLWk}^{0.0685}$$

wobei:

Alter: Alter der Oberbaukonstruktion in Jahren

VB : Verkehrsbelastungskoeffizient (Verhältnis zwischen zulässigen und vorhandenen Normlastwechsel)

NLWk: kumulierte Normlastwechsel (10 t) in 100'000

Ein besonderes Merkmal dieses Modells ist die Tatsache, dass sowohl das Alter (und dieses in massgebender Art und Weise) als auch die kumulierte Verkehrsbelastung direkt in das Modell hinein fließen, währenddem andere auf dem Alter aufbauende Modelle verschiedene Kurven je nach Verkehrslastklasse anbieten.

4. Schadensprozesse

4.1 Schadenbildung und Dimensionierungskriterien

4.1.1 Schadenbildung

Die Verkehrsbelastung führt in der Regel und vereinfacht ausgedrückt zu zwei verschiedenen Grundformen von Schäden: der Rissbildung infolge Ermüdung oder den bleibenden Deformationen (z.B.: Spurrinnenbildung). Die Rissbildung kann alle bituminös oder hydraulisch gebundenen Schichten des Oberbaus betreffen, währenddem die bleibende Deformation sowohl gebundene als auch ungebundene Materialien des Oberbaus und des Untergrundes betrifft.

Risse infolge Ermüdung entstehen meist an der Unterseite der gebundenen Schichten (wo die Zugbeanspruchung am grössten ist) und wandern mit der Zeit an die Oberfläche. Der Zeitpunkt der Rissentstehung ist abhängig vom Ermüdungsverhalten der Materialien und von der Grösse der vorkommenden Lasten. So gesehen kann man die gebundenen Schichten des Strassenoberbaus ähnlich betrachten wie andere Baumaterialien, z.B. Stahl, bei denen die Berücksichtigung des Ermüdungsverhaltens (Wöhler-Kurve) seit langem üblich ist. Im Rahmen experimenteller Arbeiten sind auch für die im Strassenbau gebräuchlichen Materialien die entsprechenden Ermüdungskurven entwickelt worden, wie sie in den Abbildungen 12a und 12b schematisch dargestellt sind.

Die Wirkung eines Belastungskollektivs wird dabei nach der Hypothese von Miner (M. A. Miner, Cumulative damage in fatigue, Journal of applied mechanics, Vol. 12, Nr. 3, 1945) berücksichtigt. Diese Hypothese besagt, dass ein Ermüdungsbruch dann eintritt, wenn die Summe aller Quotienten aus vorhandener und zulässiger Anzahl Belastungswiederholungen (n) für jede (i) Belastungsgrösse und jeden Belastungszustand (Temperatureinfluss auf die Kennwerte und das Verhalten der Materialien) den Wert 1 erreicht, d.h. wenn

$$\sum \frac{n_i \text{ vorh}}{n_i \text{ zul}} = 1$$

Dabei vermögen diese Ermüdungsgesetze zunächst nur die Berechnung, bzw. Voraussage des Zeitpunktes der Rissentstehung. Zusätzliche Untersuchungen sind durchgeführt worden, um einerseits noch die Zeitspanne für das Durchschlagen von Rissen zu berechnen und andererseits, was für den praktischen Gebrauch einer Methode mehr interessiert, die zeitliche Dauer bis das ganze Rissbild auf einer Strasse dermassen fortgeschritten ist, dass die Integrität des Oberbaus nicht mehr gegeben ist (Ende der Gebrauchsdauer).

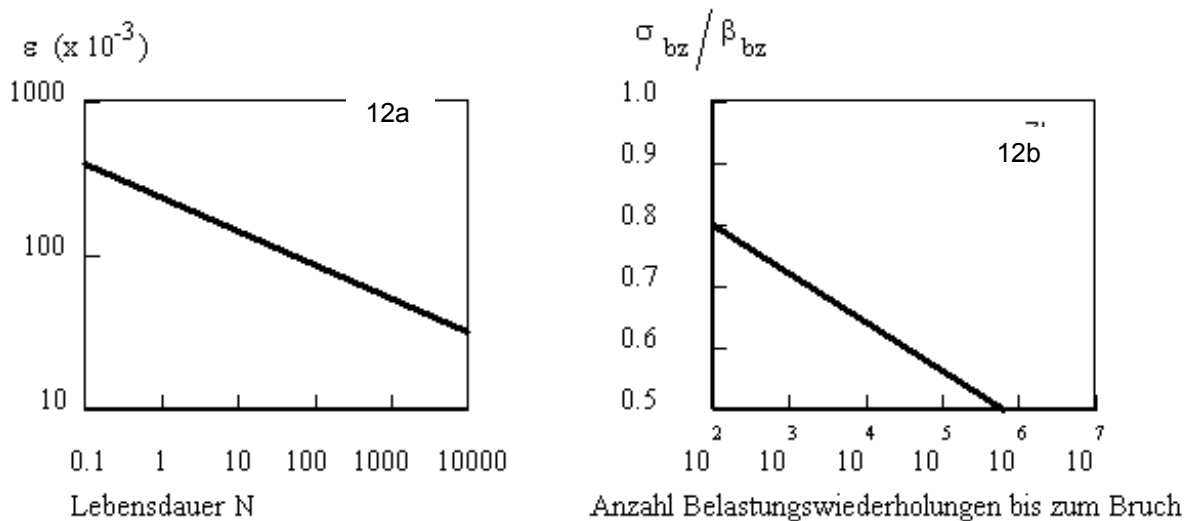


Abb. 12: Ermüdungskurven für bituminös gebundene Materialien (12a) und für Betonbeläge (12b, gemäss: R.G. Packard, Design of Concrete Airport Pavements, PCA, Skokie 1973). Bei bituminös gebundenen Schichten wird die max. Dehnung ε an der Schichtunterseite berücksichtigt, bei Betonbelägen das Verhältnis von Biegezugspannung σ_{bz} zur Biegezugfestigkeit β_{bz} .

Wie erwähnt ist die Situation bezüglich der bleibenden Verformung etwas komplizierter, da verschiedene Schichten und Materialien zur Schadenbildung beitragen und zudem noch der Qualität der Ausführung (Verdichtung aller Schichten) eine grössere Bedeutung zukommt. Ähnlich wie im Falle der Ermüdung sind jedoch auch Beziehungen entwickelt worden zwischen der vertikalen Belastung oder der vertikalen Deformation auf dem Untergrund und der Anzahl Lastwechsel. Bleiben die Bedingungen unter der Begrenzungslinie, so kann eine unzulässige, vom Untergrund herrührende Deformation ausgeschlossen werden. Untersuchungen zum Verhalten bituminös gebundener Schichten, insbesondere bezüglich deren Kriechverhalten, haben ebenfalls zur Entwicklung von Modellen für die Voraussage der Spurrinnenentwicklung aufgrund der Belastungen, der Temperaturen und der Materialeigenschaften geführt.

4.1.2 Dimensionierungskriterien

- Bruch- und Deformationskriterien

Gemäss den oben geschilderten Schadenformen werden bei rechnerischen Dimensionierungsmethoden gewisse "kritische" oder zulässige Werte der Zugdehnung, bzw. Biegezugspannung an der Unterseite gebundener Schichten oder aber die Vertikalbeanspruchung auf den Untergrund als Dimensionierungskriterium, in anderen Worten als Berechnungsgrundlage verwendet. Bei bituminös gebundenen Materialien kann zudem die Schichtdicke in Abhängigkeit der Materialeigenschaften bezüglich eines bestimmten Masses an zulässiger bleibender Deformation bemessen werden. Nur wenige Verfahren ermöglichen eine eigentliche "gebrauchsdauerbezogene" Berechnung, d.h. die Berücksichtigung der Tatsache, dass Schäden ein recht fortgeschrittenes Ausmass erreichen müssen, bevor von einem Ende der Gebrauchsdauer gesprochen werden kann. Beim Eintreten des ersten Risses (die Anzahl Belastungswiederholungen bis zum diesem Zeitpunkt ist das Ergebnis der meisten Berechnungen) ist eine Strasse meist noch in

einem recht guten Zustand und noch weit davon entfernt, eine Oberbauerneuerung oder gar Oberbauverstärkung zu benötigen.

- Verhaltenskriterien

Das Verhalten von Strassen ist das typische Schadenkriterium bei empirisch begründeten Dimensionierungsmethoden, wie z.B. der vom AASHO-Strassentest abgeleiteten (auf diese Grundlage stützt sich im wesentlichen auch die in den VSS-Normen beschriebene Dimensionierungsmethode). Hier wird dabei das Verhalten als die Änderung des Befahrbarkeitswertes im Verlaufe der Gebrauchsdauer bezeichnet. Der Befahrbarkeitswert ist eine dimensionslose Kennziffer (ein Index), welche die Fähigkeit einer Strasse den ihr zugewiesenen Zweck zu erfüllen ausdrückt. Dieser Wert umfasst im Normalfall den Einfluss der Verformung der Oberfläche als auch das Vorhandensein anderer Schäden und Flickstellen. In vielen vereinfachten Anwendungen wird unter Befahrbarkeit nur eine Kennziffer des Fahrkomforts verstanden. Bei Anwendung solcher Dimensionierungskriterien ergeben sich dann unterschiedliche Materialdicken bei gleicher Verkehrsbelastung, gleichen klimatisch/hydrologischen Bedingungen und gleichem Untergrund aufgrund eines unterschiedlich festgelegten "Endbefahrbarkeitswertes" (eine solche Regelung, abgestuft nach Verkehrslastklassen, wird auch in den Dimensionierungsnormen der VSS angewendet).

4.2 Schäden infolge Verkehrsbelastung (Ermüdung, Verformung und Abrieb)

Die Einwirkung von Verkehrslasten kann auf verschiedene Art und weise das Verhalten der Strassen beeinflussen und insbesondere auch die Entwicklungsrate der der Schadenzunahme beschleunigen.

Das Gewicht der normal rollenden Verkehrslasten wirkt folgendermassen auf die Schadenbildung aus:

Auf bituminös gebundene Schichten:

- Nachverdichtung der Schichten, begleitet von eventuellen Verformungen
- Ermüdungswirkung infolge wiederholter Biegezugspannungen an der Unterseite der gebundenen Schichten, in verstärktem Masse bei Schichtgrenzen ohne Verbund.
- Bleibende Verformungen der bituminös gebunden Schichten, mit verstärkter Wirkung bei kanalisiertem Verkehr und hohen Temperaturen
- Polierwirkung auf die Zuschlagstoffe an der Oberfläche
- Abrieb der Oberfläche

Auf hydraulisch gebundene Tragschichten:

- Ermüdungswirkung infolge wiederholter Biegezugspannungen an der Unterseite der hydraulisch gebundenen Schichten
- Förderung der Loslösung von Mineralstoffe beidseitig der Schwindrisse und des Durchschlagens der Risse

Auf ungebundene Schichten und den Untergrund:

- Nachverdichtung der Schichten, begleitet von eventuellen Verformungen
- Auslösen von Setzungen bei wenig tragfähigem Untergrund mit folgenden Nachgeben der darüber liegenden Schichten

- Pumperscheinungen (Auswaschen der Feinstbestandteile) infolge Vibrationen bei Wasseranreicherung in der Foundationsschicht und im Untergrund

Bei langsamen (Kriechspuren) und ruhenden Lasten (Parkfelder) kommen folgende Faktoren hinzu:

- Erhöhte Dauer der Lasteinwirkung mit Zunahme der Beanspruchung und Auftreten von Kriechverformungen
- Verstärkte Wirkung bezüglich Verformungen in allen Schichten

Die dynamische Belastungskomponente (Verhältnis von dynamischer zu statischer Lasteinwirkung) wirkt sich wie folgt aus:

- Verstärkung der Beanspruchung bezüglich Ermüdung (Gesetz der 4ten Potenz)
- Verstärkung der Beanspruchung bezüglich plastischer Verformung

An gewissen Stellen, insbesondere bei Haltelinien, ist auch mit höherer horizontaler Lasteinwirkung zu rechnen. Die entsprechenden Folgen sind:

- Schubverformungen an der Belagsoberfläche
- Erhöhte Schub-Beanspruchung tiefer liegender Schichtgrenzen

Der Abrieb sowie mehr oder weniger starke Materialverluste können auch durch mechanische Einwirkungen auftreten, so z.B.

- Extrem starker Abrieb (Spurbildung) als Folge der Verwendung von Spikesreifen
- Erhöhter Abrieb infolge Verwendung von Schneeketten
- Kratzspuren aller Art und Herauslösen bereits geschwächter Oberflächenbereiche durch Schneepflüge, Schneefräsen, usw.

4.3 Schäden unabhängig von Verkehrsbelastung

Für verschiedene Schäden, insbesondere für die Einzelmerkmale der Gruppe Belagschäden (Index I_{A2}) ist der primäre Schadenauslöser von der Verkehrslast unabhängig (auch wenn diese dann die Wirkung verstärken kann). Dementsprechend treten diese Schäden auf der gesamten Strassenfläche auf, nicht nur in den Radspuren. Nachfolgend werden die wichtigsten Faktoren und Ihre Folgen aufgelistet.

Alterung und Versprödung der Bindemittel

- Erhöhte Neigung zur Rissbildung bei tiefen Temperaturen
- Reduktion der Haftung der Bindemittel an die Zuschlagstoffe und Materialverluste

Klimaeinflüsse (Extrembedingungen kalt, warm)

- Frosthebungen mit temporärer Verformung und dauerhafter Rissbildung
- Tragfähigkeitsverluste beim Auftauen
- Verminderung der Widerstandsfähigkeit auf bleibende Verformungen bei hohen Temperaturen
- Erhöhung der Anfälligkeit auf die Rissbildung infolge Temperaturbedingter Spannungen bei tiefen Temperaturen

Niederschläge und Wasserinfiltrationen

- Wasseranreicherungen in Foundationsschicht und Untergrund verstärken die Folgen möglicher Frosthebungen

- Wasser im Belag kann zu einer Reduktion der Haftung zwischen Bindemittel und Gestein führen und ermöglicht das Herauslösen von Splittkörner und die Bildung von Schlaglöchern
- Wasserinfiltrationen können die Schichthaftung schwächen. Insbesondere ist auch beim Einbau von Belagsüberzügen auf die Dampfbildung infolge vorhandener Feuchtigkeit in unteren Schichten zu achten (auch wenn die Oberfläche trocken erscheint) welche das Erzielen eines korrekten Schichtverbundes verunmöglicht.

Chemische Prozesse.

- Die bereits erwähnte Alterung und Versprödung der Bindemittel ist an sich die Folge eines chemischen Prozesses.
- In die gleiche Kategorie kann teilweise auch die Wirkung von Meteorwasser betrachtet werden, welche Ausmagerungen und das Absanden begünstigt.
- Als chemischer Prozess ist auch das Schwinden hydraulisch gebundener Fundations- und Tragschichten zu nennen. Die entsprechende Rissbildung schlägt mit der Zeit durch die darüber liegenden Schichten hindurch.

Stabilität der Hänge und Dämme und setzungsempfindlicher Untergrund

- Bei unstabilen Hängen – vor allem bei Strassen in Hanglage – können Setzungen auftreten die sich jeweils durch die Bildung kreisbogenähnlicher Risse ankündigen
- Setzungen sind auch bei Strassen zu erwarten die auf empfindlichem Baugrund liegen
- Eine erhöhte Anfälligkeit für Setzungen besteht auch bei Hinterfüllungen von talseitigen Stützmauern für Strassen in Hanglage, dies wegen vielfach ungenügender Verdichtung.

4.4 Kombination beider Verursacher

Die in den vorangehenden Abschnitten beschriebenen belastungsabhängigen und belastungsunabhängigen Einflussfaktoren wirken gleichzeitig auf den Strassenoberbau. Dadurch können diese Faktoren einander stark beeinflussen, was sich in einer erhöhten Zunahmerate der Schäden bei ungünstiger Kombination verschiedener Faktoren äussert.

4.5 Schäden infolge Einbaufehler und Materialmängel

Die nachfolgenden Ausführungen zur Thematik der Einbaufehler und Materialmängel stellen eine Ergänzung der vorstehenden Beschreibung des "normalen" Verlaufs der Schadenbildung auf Strassen. Die daraus entstehenden kurzfristigen Folgen lassen sich kaum mit Hilfe von Verhaltensmodellen vorhersagen, sie stellen aber dennoch eine zwar unerwünschte aber tatsächlich vorhandene Realität des Strassenbaus dar. Abbildung 13 verdeutlicht diese Tatsachen.

Das Bewusstsein um diese Problematik hat denn auch bei der Datenanalyse für die Entwicklung von Verhaltensmodellen dazugeführt, dass in einem "Ausreisserfilter" diejenigen Fälle aus der Auswertung genommen wurden, bei denen offensichtlich ein Einbau- oder Materialfehler vorliegt und nicht ein "natürliches" Verhalten der betreffenden Strecke.

N2 TI: rechter Fahrstreifen, Alter bei zweiter Massnahme

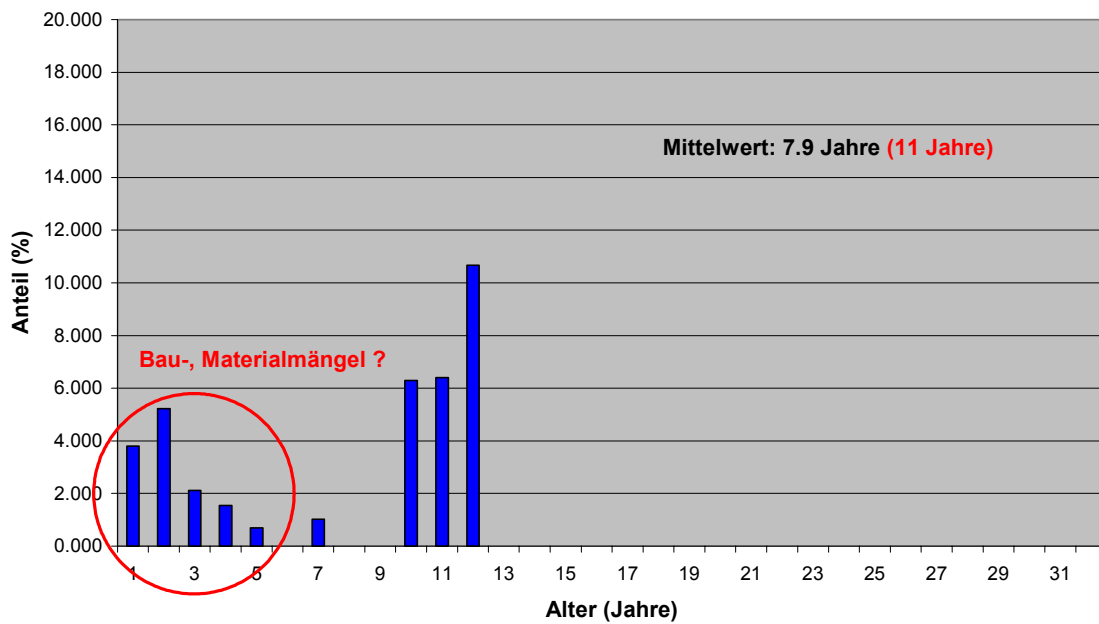


Abb. 13: Belagsalter (Deckschichten) bei der zweiten Massnahme auf dem rechten Fahrstreifen (totale Länge der 2. Massnahmen: 37.8 Fahrstreifen-km) aus Untersuchungen in der Periode 1969-2000 auf der N2, TI.

4.5.1 Einbaufehler

In die Kategorie der Einbaufehler können folgende Ausführungsmängel eingeteilt werden:

- Ungenügende Verdichtung
- Mangelnde Ebenheit
- Verbundmängel

Die Auswirkung dieser Einbaufehler auf das Verhalten der Strassen ist in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Einbaufehler	Folgen kurzfristig	Folgen langfristig
Ungenügende Verdichtung (alle Schichten)	Örtliche Setzungen und Unebenheiten	Unregelmässige Setzungen, schlechte Ebenheit
Mangelnde Ebenheit	ungenügender Fahrkomfort	Verstärkung der dynamischen Lasteinwirkung
Verbundmängel	keine	Rissbildung infolge erhöhter Beanspruchung an der Schichtgrenze, Ablösungen

Tab. 7: Kurz- und langfristige Folgen von Einbaumängeln auf das Verhalten von Strassen

4.5.2 Materialmängel

Materialmängel können grundsätzliche sämtliche Schichten betreffen und auch den Untergrund umfassen. Bei letzterem steht jedoch in erster Linie eine ungenügende Materialuntersuchung in Vordergrund sowie das Ausbleiben von entsprechenden Korrekturmaßnahmen. Die folgende Tabelle fasst die wesentlichen Mängel und ihre kurz- und langfristigen Folgen zusammen.

Material	Folgen kurzfristig	Folgen langfristig
Unterbau/Untergrund		
ungebundene Foundationsschichten, Kornverteilung	Anfälligkeit auf Frostschäden	Frosthebungen
hydraulisch gebundene Foundationsschichten, falsche Dosierung	verstärkte Bildung von Schwindrissen	Steigerung der Anzahl Reflektionsrisse
bituminös gebundene Foundationsschichten, falsche Dosierung	je nach Mangel Verstärkung der Neigung zu Verformung oder Rissbildung (Ermüdung)	Verformungen oder von unten durchschlagende Risse
bituminöse Beläge		
Bindemittelüberschuss	Überfettete Stellen mit geringer Griffigkeit	Verformungsanfälligkeit, langsamer Abbau des Bindemittelfilms an der Oberfläche
Bindemittel zu hart	Frühe Rissbildung bei extrem tiefen Temperaturen	Rissbildung
Bindemittel zu weich	Frühe Verformung bei hohen Temperaturen	Spurrinnenbildung
Ungenügende Haftung	Rissbildung, Kornablösungen	Rissbildung, Kornablösungen
Splitt mit ungenügendem Polierwiderstand	Beschleunigter Verlust der Mikrotextur	Ungenügende Griffigkeit
Splitt mit ungenügender Härte	gebrochene Splitte	Kornablösungen

Tab. 8: Kurz- und langfristige Folgen von Materialmängeln auf das Verhalten von Strassen

5. Verhaltensmodelle: Merkmalsgruppen der visuellen Zustandserfassung

5.1 Vorbemerkungen zur Zuverlässigkeit der erhobenen Zustandsdaten

Die visuelle Zustandserfassung gemäss Norm SN 640 925b und dem dazugehörigen Schadenkatalog stellt eine Aufnahmemethode dar, bei welcher für verschiedene Merkmale jeweils Ausmass und Schwere des Schadens mittels je drei Bewertungsstufen erfasst werden. Diese Methodik beinhaltet drei verschiedene Arbeitsschritte bei welchen die subjektive Beurteilung des Beobachters eine Rolle spielt. Es sind dies:

- Die korrekte Beurteilung des Schadenausmasses nach den Stufe: kein Schaden, lokale Schäden (> 10% der betrachteten Fläche oder Länge), häufige Schäden (10 bis 50 % der betrachteten Fläche oder Länge) und durchgehend vorhanden Schäden (>50 % der betrachteten Fläche oder Länge)
- Die korrekte Zuordnung der beobachteten Schäden zu einer der im Schadenkatalog definierten Merkmalen und Merkmalsgruppen
- Die korrekte Erfassung der Schwere der Schäden

Dass unter den oben genannten Voraussetzungen und Randbedingungen in der Praxis Probleme mit der Genauigkeit und der Zuverlässigkeit der erhobenen Daten kann nicht weiter erstaunen. Erste konkrete Hinweise auf diese Problematik ergaben sich bereits anlässlich einer nationalen Schulung mit praktischer Übung auf abgesperrter Fläche der Nationalstrasse N2 im Kanton Luzern.

Trotz der erwähnten grossen Diskrepanz in den Beurteilungsergebnissen durch Fachleute verschiedener Kantonsverwaltungen, wurde die erste vom Bund koordinierte netzweite Zustandserfassung des ganzen Nationalstrassennetzes in den Jahren 1998 und 1999 dezentral durchgeführt. Anlässlich der Analyse der Ergebnisse der Zustandserfassung und Bewertung der Nationalstrassen 1999-2002 durch das Institut IVT der ETH Zürich wurden die Probleme bezüglich der Vergleichbarkeit der Datensätze denn auch sichtbar. Im entsprechenden Bericht [18] finden sich Aussagen wie:

- *Die dabei erhobenen Daten sind nicht ganz homogen und zu einem nicht unerheblichen Teil nicht auswertbar*
- *Da 21.7 % der erhobenen Werte nicht ausgewertet werden konnten, Messstrecken fehlten und zur Aufbereitung einheitlicher und vergleichbarer Daten teilweise Veränderungen vorgenommen werden mussten, wird auf eine detaillierte Wertung und Beurteilung der Ergebnisse verzichtet.*

Mit der Problematik der Vergleichbarkeit der durch verschiedene Beobachter erhobenen Zustandsdaten in Bezug auf die Oberflächenschäden befasste sich auch eine Vergleichsstudie der Dienststelle für Nationalstrassen des Kantons Vaud [82]. Dabei wurde nach Norm SN 640 925a (Grobaufnahme) der Oberflächenzustand auf 10 Fahrbahnabschnitten aus den Nationalstrassen N1, N5 und N9 mit Längen von jeweils 500 m oder einem km durch drei verschiedene Aufnahmeteams mittels Beobachtung aus langsam fahrenden Fahrzeugen, bzw. zu Fuss erfasst. Eine weitere Variante mit der Büroauswertung von Videoaufnahmen der Strassenoberfläche konnte wegen mangelnder Verfügbarkeit des entsprechenden Messwagens nicht überprüft werden.

Die Auswertung der zum Teil stark divergierenden Ergebnisse hat gezeigt, dass sich die Ursachen der Streuungen auf verschiedene Ursachen zurückführen lassen, so z.B.;

- Unterschiedliche Interpretation der Zuordnung von vergossenen Rissen
- Falsche Zuordnung von Schadenbildern (Verwechslung "Wilde Risse" mit "Netzrisse", "Längsrisse" und "Wilde Risse")
- Unterschiedliche Bewertung der Gruppe "Oberflächenglätte". Hier stellt die visuelle Beurteilung des Merkmals "Polieren" den Beobachter vor unlösbaren Problemen, während überfettete Stellen und/oder Bindemittelanreicherungen eher eindeutiger erkennbar sind. Je nach Ansprechen auf das eine oder andere Merkmal ergeben sich auch Differenzen bezüglich der Bewertung des Ausmasses

5.2 Vorgehen

5.2.1 Aufteilung nach Strassenkategorien

Für die Durchführung der Forschungsarbeit standen Daten aus dem Nationalstrassennetz und dem Kantonsstrassennetz (verschiedene Kantone, nachfolgend mit den Buchstaben A bis D gekennzeichnet) zur Verfügung. Vereinzelt sind auch die Daten einiger Gemeinden verfügbar.

Die im Rahmen des Zusatzauftrages 2004/716 der Forschungsstelle übermittelten Daten aus den Zustandsaufnahmen der Stadt Genf konnten aus den nachstehend aufgeführten Gründen für die weitere Bearbeitung nicht berücksichtigt werden.

- Die Datei mit den Ergebnissen der visuellen Schadenaufnahme enthält die Indexwerte I1, separat nach aufgenommenen Fahrstreifen. Angaben über Ausmass und Schwere der verschiedenen Hauptgruppen sind nicht verfügbar.
- Die erste Serie von Zustandserhebungen wurde im Jahr 1995 durchgeführt (gültige Norm: SN 640 925), die zweite Serie im Jahr 2005 (SN 640 925a/1997, SN 640 925b/2003). Die Normen und die Methodik (Gruppenbildung) für die Indexberechnung sind verschieden und ein direkter Vergleich nicht möglich. Die wesentliche Änderung der Gewichtung und der Hauptgruppeneinteilung erfolgte 1997 beim Übergang SN 640 925/SN 640 925a.
- Entsprechend dem allgemeinen Vorgehen für die vorliegende Forschungsarbeit, bei welcher bewusst und prinzipiell darauf verzichtet wurde, Verhaltensmodelle für zusammengesetzte Indizes (und der Index I1 ist ein zusammengesetzter Index) zu entwickeln, und die Entwicklung der Modelle auf Schadenfamilien wie beispielsweise die Hauptgruppen von Schäden nach SN 640 925b zu beziehen, können die Daten aus dem Strassennetz der Stadt Genf in der erhaltenen Form für den beabsichtigten Zweck der Entwicklung von Verhaltensmodellen nicht weiter berücksichtigt oder verwendet werden.

Aufgrund dieser Ausgangslage wurde für die Auswertung und Zuordnung der Daten folgenden Gruppierung vorgenommen:

- Gruppe Gemeindestrassen: Die Ortsdurchfahrten von Kantonsstrassen wurden separat ausgewertet und deren Ergebnisse in diesem Bericht unter dem Titel "Gemeindestrassen" aufgeführt
- Gruppe Kantonsstrassen: Für die Auswertung der Oberflächenschäden wurden nur die Ausserort-Bereiche der Kantonsstrassen berücksichtigt. Die Hauptauswertung erfolgt aufgrund der Datenbestände für Kanton A, bei welchem eine Unterteilung aufgrund der Tragfähigkeit möglich ist. Ergänzend dazu werden in diesem Kapitel auch Auswertungsergebnisse für Kanton B vorgestellt, bei welchem nur eine Unterteilung aufgrund der Verkehrslastklasse möglich war. Sämtliche Modelle aus der Auswertung beider Kantone sind in den zusammenfassenden Tabellen von Kapitel 12 enthalten, wodurch auch ein Hinweis auf mögliche Streuungen der Modelle gegeben ist.
- Gruppe Nationalstrassen: alle verfügbaren Daten aus dem Nationalstrassennetz wurden unter dieser Kategorie ausgewertet.

Der deutliche Unterschied zwischen den Ortsdurchfahrten und den Ausserort-Strecken kantonaler Strassennetz wird durch die in Tabelle 9 dargestellten Mittelwerte (umfassen auch die Angaben zu den Indizes I2 und I3) deutlich sichtbar.

Kanton	Lage	I1	I2	I3
A	ausserorts	1.20	1.56	2.11
A	innerorts	1.55	2.40	2.20
A	Δ innerorts %	29.2	53.8	4.3
C	ausserorts	2.25	1.35	2.26
C	innerorts	2.13	1.49	2.29
C	Δ innerorts %	-5.38	10.83	1.36
D	ausserorts	2.7	1.5	2.2
D	innerorts	2.6	1.7	2.3
D	Δ innerorts %	-3.2	15.8	4.9

Tab. 9: Unterschiede der Indexwerte bei Ortsdurchfahrten und offener Strecke für verschiedene kantonale Strassennetze

Bei der weiteren Unterteilung der Datensätze von Kantonsstrassen nach Verkehrsbelastung standen jeweils nur die DTV-Werte zur Verfügung. Eine Zuteilung zu den Verkehrslastklassen erfolgte aufgrund der Angaben in Tabelle 10.

Verkehrslastklasse	Bezeichnung	TF Werte-Bereich*	Anzahl LW* > 3.5 to (ca.)	DTV-Wert**	Typische Strassenarten
T1	sehr leicht	≤ 30	25	≤ 1'000	Erschliessungsstrassen
T2	leicht	> 30...100	80	≤ 3'000	Sammelstrassen
T3	mittel	>100...300	250	≤ 10'000	Hauptstrassen
T4	schwer	>300...1'000	700	≤ 20'000	Hauptstrassen
T5	sehr schwer	> 1'000...3'000	2'000	≤ 60'000	HLS, Autobahnen
T6	extrem schwer	> 3'000...10'000	> 2'000	> 60'000	Autobahnen

Tab. 10: Zuteilungskriterien in verschiedene Verkehrslastklassen nach DTV

5.2.2 Bestimmung der Ausreisser

Bei der Auswertung von Datensätzen mit einer grösseren Streuung ist es nahe liegend, dass man zumindest den Versuch unternimmt so genannte "Ausreisser", d.h. Werte die vollkommen aus dem "normalen" Bereich fallen (deren Ursache kann unter anderem auf eine fehlerhaften Datenzuordnung, auf falsche Messergebnisse, auf frühe Schadenbildung infolge Baumängel oder anderen Zufälligkeiten zurückzuführen sein) von vorne herein auszuschliessen um die Zuverlässigkeit des Ergebnisses zu erhöhen. Bei einem solchen Vorgehen besteht allerdings das Risiko einer über das "normale" Mass hinaus gehender Korrektur. Zu diesem Zweck wurde vor der Auswertung festgelegt, welche Werte als "Ausreisser" zu betrachten seien. Das entsprechende Vorgehen wird jeweils für alle untersuchten Merkmale erklärt. Bei der Festlegung der Grenzlinien für die Oberflächenschäden ist man von folgenden Überlegungen ausgegangen:

- Obere Grenzlinie: die obere Grenzlinie wird definiert durch eine Gerade die vom 0-Punkt ausgeht und durch einen Punkt entsprechend einem Indexwert I_{Ai} vom 2.0 nach 5 Jahren geht. Einem Indexwert von 2.0 entspricht ein Matrixwert (Ausmass x Schwere) < 4 . Es wird davon ausgegangen, dass wenn innerhalb von 5 Jahren, d.h. der im Belagsbau üblichen Garantiezeit, ein grösserer Schaden auftritt dieser kein "normaler" Zustand sondern die Folge eines Einbau- oder Materialfehlers sei.
- Untere Grenzlinie: mit der Annahme einer Gerade durch den gleichen Indexwert aber erst bei 20 Jahren werden ausserordentlich gute "Zufallsergebnisse" aus der Auswertung ausgeschlossen. Diese untere Grenzlinie die einen Schnittpunkt bei einem Indexwert von 1 nach 20 Jahren hat, wurde nicht systematisch angewendet (vor allem nicht bei den Indizes I_{A1} und I_{A5}).

Visuelle Zustandserfassung: Bestimmung der Ausreisser

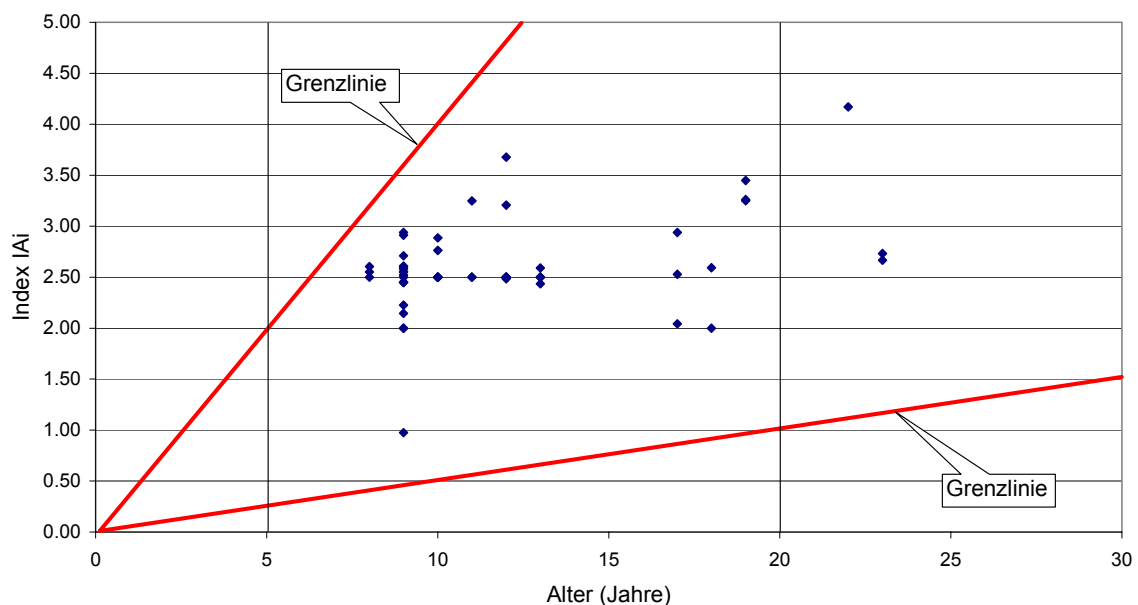


Abb. 14: Darstellung der Grenzlinien für die Bestimmung der Ausreisser bei der Sortierung der Daten für die Auswertung von Verhaltensmodellen bezüglich der Oberflächenschäden.

5.3 Index IA1: Oberflächenglätte

In Zusammenhang mit der Vorbereitung des Kreditgesuches wurde seitens der Forschungsstelle bezüglich der Gruppe Oberflächenglätte (umfassend die Merkmale "Schwitzen und "Polieren") die beabsichtigte Arbeit wie folgt formuliert:

- **versuchsweise Oberflächenglätte** (etwa entsprechend Definition der Gruppe I_{A1} , vorwiegend aber ausschliesslich Zustandsmerkmal Schwitzen: das Polieren kann bei einer visuellen Erfassung nicht zuverlässig genug evaluiert werden)

Im Rahmen der nachträglichen Festlegung der Arbeitsziele mit der begleitenden Expertenkommission EK 7.05 wurde dann weiter präzisiert, dass sich allfällige Ergebnisse eigentlich nur auf das Merkmal "Schwitzen" beziehen würden.

Nachfolgend werden für die drei betrachteten Strassenkategorien die Ergebnisse vorgestellt und kommentiert.

5.3.1 Gemeindestrassen

Die Auswertung der Daten hat zunächst gezeigt, dass der Schadenfall "Oberflächenglätte" auf Strassen im Gemeindegebiet kaum vorkommt (zumindest gilt dies für die hier untersuchten Ortsdurchfahrten von Kantonsstrassen). Dieses Ergebnis ist insofern verständlich, als infolge der damit verbundenen höheren Lärmentwicklung im Innerortbereich auf die Anwendung der für das Phänomen des Schwitzens anfälligeren Oberflächenbehandlungen eher verzichtet wird.

Index I_{A1} , Gemeindestrassen, $I_5 \leq 3$

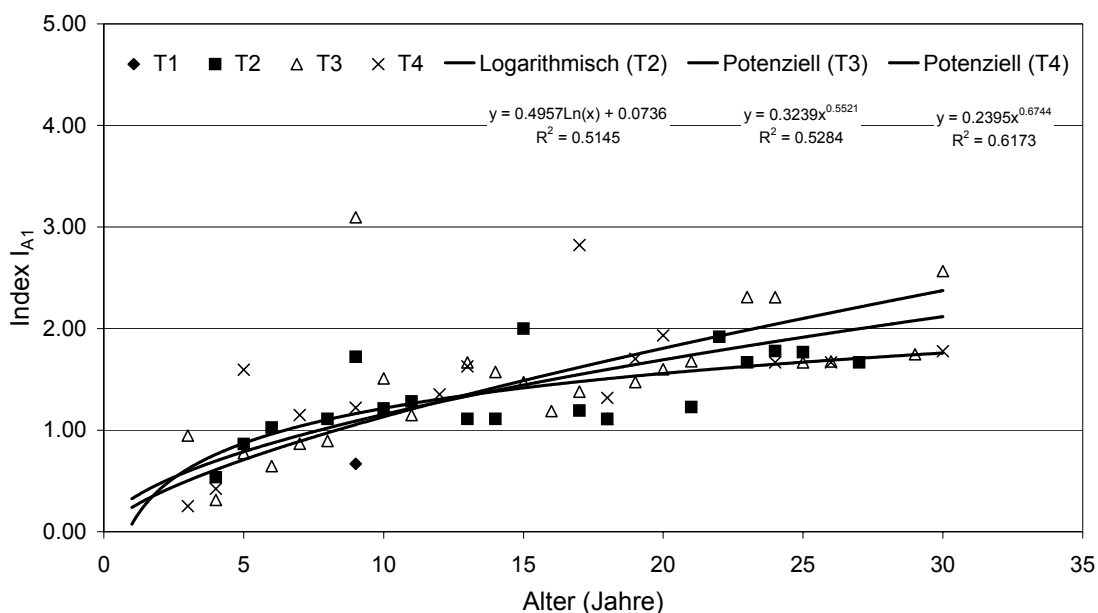


Abb. 15: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für den Index I_{A1} (Oberflächenglätte) auf Kantonsstrassen innerorts (im Rahmen der Auswertung den "Gemeindestrassen" gleichgestellt) mit einem Tragfähigkeitsindex $I_5 \leq 3$.

Die praktisch durchwegs unterhalb eines Indexwertes von 1 liegenden Werte lassen darüber hinaus die Schlussfolgerung zu, dass die beobachteten und aufgenommenen Mängel leichter Natur (Schaden schwere 1) und lokalen Charakters (Schadenausmass 1) waren.

Index I_{A1} , Gemeindestrassen, $I_5 > 3$

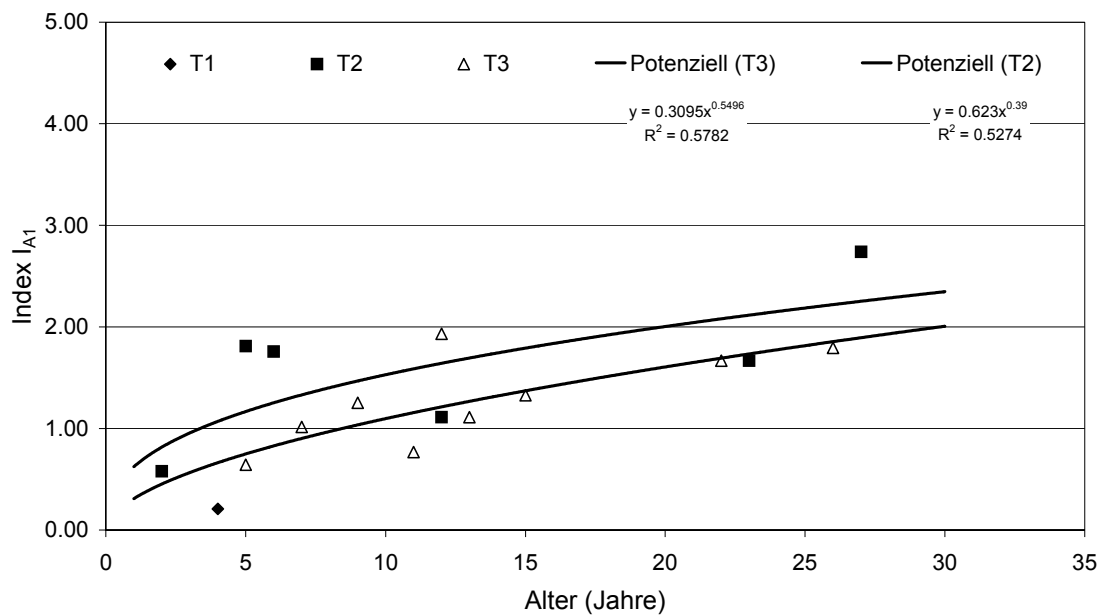


Abb. 16: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für den Index I_{A1} (Oberflächenglätte) auf Kantonsstrassen innerorts (im Rahmen der Auswertung den "Gemeindestrassen" gleichgestellt) mit einem Tragfähigkeitsindex $I_5 > 3$.

5.3.2 Kantonsstrassen

Kantonsstrassen ausserorts mit leichter bis mittlerer Verkehrsbelastung sind das bevorzugte Anwendungsgebiet von Oberflächenbehandlungen, welche als die "riskanteste" Belagsart bezüglich des Schwitzens betrachtet werden können. Von den untersuchten Datensätzen im Kanton A haben deren 49 (ca. 5 Prozent, oder 7.65% der Netzlänge) eine Oberflächenbehandlung und etwa 2/3 davon – 31 Abschnitte – sind in die Verkehrslastklasse T2 einzuordnen.

Es kann demnach von Interesse sein, diesen Ergebnissen die aus den Daten von Kanton B abgeleiteten Modelle gegenüberzustellen, werden doch in diesem Kanton Oberflächenbehandlungen deutlich häufiger verwendet (Anteil 37.3 % an der Netzlänge) und damit könnte das Modell um einiges repräsentativer sein. Als Beispiel wird das Modell für die Verkehrslastklasse T2 in Abbildung 19 dargestellt (sämtliche Modelle in den zusammenfassenden Tabellen von Kapitel 12). Mit dem Modell aufgrund der Daten der Strecken mit Oberflächenbehandlungen in Kanton A wird nach 30 Jahren ein Indexwert von ca. 1.8 erreicht, bei Modell mit den Daten aller Beläge von Kanton B ein Wert von etwa 2.9.

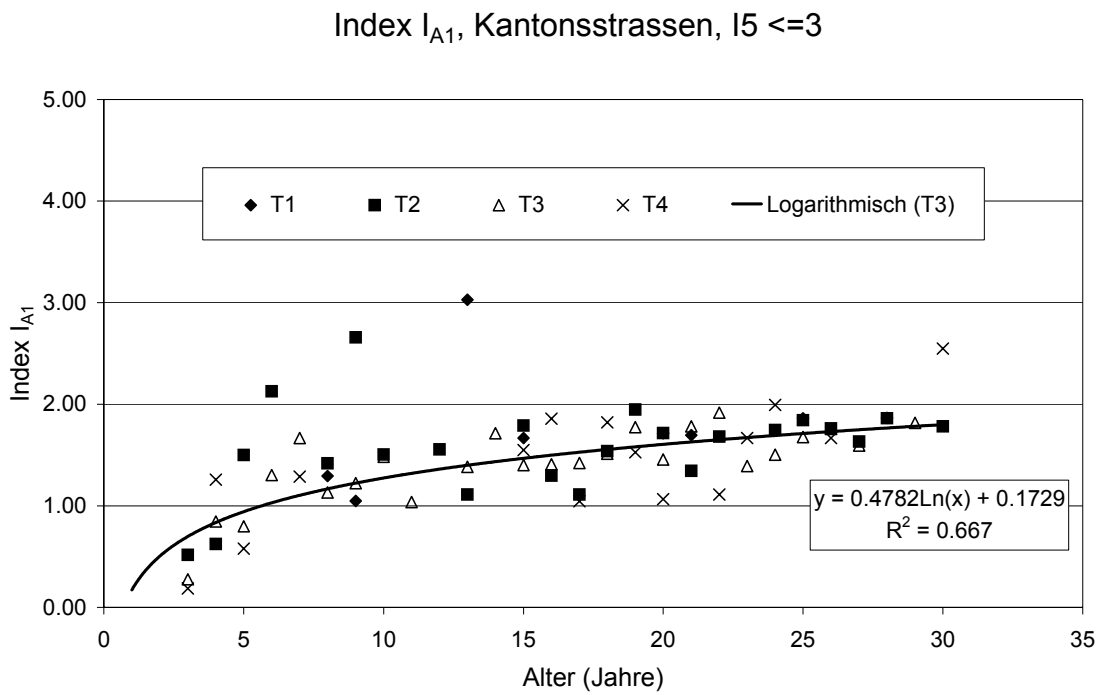


Abb. 17: Aggregierte Abschnittswerte für den Index I_{A1} (Oberflächenglätte) auf Kantonsstrassen der Verkehrslastklasse T2 mit Belagsart "Oberflächenbehandlung".

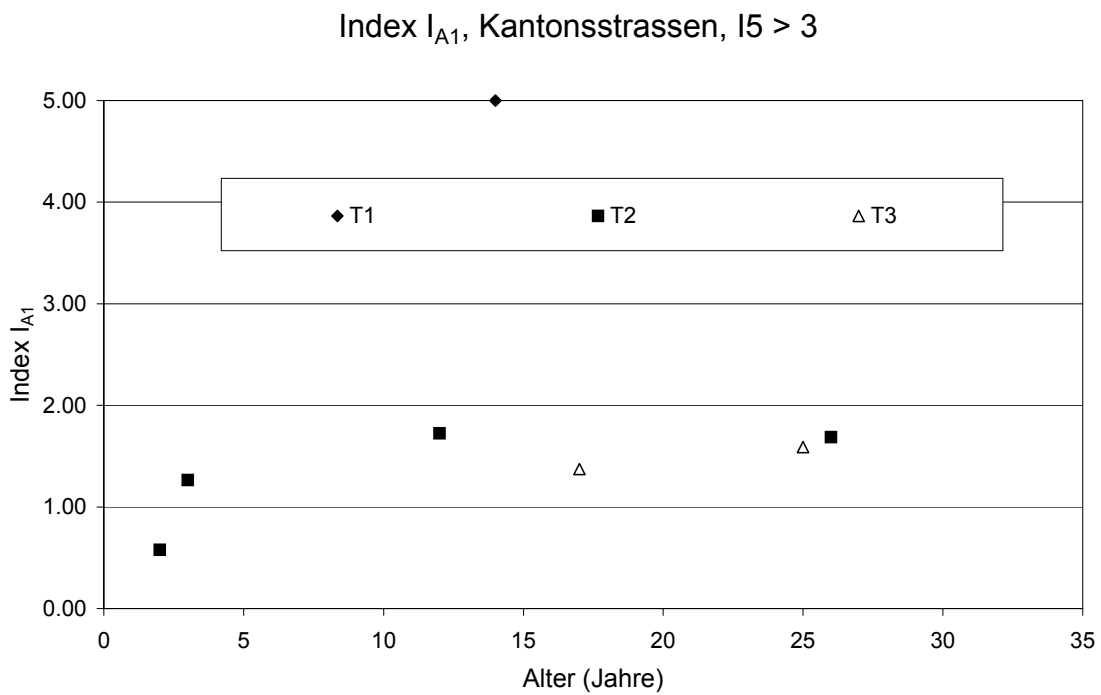


Abb. 18: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für den Index I_{A1} (Oberflächenglätte) auf Kantonsstrassen ausserorts der Verkehrslastklasse T2.

Verhaltensmodell, Index I_{A1} , Verkehrslastklasse T2

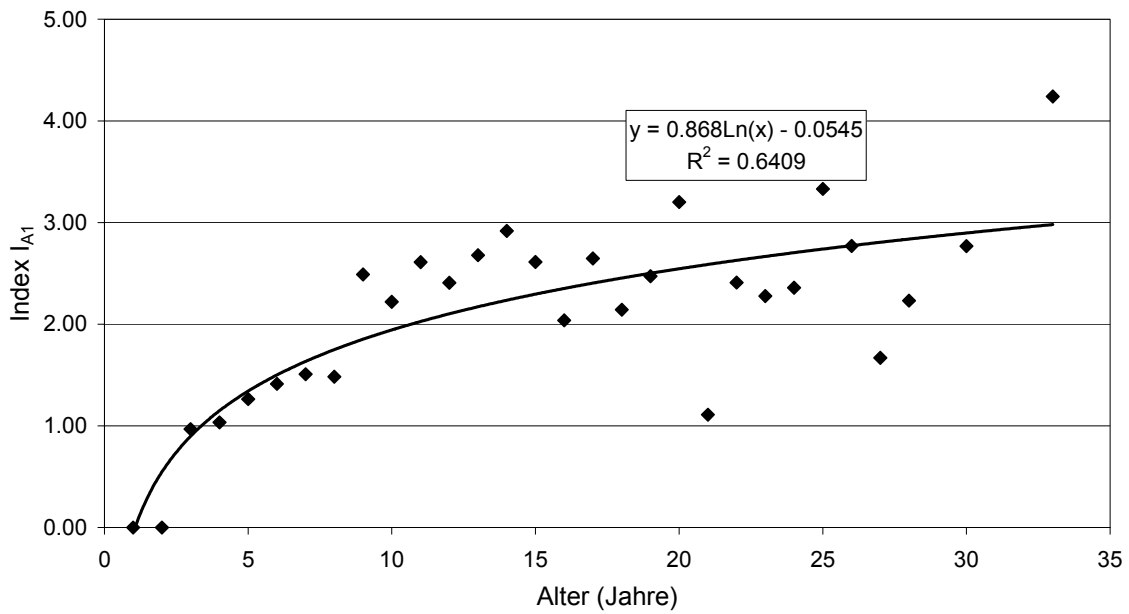


Abb. 19: Gewichtete "Jahgangsmittelwerte" für den Index I_{A1} (Oberflächenglätte) auf Kantonsstrassen der Verkehrslastklasse T2, Kanton B.

5.3.3 Nationalstrassen

Index I_{A1} - Nationalstrassen, rechter Fahrstreifen, T5/T6

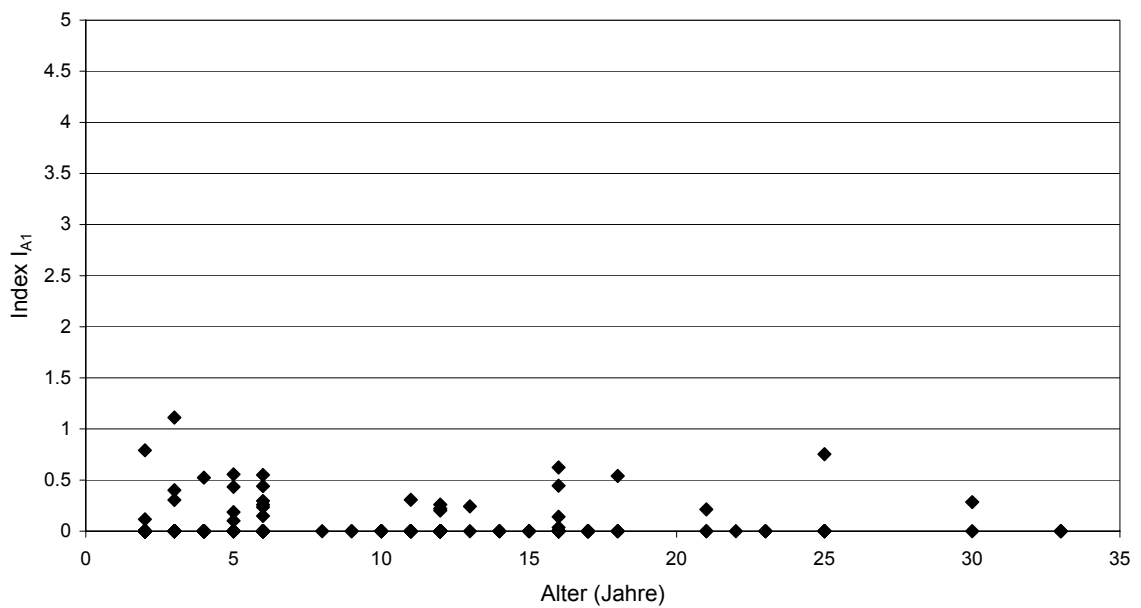


Abb. 20: Aggregierte Abschnittswerte für den Index I_{A1} (Oberflächenglätte) auf Nationalstrassen der Verkehrslastklassen T5 und T6

Auf Nationalstrassen kommen Schäden der Gruppe Oberflächenglätte (Schwitzen) kaum vor, was auch insofern verständlich ist, als auf diesen Strassen Oberflächenbehandlungen nicht angewendet werden und Probleme infolge allfällig überfetteter Beläge meist im Rahmen der Garantiarbeiten bereinigt werden.

5.4 Index IA2: Belagschäden

5.4.1 Gemeindestrassen

Die aggregierten (Abschnittsmittelwert plus Standardabweichung) Indexwerte für die Schadengruppe Belagschäden bleiben auf den Ortsdurchfahrten der Kantonsstrassen zum einem grossen Teil unterhalb eines Wertes von 1, deuten also auf nur lokal vorkommende leichte Schäden über den ganzen betrachteten Altersbereich von bis über 30 Jahre.

Bei dieser Ausgangslage ist es ausserordentlich schwierig überhaupt eine Trend aus den Daten herauslesen und berechnen zu wollen. Aus diesem Grund wurde für die Datengruppen der Verkehrslastklassen T3 und T4 auf die Berechnung eines Modells verzichtet. Der für die Daten aus der Verkehrslastklasse T1/T2 angegebenen Modellgleichung wird in diesem Sinne auch nur eine informative Bedeutung beigemessen.

Die oben aufgeführten Feststellungen führen zusammen mit den generellen Bemerkungen zur Zuverlässigkeit der visuellen Zustandserfassung in Kapitel 6.1 im Falle der Gruppe der Belagschäden auch zur Frage, wie genau denn diese Schadengruppe erfasst worden sei.

Index I_{A2} , Gemeindestrassen, $I_5 \leq 3$

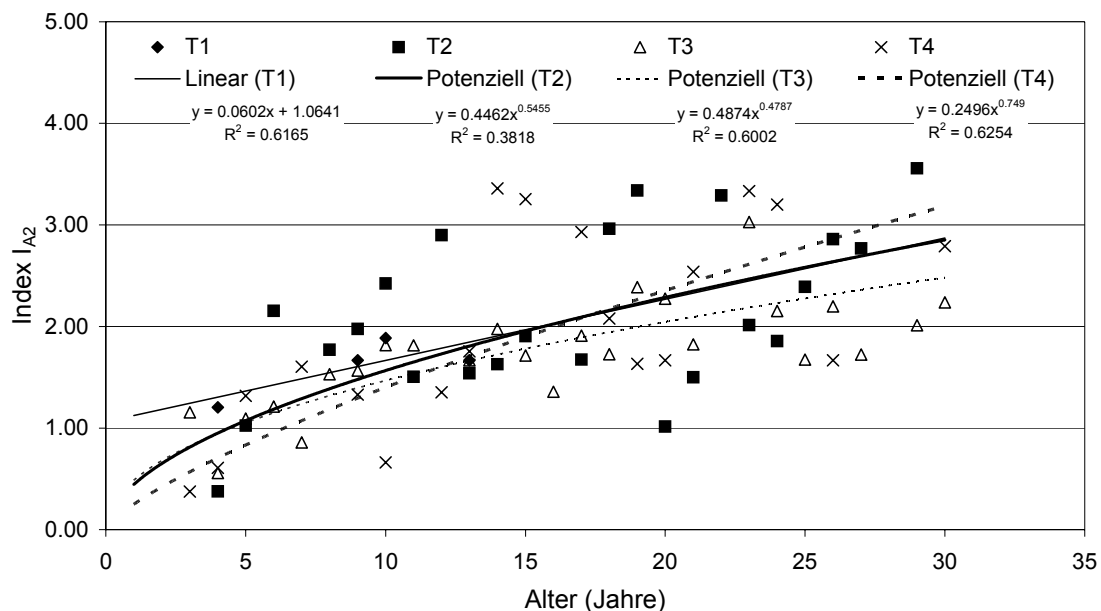


Abb. 21: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für den Index I_{A2} (Belagschäden) auf Kantonsstrassen innerorts (im Rahmen der Auswertung den "Gemeindestrassen" gleichgestellt) mit einem Tragfähigkeitsindex $I_5 \leq 3$.

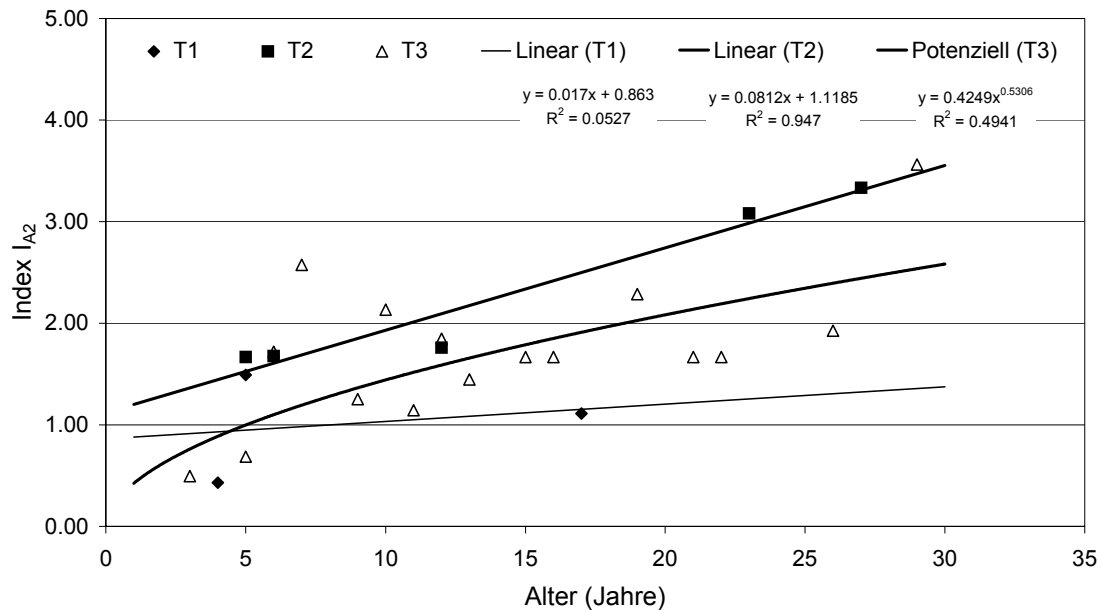
Index I_{A2} , Gemeindestrassen, $I_5 > 3$ 

Abb. 22: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für den Index I_{A2} (Belagschäden) auf Kantonsstrassen innerorts (im Rahmen der Auswertung den "Gemeindestrassen" gleichgestellt) mit einem Tragfähigkeitsindex $I_5 > 3$.

5.4.2 Kantonsstrassen

Auch bei den Ausserortstrecken der Kantonsstrassen gelten grundsätzliche ähnliche Bemerkungen wie für die Ortsdurchfahrten, auch wenn hier insgesamt die Indexwerte etwas höher ansteigen. Dennoch gibt es auch die Feststellung, dass mit höherer Verkehrsbelastung die Schäden kaum zunehmen, sondern eher in geringerem Ausmass anfallen (siehe dazu auch die Bemerkungen zum Index der strukturellen Schäden I_{A4} in Kapitel 6.6.2).

Eine weitere Feststellung bei diesen Daten ist die Tatsache, dass ältere Beläge (über 25-jährig unter der Annahme der Zuverlässigkeit der Angaben) sich deutlich besser verhalten und gegenüber neueren Abschnitten gewissermassen ein Eigenleben führen. Aus diesem Grund wurden die Modellauswertungen für diesen Index auf die Datensätze mit einem Alter von max. 25 Jahren beschränkt.

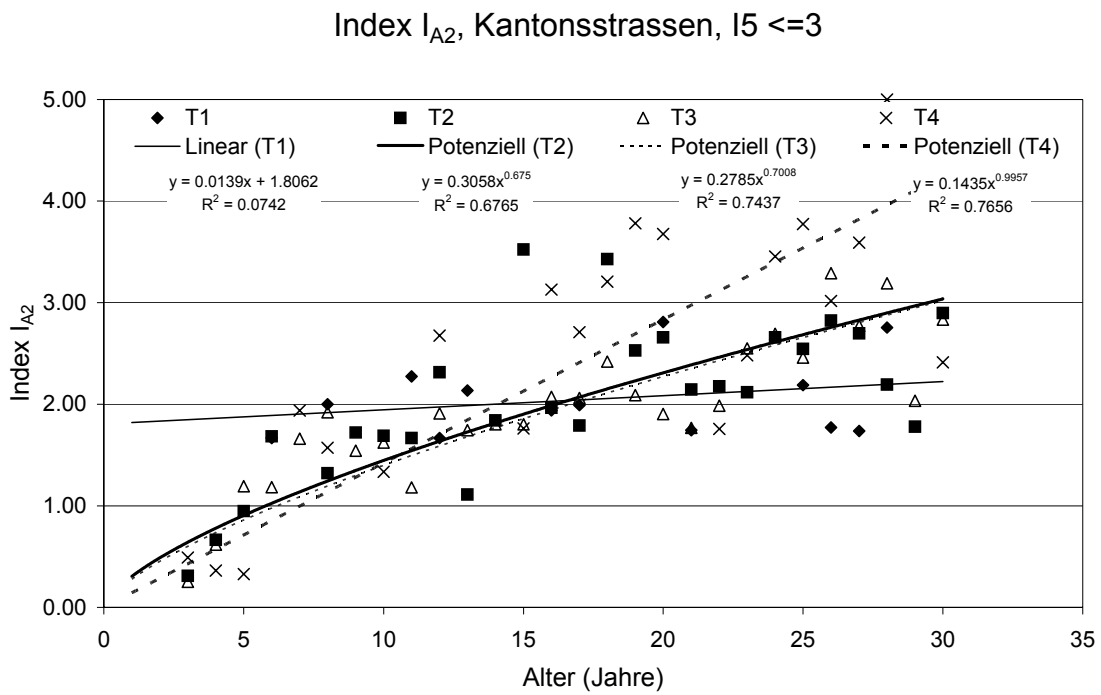


Abb. 23: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für den Index I_{A2} (Belagschäden) auf Kantonsstrassen ausserorts mit einem Tragfähigkeitsindex $I_5 \leq 3$.

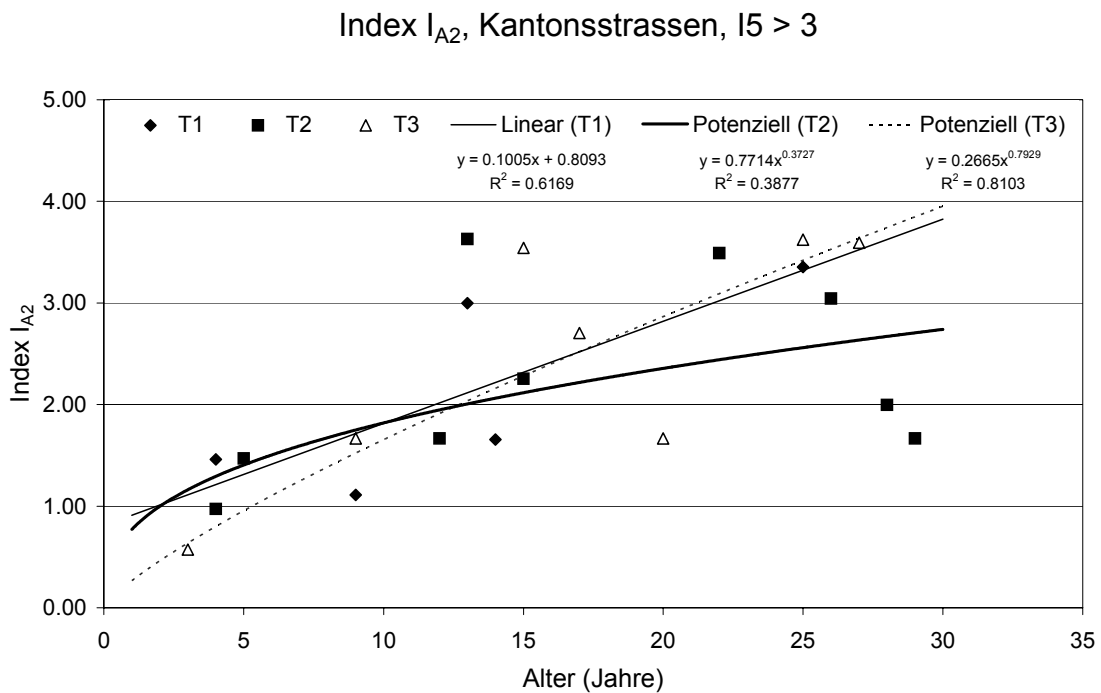


Abb. 24: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für den Index I_{A2} (Belagschäden) auf Kantonsstrassen ausserorts mit einem Tragfähigkeitsindex $I_5 > 3$.

5.4.3 Nationalstrassen

Die Auswertung der Daten aus der visuellen Schadenaufnahme auf der N2 im Kanton Tessin hat ergeben, dass gerade auf dem deutlich weniger belasteten linken Fahrstreifen eine Häufung von strukturellen Schäden erhoben wurden (siehe auch Bemerkungen dazu in Kapitel 5.6.3). Im Rahmen einer Plausibilitätsüberprüfung, bei welcher auch berücksichtigt wurde, dass die im Allgemeinen älteren Beläge auf dem linken Fahrstreifen zu einer Rissbildung infolge Alterung der Bindemittel neigen, konnte der Schluss gezogen werden, dass die Zuweisung bestimmter Schadenbilder zur Gruppe der strukturellen Schäden einem Zuordnungsfehler entspricht.

Die fälschlicherweise der Gruppe der strukturellen Schäden zugeordneten Mängel, "fehlen" aber in der Bilanz der für die Gruppe der Belagschäden ermittelten Schäden. In der folgenden Abbildung 25 wurde deshalb neben den ausgewerteten und aggregierten "Originaldaten" der Gruppe Belagschäden (blaue Symbole) auch eine zusätzliche Werteserie eingetragen und ausgewertet, bei welcher die ursprünglich festgestellten Belagschäden um einen 50% Anteil der unter dem Titel "strukturelle Schäden" erhobenen Mängel erhöht wurden. Damit kommt man der tatsächlichen Entwicklung der Gruppe Belagschäden etwas näher.

Auf eine entsprechende Korrektur bei den Daten für den rechten Fahrstreifen wurde hingegen verzichtet.

Nationalstrassen, linker Fahrstreifen, Entwicklung Index IA2

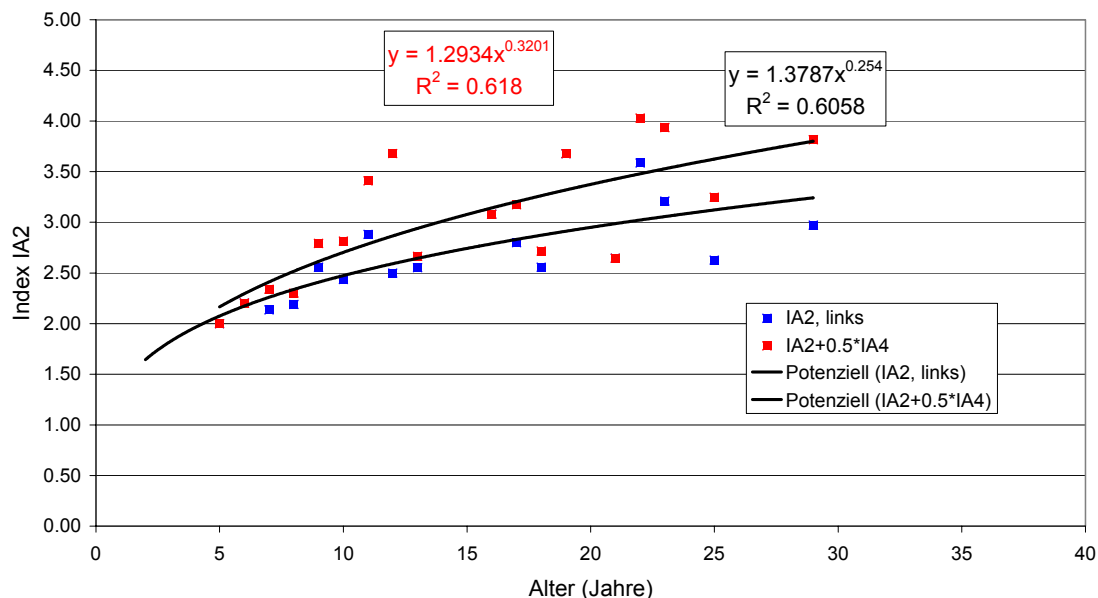


Abb. 25: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für den Index I_{A2} (Belagschäden) auf dem linken Fahrstreifen von Nationalstrassen

Nationalstrassen, rechter Fahrstreifen, Entwicklung Index IA2

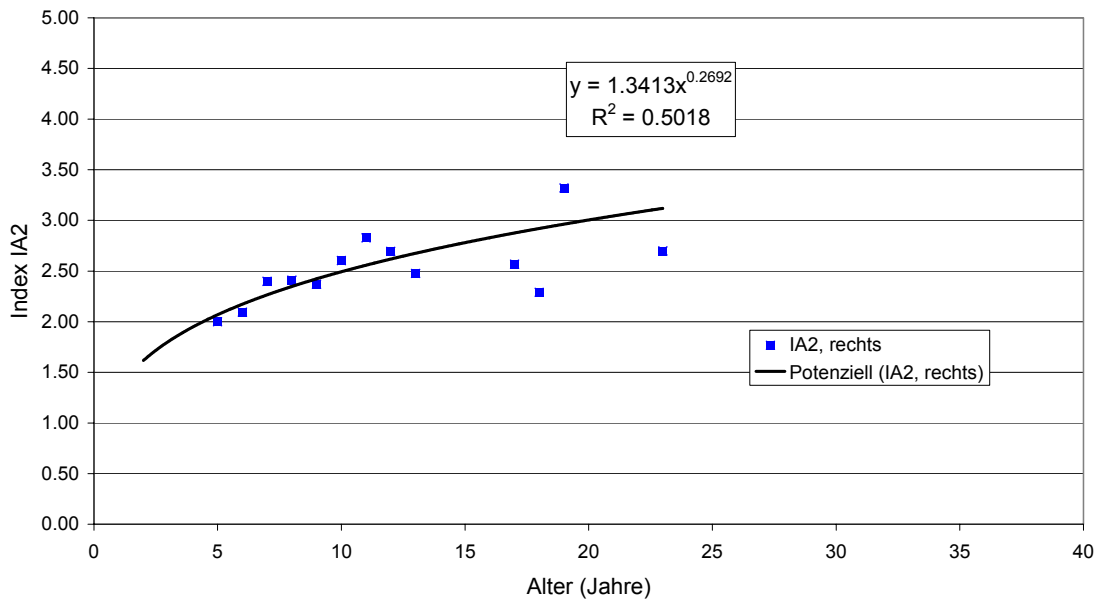


Abb. 26: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für den Index I_{A2} (Belagschäden) auf dem rechten Fahrstreifen von Nationalstrassen

5.5 Index IA3: Verformungen

5.5.1 Gemeindestrassen

Index I_{A3} , Gemeindestrassen, $I_5 \leq 3$

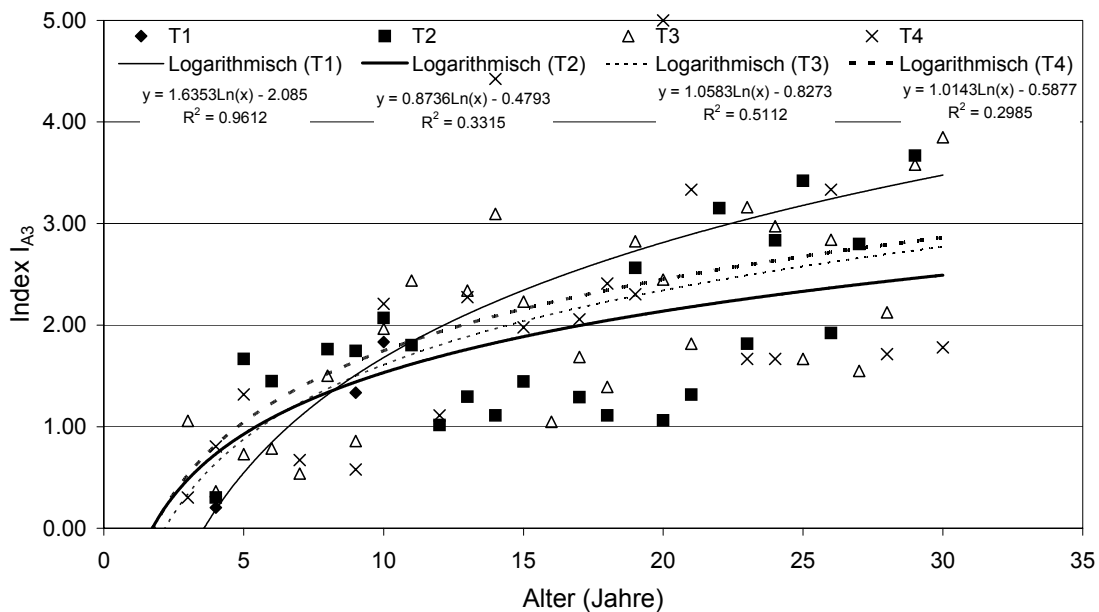


Abb. 27: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für den Index I_{A3} (Belagverformungen) auf Kantonsstrassen innerorts (im Rahmen der Auswertung den "Gemeindestrassen" gleichgestellt) mit einem Tragfähigkeitsindex $I_5 \leq 3$.

Index I_{A3} , Gemeindestrassen, $I_5 > 3$

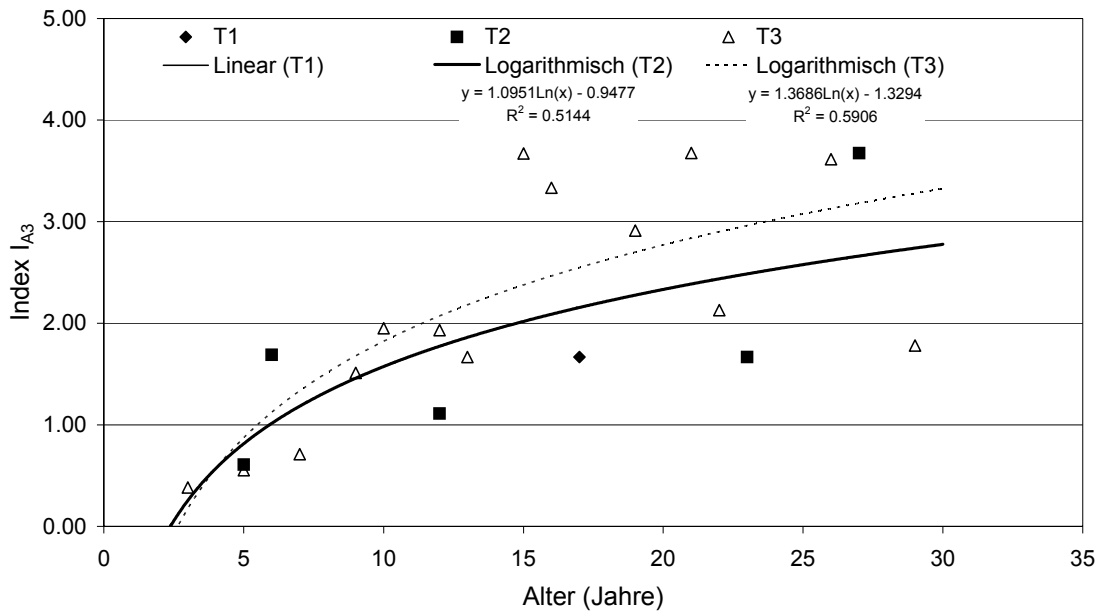


Abb. 28: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für den Index I_{A3} (Belagverformungen) auf Kantonsstrassen innerorts (im Rahmen der Auswertung den "Gemeindestrassen" gleichgestellt) mit einem Tragfähigkeitsindex $I_5 > 3$.

5.5.2 Kantonsstrassen

Index I_{A3} , Kantonsstrassen, $I_5 \leq 3$

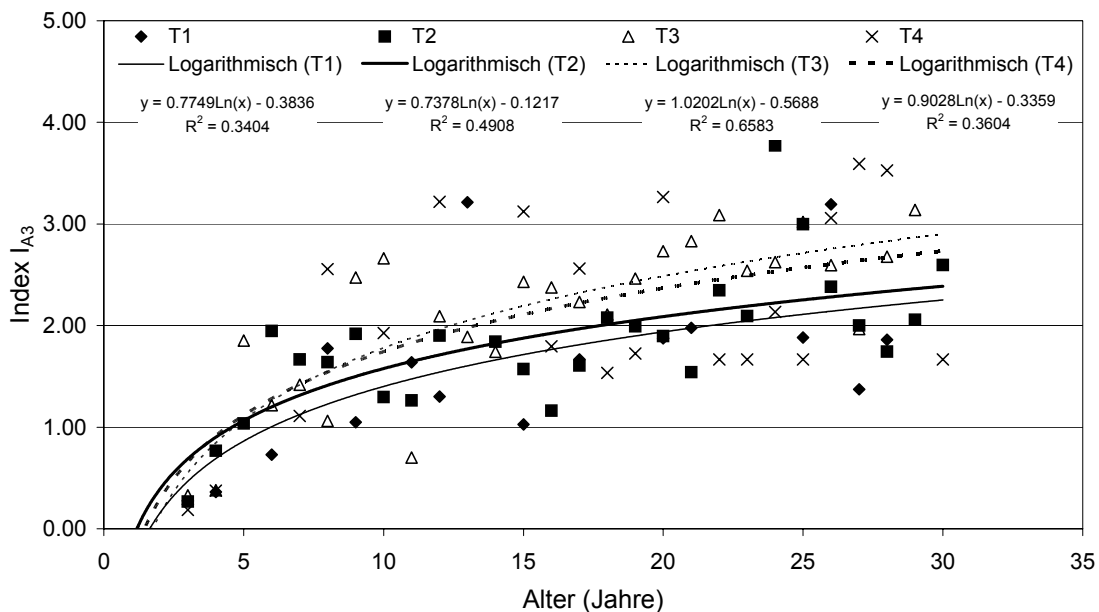


Abb. 29: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für den Index I_{A3} (Belagverformungen) auf Kantonsstrassen ausserorts mit einem Tragfähigkeitsindex $I_5 \leq 3$.

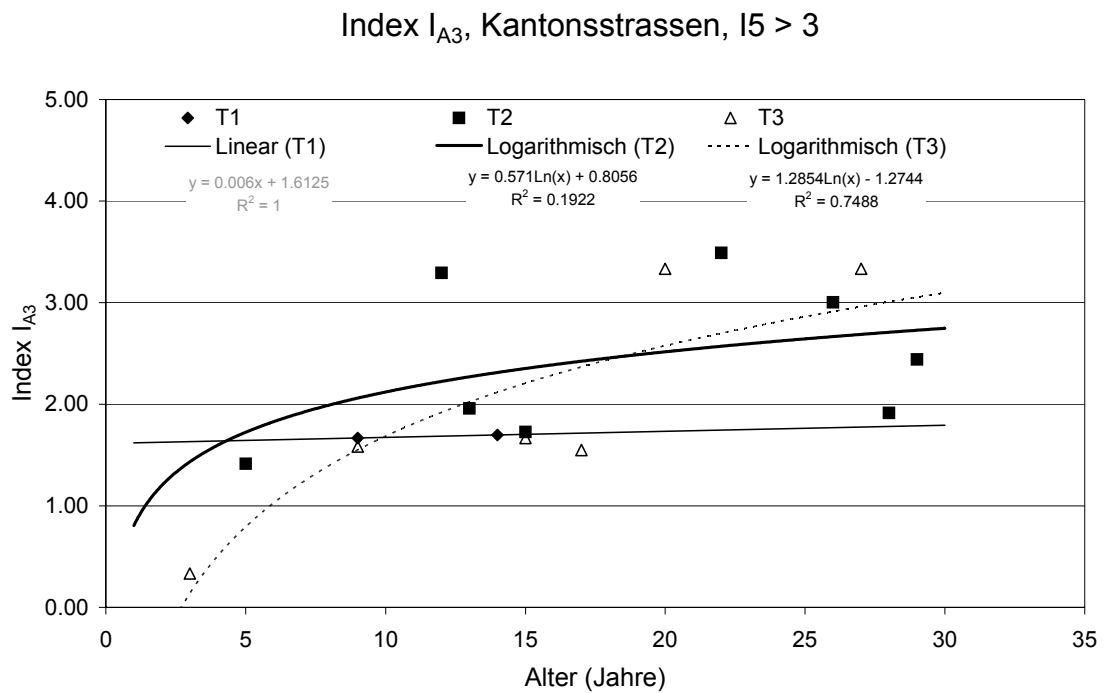


Abb. 30: Gewichtete "Jahgangsmittelwerte" für den Index I_{A3} (Belagverformungen) auf Kantonsstrassen ausserorts mit einem Tragfähigkeitsindex $I_5 > 3$.

5.5.3 Nationalstrassen

Für den Bereich der Nationalstrassen sollte an Stelle des Indexes I_{A3} "Verformungen" der Index I_3 "Querebenheit (Spurrinnen)" verwendet werden. Die in der Gruppe der Verformungen gemäss Merkmalsliste der visuellen Zustandserfassung vorkommenden weiteren Schäden:

- Aufwölbungen
- Wellblechverformungen
- Schubverformungen

kommen auf Nationalstrassen praktisch nicht vor.

5.6 Index IA4: strukturelle Schäden

5.6.1 Gemeindestrassen

Index I_{A4} , Gemeindestrassen, $I_5 \leq 3$

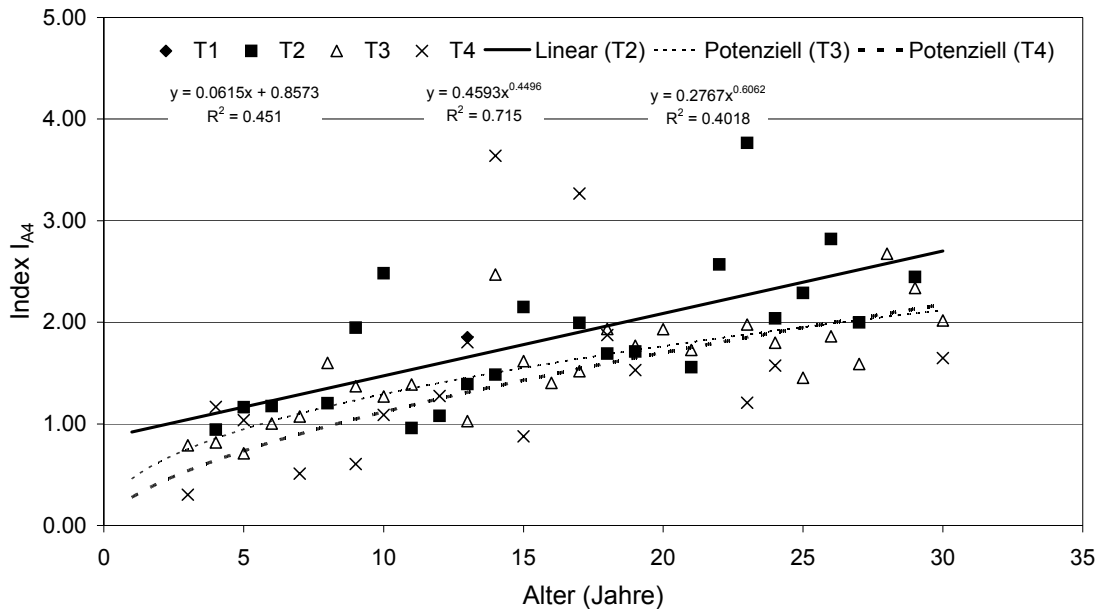


Abb. 31: Gewichtete "Jahgangsmittelwerte" für den Index I_{A4} (strukturelle Schäden) auf Kantonsstrassen innerorts (im Rahmen der Auswertung den "Gemeindestrassen" gleichgestellt) mit einem Tragfähigkeitsindex $I_5 \leq 3$.

Index I_{A4} , Gemeindestrassen, $I_5 > 3$

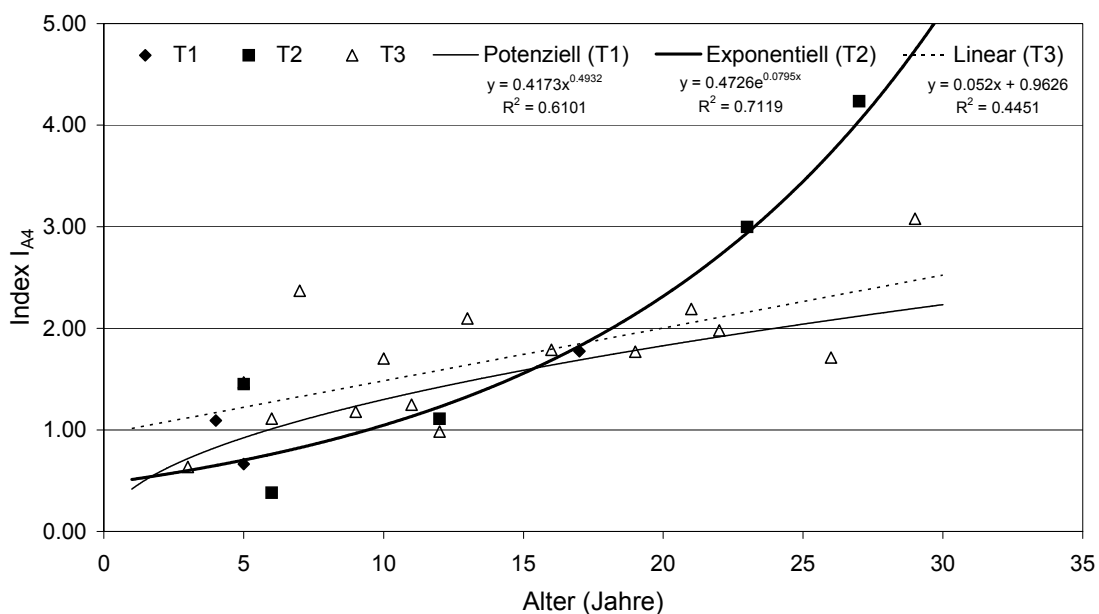


Abb. 32: Gewichtete "Jahgangsmittelwerte" für den Index I_{A4} (strukturelle Schäden) auf Kantonsstrassen innerorts (im Rahmen der Auswertung den "Gemeindestrassen" gleichgestellt) mit einem Tragfähigkeitsindex $I_5 > 3$.

5.6.2 Kantonsstrassen

Die für Kantonsstrassen ermittelten Ergebnisse sind zunächst insofern erstaunlich, als eigentlich davon ausgegangen wird, dass bei grösserer Verkehrslast (höhere Verkehrslastklasse T) mit der stärkeren Beanspruchung auch die strukturellen Schäden anwachsen würden.

Bei der Auswertung der Ergebnisse mit der Bildung von linearen Modellen stellt man fest, dass für die kleineren Verkehrslastklassen ein grösserer jährlicher Zuwachs (T1: 0.0364/Jahr, T2: 0.0412/Jahr) ermittelt wurde als bei höherer Verkehrslastklasse (T3: 0.0291/Jahr, T4: kein eindeutig definierbarer Wachstumstrend, kein Modell).

Ein solches Ergebnis wurde allerdings bereits einmal für ein vergleichbares Strassennetz (Wallis) und mit Hilfe eines vereinfachten Modellansatzes zufolge unbekannter Altersdaten, wie in Kapitel 2.2.5 dieses Berichtes beschrieben und in Abbildung 35 dargestellt.

Die Begründung für dieses auf den ersten Blick unerwartete Ergebnis ist in der Tatsache zu suchen, dass bei vielen über die Jahre gewachsenen kantonalen Strassennetze, die Strecken mit höheren Verkehrsbelastung immer wieder den Bedürfnissen der Dimensionierung angepasst worden sind, währenddem bei den Strassen mit geringer Verkehrsbelastung diese Anpassung der tatsächlichen Verkehrsentwicklung nicht zu folgen vermochte.

Index I_{A4} , Kantonsstrassen, $I_5 \leq 3$

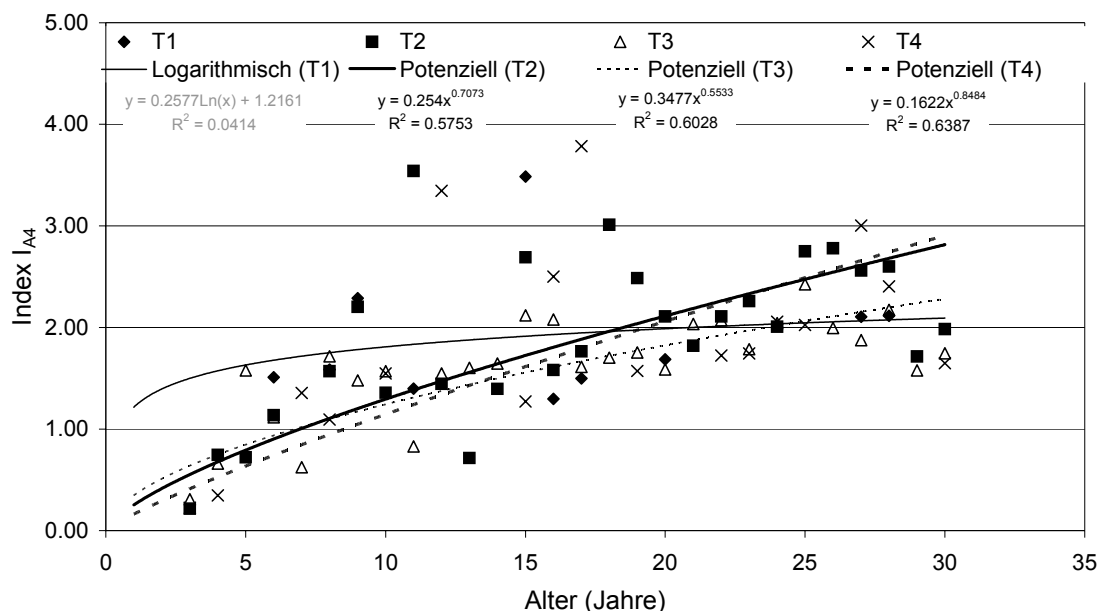


Abb. 33: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für den Index I_{A4} (strukturelle Schäden) auf Kantonsstrassen ausserorts mit einem Tragfähigkeitsindex $I_5 \leq 3$.

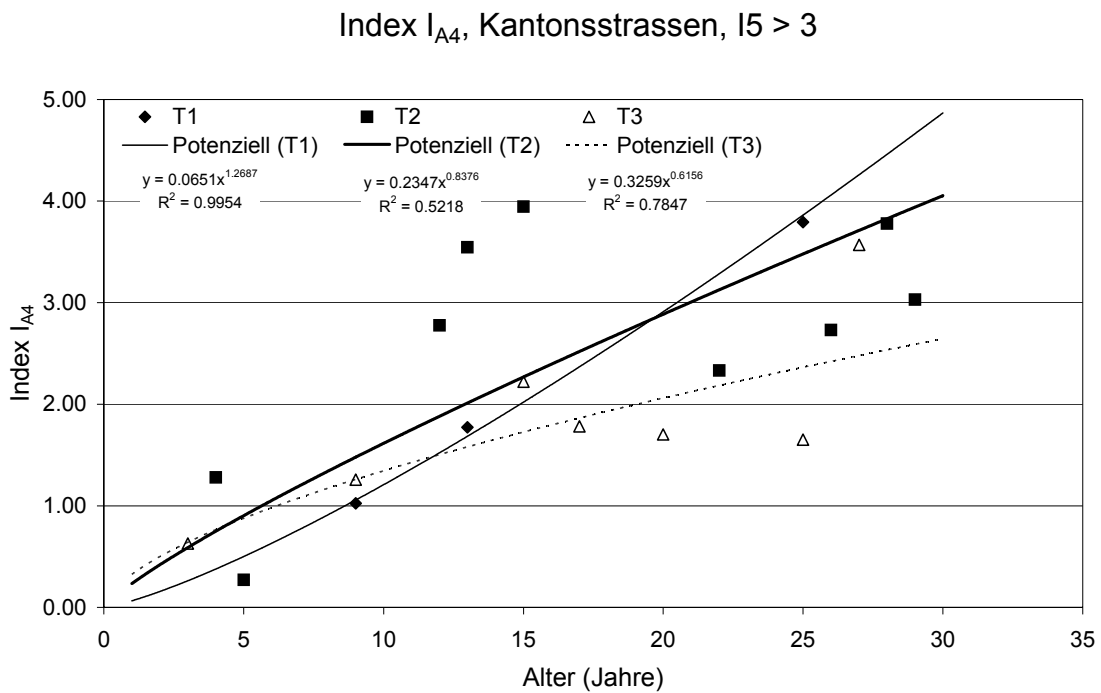


Abb. 34: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für den Index I_{A4} (strukturelle Schäden) auf Kantonsstrassen ausserorts mit einem Tragfähigkeitsindex $I_5 > 3$.

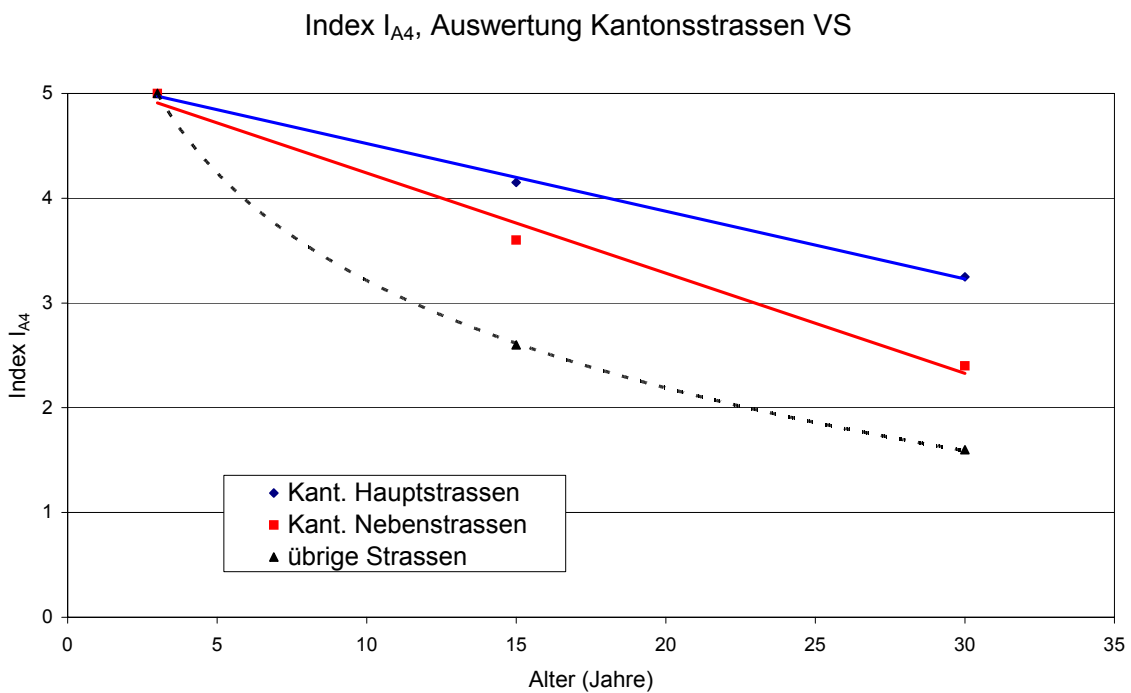


Abb. 35: Ergebnisse der Auswertung von Modellen für den Index der strukturellen Schäden IA_4 für das Strassennetz des Kantons Wallis aufgrund eines vereinfachten Modellansatzes [8], siehe auch Kapitel 2.2.5.

5.6.3 Nationalstrassen

Im Rahmen der Auswertung der netzweiten Zustandsaufnahmen auf dem Nationalstrassenetz der Jahre 1999-2001 wurde auch der Frage nach der Tragfähigkeit, und damit indirekt auch der Problematik der strukturellen Schäden besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Gezielt wurden deshalb auf einer Auswahl von Strecken, bei denen die visuelle Zustandserfassung Hinweise auf mögliche strukturelle Schäden geliefert hatte, Tragfähigkeitsmessungen mit dem Fallgewichtsdeflektometer FWD durchgeführt. Die Ergebnisse haben durchwegs ergeben, dass die Tragfähigkeitsverhältnisse auf allen untersuchten Abschnitten in Ordnung waren.

Es mag deshalb erstaunen, dass die Sichtung von Ergebnissen visueller Zustandserfassungen auf Nationalstrassen das Vorhandensein von strukturellen Schäden nachweist. Eine eingehendere Prüfung der Ergebnisse auf der Autobahn N2 im Kanton Tessin hat ergeben, dass die gerade auf den weniger belasteten linken Fahrstreifen (Überholspur) stärker vorkommenden strukturellen Schäden auf eine falsche Interpretation der durchaus vorhanden Risse zurückzuführen sind, die viel eher in die Gruppe der Belagschäden einzuordnen sind.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen das – irrtümlich – aufgenommene Ergebnis in Bezug auf die Gruppe der strukturellen Schäden.

Index I_{A4} , Nationalstrassen, rechter Fahrstreifen

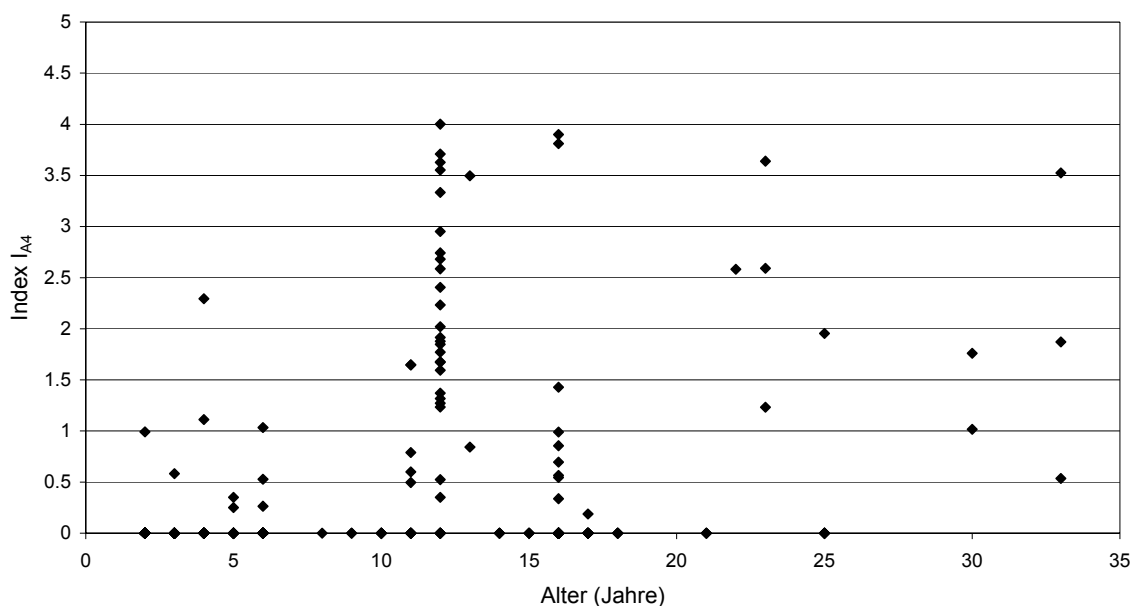


Abb. 36: Aggregierte Abschnittswerte für den Index I_{A4} (strukturelle Schäden) auf dem rechten Fahrstreifen von Nationalstrassen der Verkehrslastklassen T5 und T6

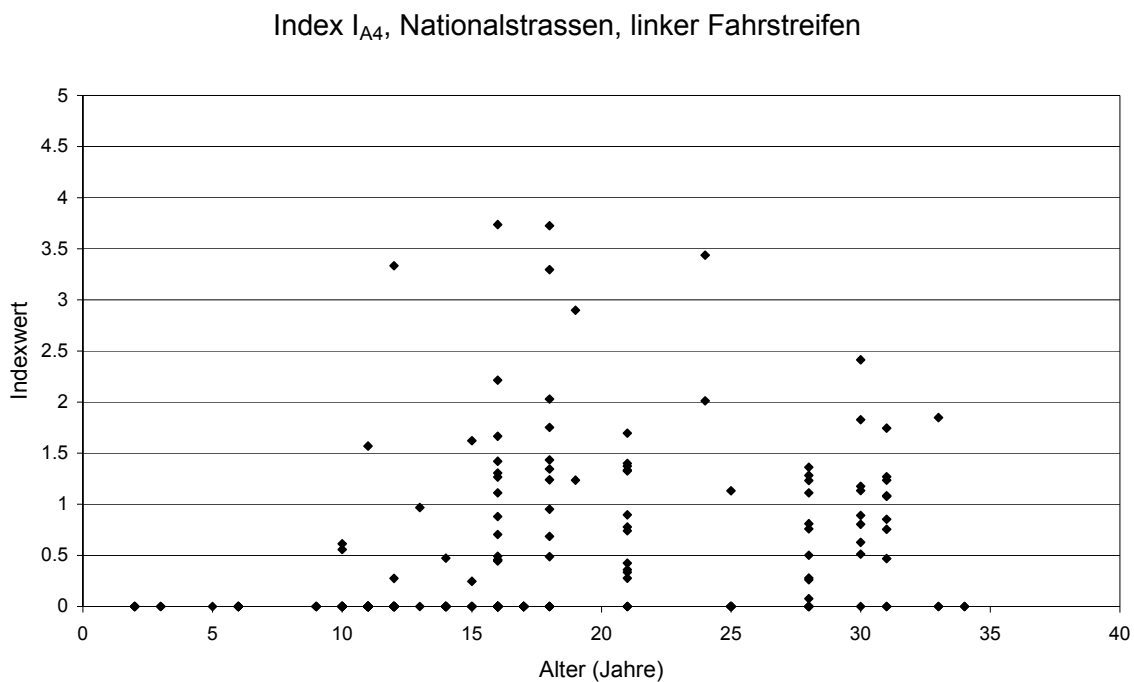


Abb. 37: Aggregierte Abschnittswerte für den Index I_{A4} (strukturelle Schäden) auf dem linken Fahrstreifen (Überholspur) von Nationalstrassen der Verkehrslastklassen T5 und T6

5.7 Index I_{A5} : Flicke

Bereits im Rahmen der in der erläuternden Textbeilage zum Kreditgesuch war darauf hingewiesen worden, dass keine reelle Absicht besteht, Verhaltensmodelle für die Gruppe der Reparaturen (Index I_{A5}), ist doch die Entwicklung der Reparaturen kein kontinuierlicher Prozess der infolge der belastungsabhängigen und – unabhängigen Faktoren abläuft, sondern eine unstetige Folge kaum vorhersehbarer Tätigkeiten der Strassenverwaltungen und der dazugehörigen Unterhaltswerkhöfe. Je nach Randbedingungen erfolgen keine oder wenige Reparaturen, dafür aber umso häufiger eigentliche flächendeckende Instandsetzungsmassnahmen, oder aber die Mittel für solche Massnahmen fehlen und es wird, wenn überhaupt nur geflickt.

Der Verzicht auf eine gezielte Suche nach Verhaltensmodellen für den Index I_{A5} wurde denn auch von der begleitenden Expertenkommission EK 7.05 in zustimmenden Sinn zur Kenntnis genommen.

Die Richtigkeit dieses Vorgehens wird durch die Auswertungen der Mehrheit der verfügbaren Daten zum Index I_{A5} bestätigt. Die altersabhängige Entwicklung der Werte für verschiedene Strassengruppen ist in den folgenden Abbildungen 38 bis 41 dargestellt.

Bei der Auswertung der Daten für Kanton B hat sich allerdings ein Zusammenhang zwischen Alter und Auftreten der Flickstellen gezeigt, wie dies durch die entsprechenden Graphiken der Abbildungen 42 und 43 (am Beispiel der Verkehrslastklassen T1 und T3) veranschaulicht wird. Im Schnitt aller Verkehrslastklassen beträgt die jährliche Zunahme des Indexwertes I_{A5} 0.07 Punkte.

5.7.1 Gemeindestrassen

Index I_{A5} , Kantonsstrassen innerort, T1/T2

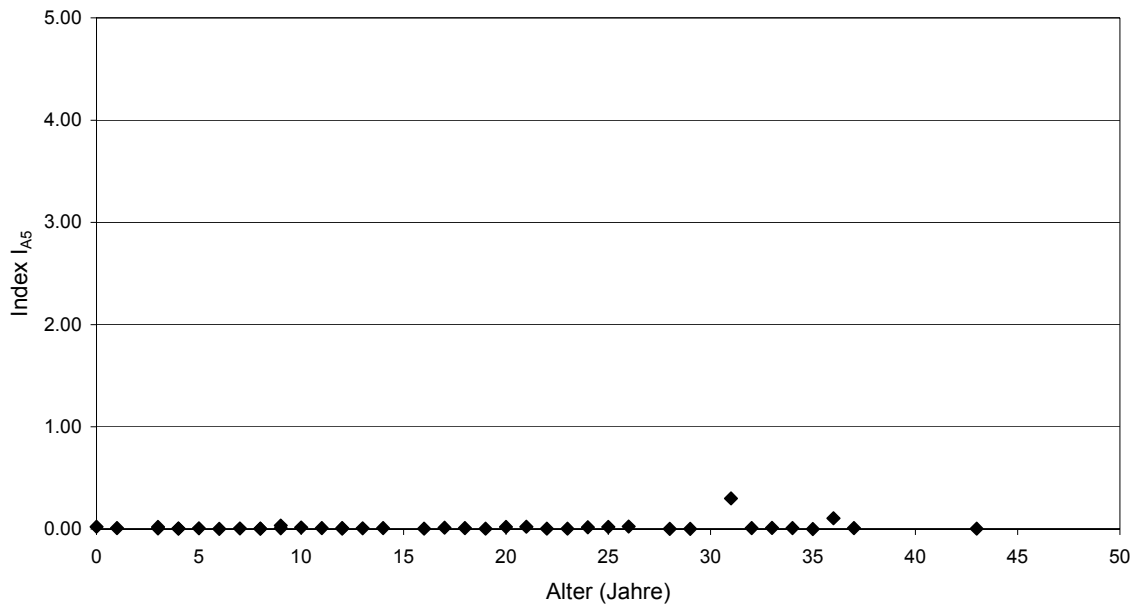


Abb. 38: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für den Index I_{A5} (Flicke) auf Kantonsstrassen innerorts (im Rahmen der Auswertung den "Gemeindestrassen" gleichgestellt) der Verkehrslastklasse T1 und T2

Index I_{A5} , Kantonsstrassen innerort, T4

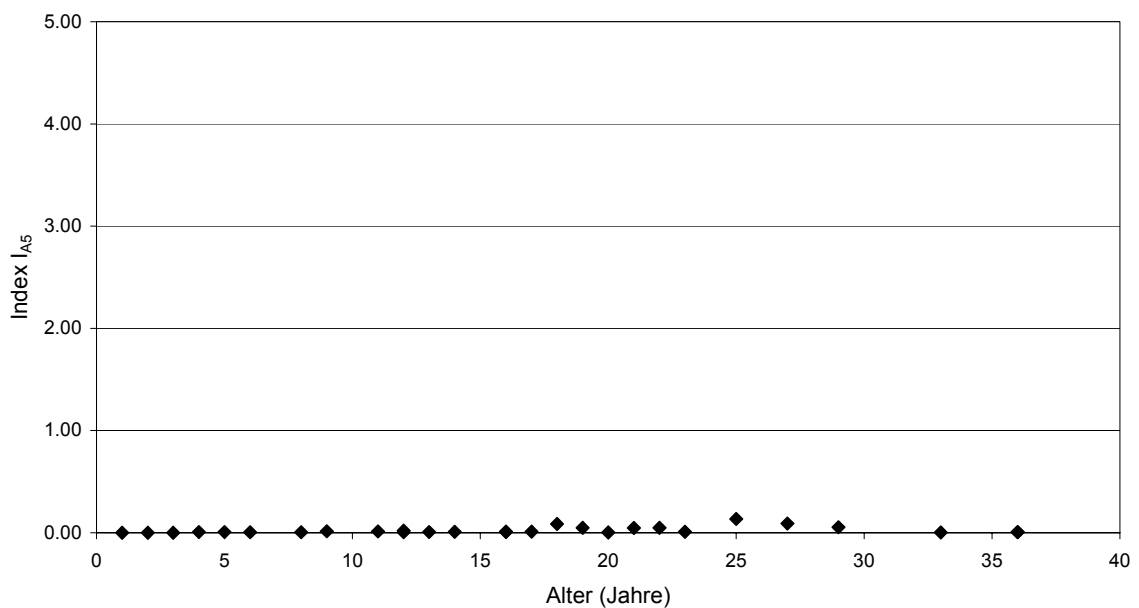


Abb. 39: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für den Index I_{A5} (Flicke) auf Kantonsstrassen innerorts (im Rahmen der Auswertung den "Gemeindestrassen" gleichgestellt) der Verkehrslastklasse T4

5.7.2 Kantonsstrassen

Index I_{A5} , Kantonsstrassen ausserort, T2

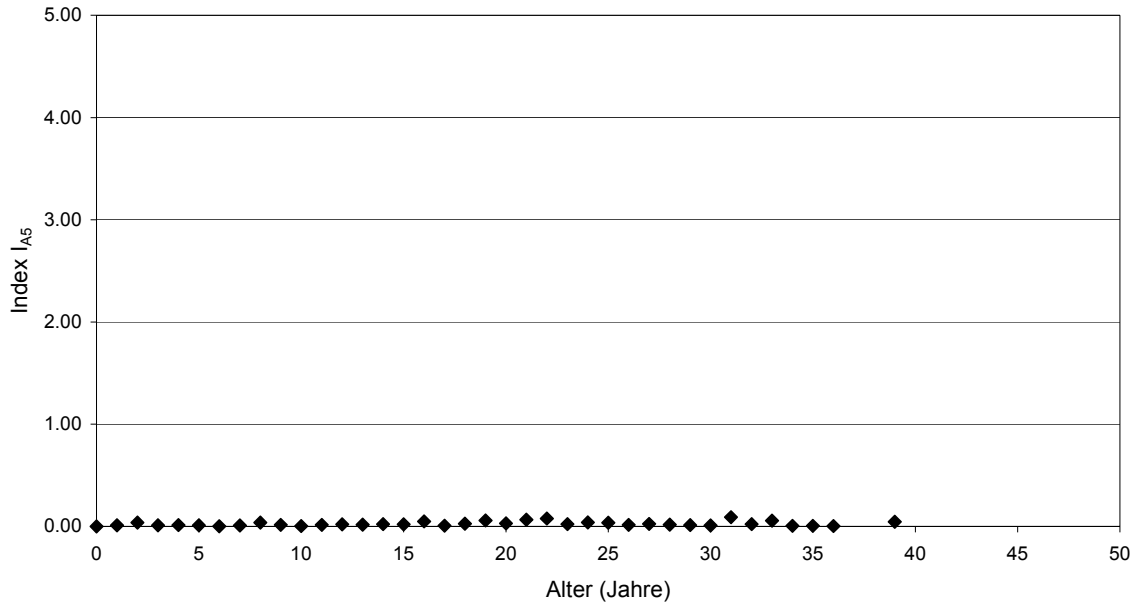


Abb. 40: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für den Index I_{A5} (Flicke) auf Kantonsstrassen der Verkehrslastklasse T2

Index I_{A5} , Kantonsstrassen ausserort, T4

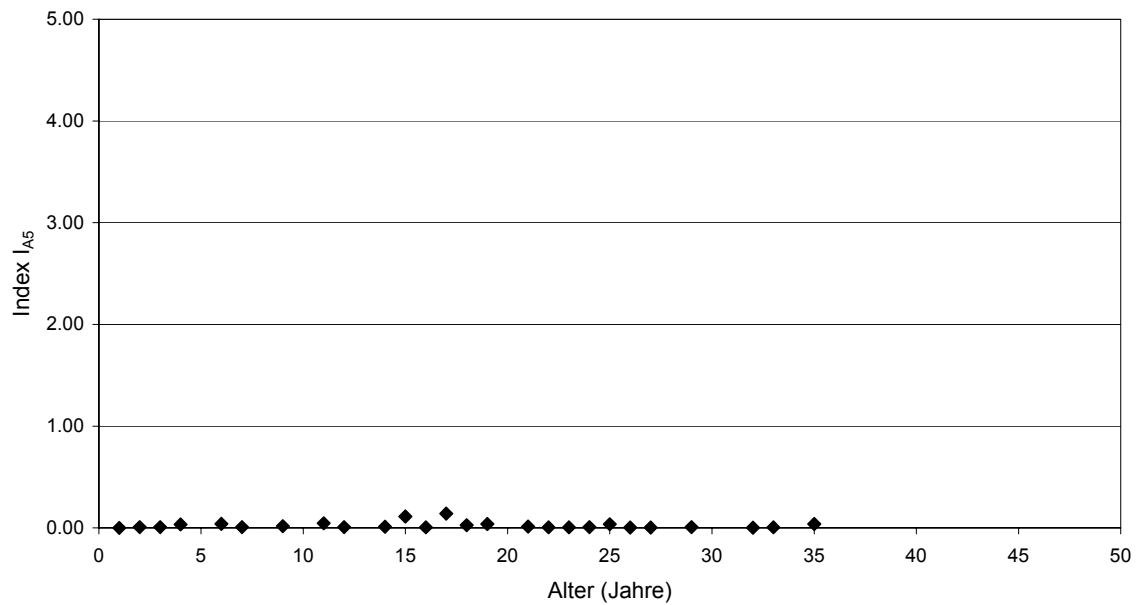


Abb. 41: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für den Index I_{A5} (Flicke) auf Kantonsstrassen der Verkehrslastklasse T4

Verhaltensmodell, Index A_5 , Verkehrslastklasse T1

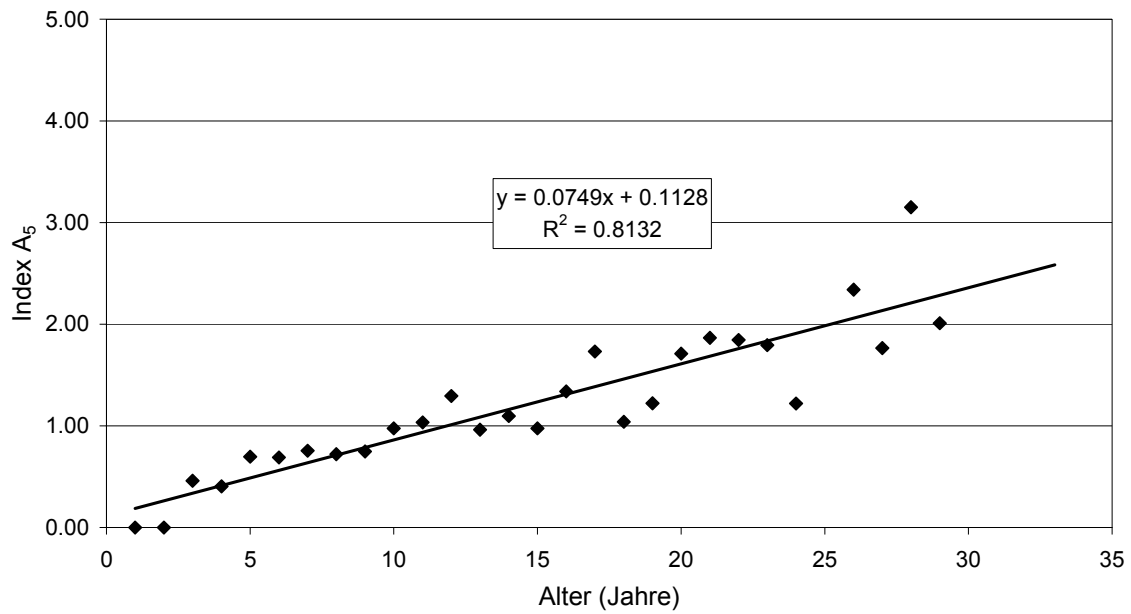


Abb. 42: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für den Index I_{A15} (Flicke) auf Kantonsstrassen der Verkehrslastklasse T1, Kanton B.

Verhaltensmodell, Index A_5 , Verkehrslastklasse T3

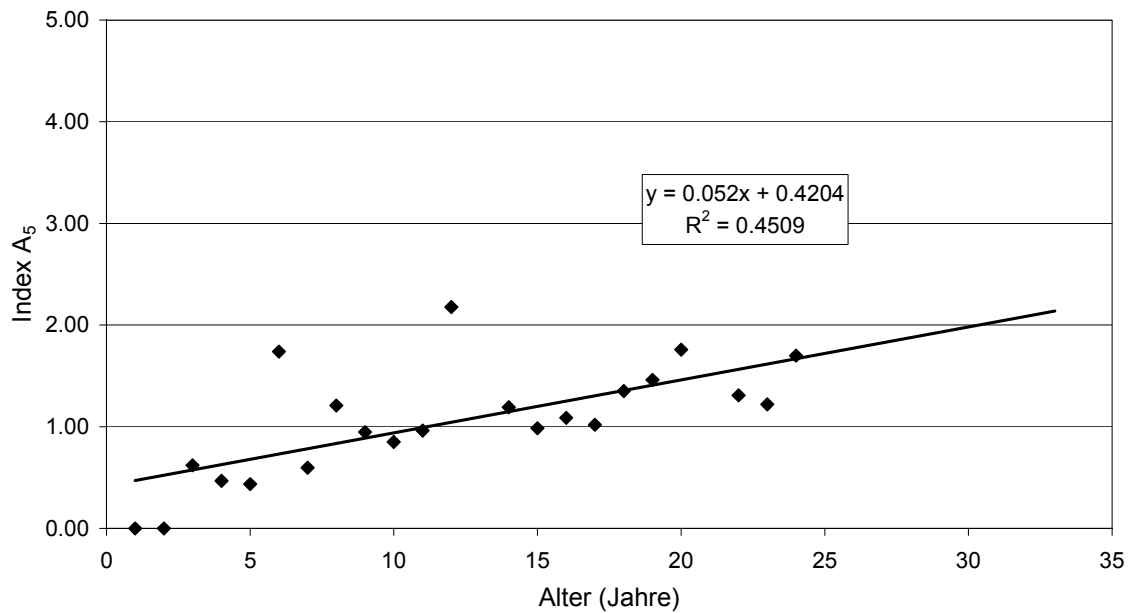


Abb. 43: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für den Index I_{A15} (Flicke) auf Kantonsstrassen der Verkehrslastklasse T3, Kanton B.

5.7.3 Nationalstrassen

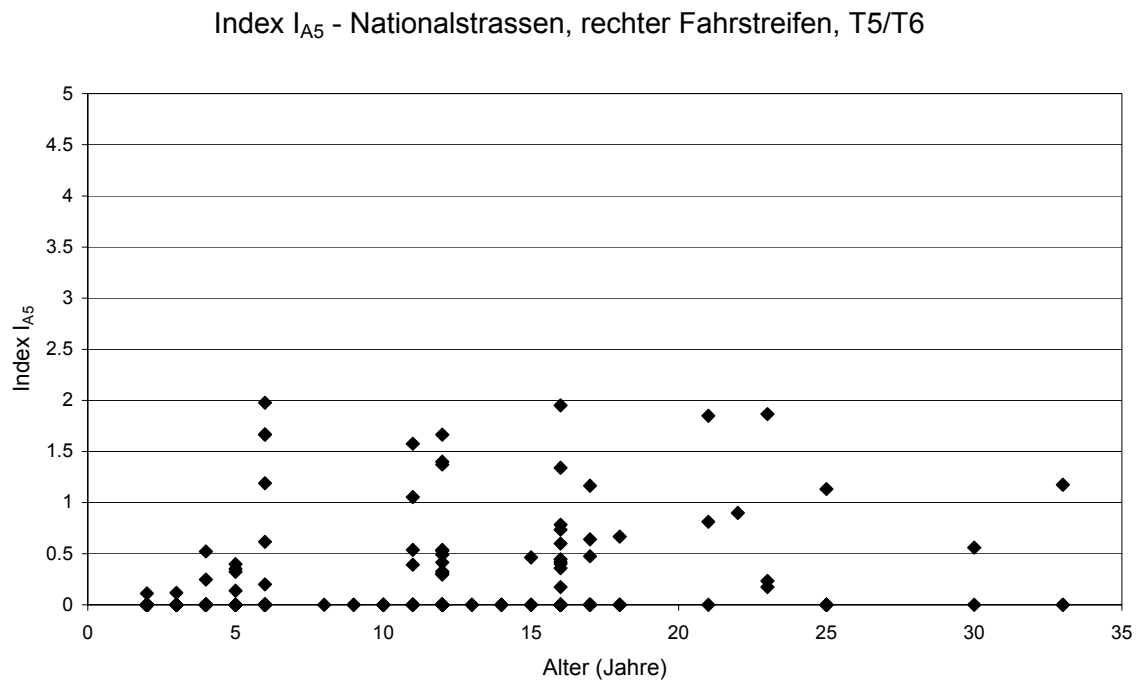


Abb. 44: Aggregierte Abschnittswerte für den Index I_{A5} (Flicke) auf Nationalstrassen der Verkehrslastklassen T5 und T6

6. Verhaltensmodelle: Längsebenheit (Index I2)

6.1 Ausgangslage

Nach der Norm über die Ebenheit von Strassen wird in der Schweiz die Längsebenheit nach der Winkelmessmethode erfasst. Dabei dient die Standardabweichung des Winkelwertes – s_W -Wert in o/oo– als massgebende Grösse für die Charakterisierung der Längsebenheit einer Strecke während der Winkelwert W in o/oo der Beurteilung lokaler Unebenheiten dient. Bei Abnahmemessungen wird der s_W -Wert über eine Auswertungslänge von 250 m bestimmt, für die periodische Zustandserfassung sind andere Auswertungslängen üblich (z.B. 50 m bei Gemeinde- und Kantonsstrassen, 100 m auf Nationalstrassen). Für die Herleitung von Verhaltensmodellen wird deshalb die Standardabweichung des Winkelwertes s_W als Grundlage verwendet. Bei der Bestimmung der massgebenden Längsebenheitswerten für einen "homogenen" Abschnitt wurde der aggregierte Wert verwendet, d.h. der mit der einfachen Standardabweichung addierte Mittelwert.

6.2 Vorgehen

6.2.1 Aufteilung nach Strassenkategorien

Die Auswertung der verfügbaren Daten für die Entwicklung von Verhaltensmodellen erfolgt separat nach der folgenden Gruppierung:

- Gemeindestrassen
- Kantonsstrassen
- Nationalstrassen (Autobahnen)

Die Ergebnisse für die Gruppe der Gemeindestrassen beruhen auf die separate Auswertung der Ortsdurchfahrten von Kantonsstrassen.

Bei der Auswertung der Daten für Kanton B wurde die Modelle ausnahmsweise nicht auf die Standardabweichung des Winkelwertes bezogen sondern auf den Index I2. Dabei erfolgte die Umwandlung aller Werte aufgrund der Kurve für Strassen von Typ HVS nach SN 640 925b.

Die weitere Unterteilung der Modelle erfolgt aufgrund der Voruntersuchungen bezüglich der massgebenden Einflussfaktoren (siehe Kapitel 6.2.3).

6.2.2 Bestimmung der Ausreisser

Ähnlich wie bei den Oberflächenschäden wurde auch bei der Längsebenheit vor Beginn der Auswertung der Daten eine Sichtung der Datensätze auf mögliche "Ausreisser" vorgenommen.

Bei der Festlegung der Grenzlinien für die Längsebenheit wurden die folgenden Kriterien für die Festlegung der oberen und der unteren Grenzlinie berücksichtigt:

- Obere Grenzlinie: die obere Grenzlinie wird definiert durch eine Gerade die von einem s_W -Wert von 1.8 bei 0 Jahren ausgeht durch einen Punkt entsprechend einem s_W -Wert von 3.0 nach 5 Jahren geht. Bei einem s_W -Wert von 3.0 sind deutliche störende Unebenheiten spürbar, die über das bei Ende der im Belagsbau üblichen Garantiezeit von 5 Jahren zulässige Mass hinaus gehen dürften. Tritt ein solcher Zustand auf, dann kann es nicht mehr als eine "normale" Entwicklungserscheinung betrachtet werden. Vielmehr sind die Ursachen, in Einbau- oder Materialfehlern, allenfalls auch in Mängeln bezüglich der Dimensionierung zu suchen.
- Untere Grenzlinie: keine untere Grenzlinie.

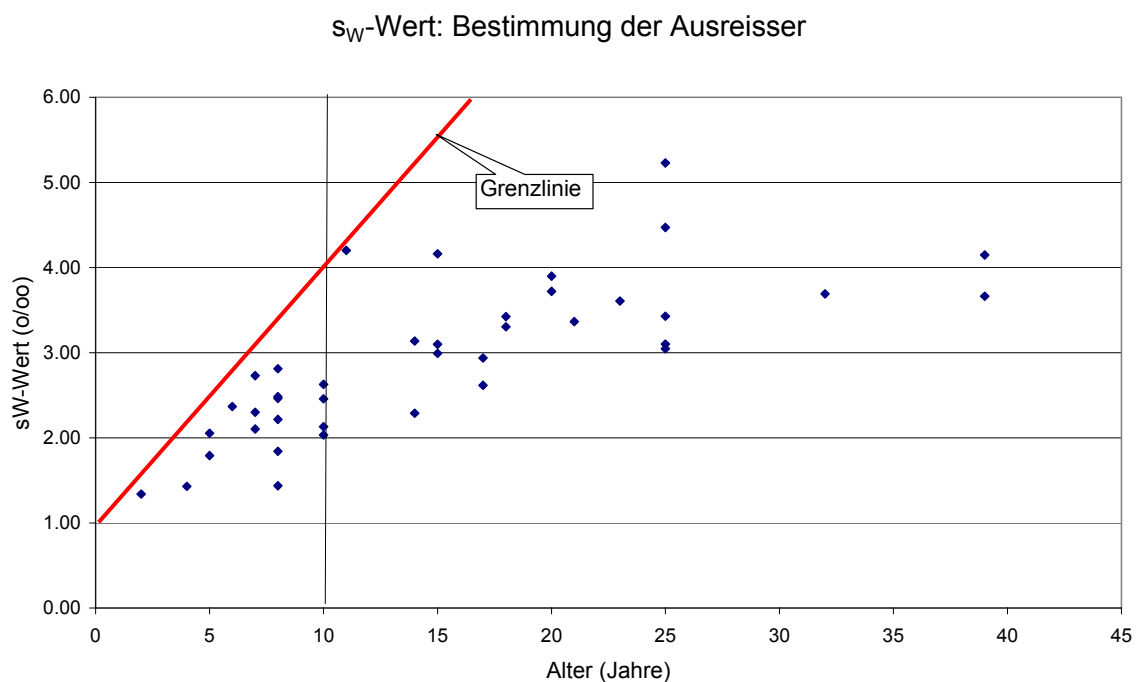


Abb. 45: Darstellung der Grenzlinien für die Bestimmung der Ausreisser bei der Sortierung der Daten für die Auswertung von Verhaltensmodellen bezüglich der Längsebenheit.

6.2.3 Bestimmung der massgebenden Einflussfaktoren

Nach der Definition der Ziele der Forschungsarbeit gilt es Modelle für verschiedene Randbedingungen zu entwickeln. Im Rahmen der Vorauswertung der Datensätze für die Kantonsstrassen wurden die folgenden möglichen Einflüsse untersucht:

- Verkehrsbelastung (Verkehrslastklasse)
- Tragfähigkeit (gemessen am Index I5)
- Höhenlage (in den Abstufungen bis 500 müM, 500 bis 900 müM, über 900 müM).

Diese Voruntersuchung bezog sich aus praktischen Gründen auf die Gesamtheit aller Einzelwerte für den Index I2 (spätere Modellbildung für die Standardabweichung des Winkelwertes s_W) und ohne Berücksichtigung unterschiedlicher Abschnittslängen und beruhte auf der Annahme eines linearen Modells vom Typ:

$$I_2 = A + B \cdot \text{Alter}$$

wobei:

A = Konstante (Anfangswert im Jahr 0)

B = Neigung der Geraden (Wertzunahme pro Jahr)

Tabelle 11 fasst die Ergebnisse der verschiedenen Falluntersuchungen zusammen. Die durch den Korrelationsfaktor R² angedeuteten grossen Streuungen sind teilweise durch bedeutende Unterschiede in der Länge der ausgewerteten Abschnitte begründet.

Kriterium	Konstante	Zunahme/Jahr	R ²
DTV < 5'000	1.3489	0.0162	0.0692
DTV 5'000 bis 10'000	1.0796	0.0206	0.1022
DTV > 10'000	1.3545	0.0136	0.0405
Tragfähigkeit I ₅ , 0 ... 1	1.1176	0.016	0.0728
Tragfähigkeit I ₅ , 1 ... 2	1.4219	0.0185	0.0964
Tragfähigkeit I ₅ , 2 ... 3	1.3987	0.0159	0.0524
Tragfähigkeit I ₅ , 3 ... 4	1.5938	0.01	0.0342
Tragfähigkeit I ₅ , 4 ... 5	1.346	0.0401	0.3713
Höhenlage, bis 500 m	1.4752	0.0078	0.0138
Höhenlage, 500...900	1.2255	0.0193	0.0944
Höhenlage, > 900 m	0.9491	0.0331	0.2433

Tab. 11: Parameter der Modellgleichung (Längsebenheit) für verschiedene Einflussfaktoren

Aufgrund der Anzahl der verfügbaren Datenbestände und der generellen Abhängigkeiten wird die Modellbildung nach Verkehrslastklasse und in Abhängigkeit der Tragfähigkeit (2 Stufen mit Unterteilung bei einem Indexwert I₅ von 3.0).

6.3 Gemeindestrassen

Analog dem Vorgehen bei der Analyse der Modelle für die Hauptgruppen der Oberflächenschäden werden auch bei der Längsebenheit die Ortsdurchfahrten von Kantonsstrassen stellvertretend für die Gemeindestrassen ausgewertet.

Die Auswertung erfolgt getrennt nach Strassen mit genügender Tragfähigkeit (Index I₅ ≤ 3) und solchen mit kritischer oder schlechter Tragfähigkeit (Index I₅ > 3) und nach Verkehrslastklasse. Auf eine Gruppenbildung unter Berücksichtigung der Höhenlage wurde verzichtet, da einerseits pro Verkehrslastgruppe die Anzahl Strecken zu gering gewesen wäre.

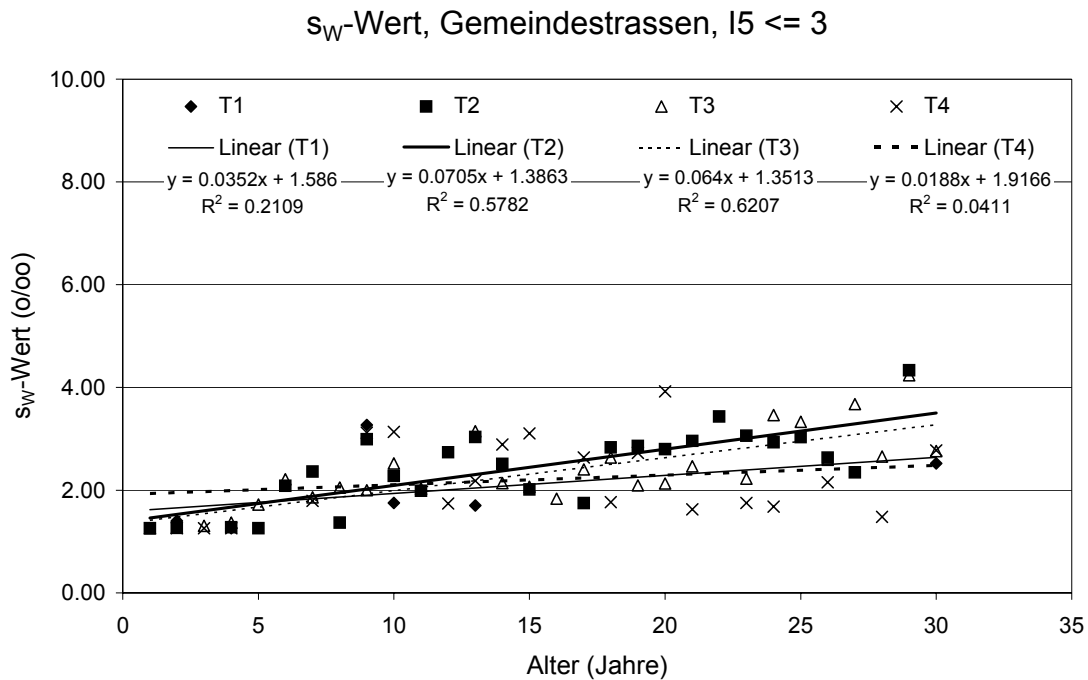


Abb. 46: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für die Längsebenheit (Standardabweichung des Winkelwertes s_w) auf Kantonsstrassen innerorts (im Rahmen der Auswertung den "Gemeindestrassen" gleichgestellt) mit einem Tragfähigkeitsindex I₅ ≤ 3.

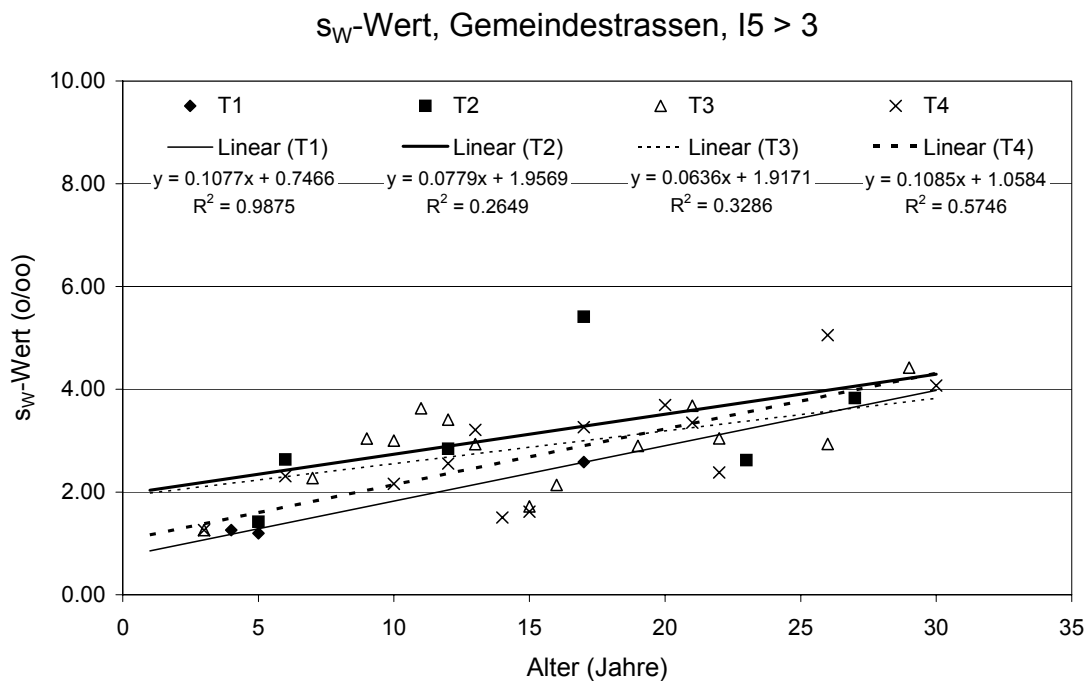


Abb. 47: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für die Längsebenheit (Standardabweichung des Winkelwertes s_w) auf Kantonsstrassen innerorts (im Rahmen der Auswertung den "Gemeindestrassen" gleichgestellt) mit einem Tragfähigkeitsindex I₅ > 3.

6.4 Modelle für Kantonsstrassen

6.4.1 Allgemeine Ebenheitsverhältnisse auf Kantonsstrassen

Der Streubereich der vorhandenen Verhältnisse bezüglich der Längsebenheit ist relativ gross, wie dies durch die Abbildung 48 belegt wird, welche die Verteilung der I2-Werte für das ganze Kantonsstrassennetz (Kanton C mit einem guten Niveau der Ebenheitswerte, mittlerer aggregierter Ebenheitsindex von 1.8 für alle PMS-Abschnitte), bzw. nur für die kantonalen Hauptstrassen (Kanton D mit einem schlechteren Niveau der Ebenheitswerte, mittlerer aggregierter Ebenheitsindex von 3.09 für alle PMS-Abschnitte) aufgezeigt wird.

Besonders deutlich ist der Unterschied zwischen der in der Abbildung 48 gezeigten Verteilung der Ebenheitswerte auf Kantonsstrassen mit den Ergebnissen einer ähnlichen Auswertung für die Nationalstrassen, entsprechend Abbildung 51. Daraus kann geschlossen werden, dass die Veränderung der Längsebenheit über die Zeit bei den Kantonsstrassen grösser sein dürfte als bei den Nationalstrassen.

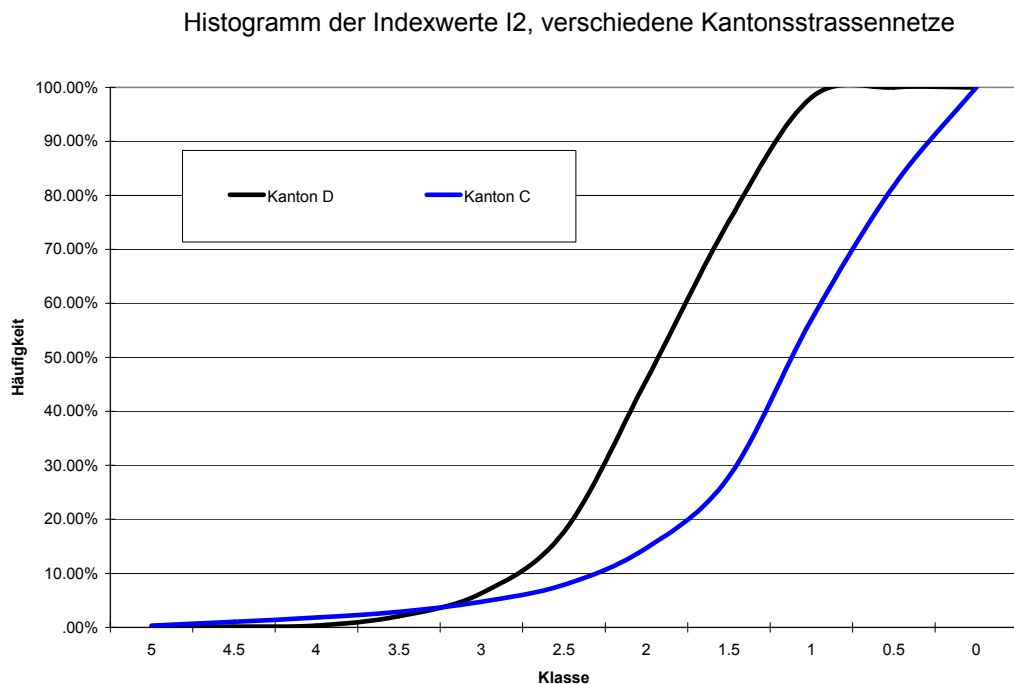


Abb. 48: Summenkurve der Häufigkeiten der Indexwerte I2 auf allen Kantonsstrassen (Kanton C, Kanton D, 50-m Abschnittswerte).

6.4.2 Ergebnisse der Auswertung

Die Auswertung erfolgt getrennt nach Strassen mit genügender Tragfähigkeit (Index $I_5 \leq 3$) und solchen mit kritischer oder schlechter Tragfähigkeit (Index $I_5 > 3$) und nach Verkehrslastklasse. Auf eine Gruppenbildung unter Berücksichtigung der Höhenlage wurde verzichtet, da einerseits pro Verkehrslastgruppe die Anzahl Strecken zu gering gewesen wäre.

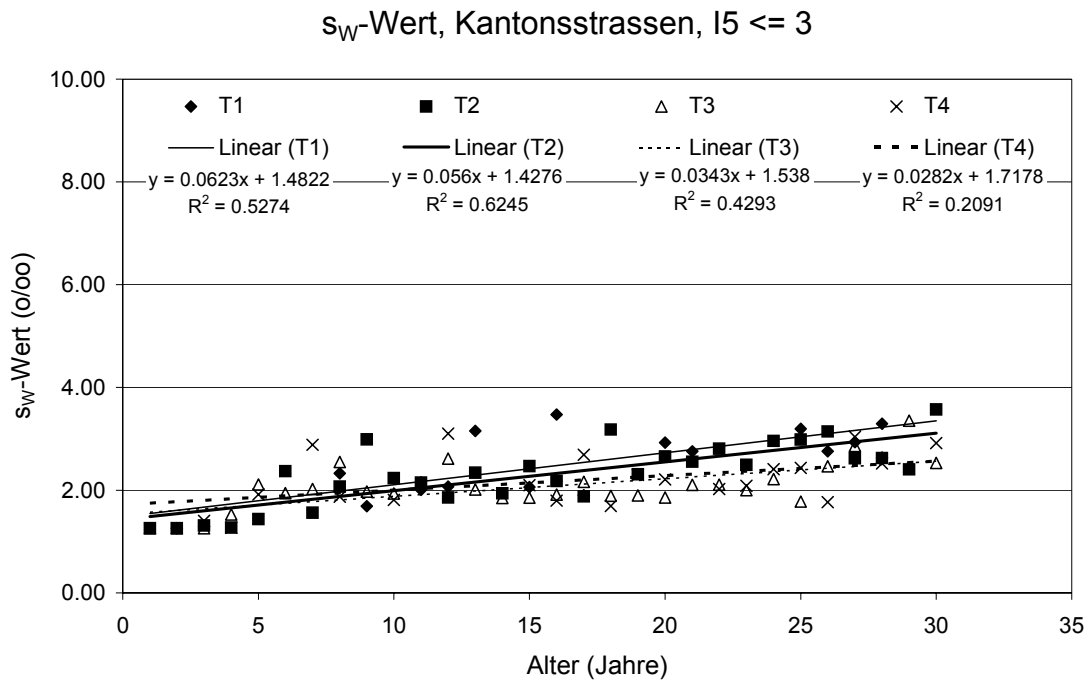


Abb. 49: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für die Längsebenheit (Standardabweichung des Winkelwertes s_W) auf Kantonsstrassen mit einem Tragfähigkeitsindex $I_5 \leq 3$.

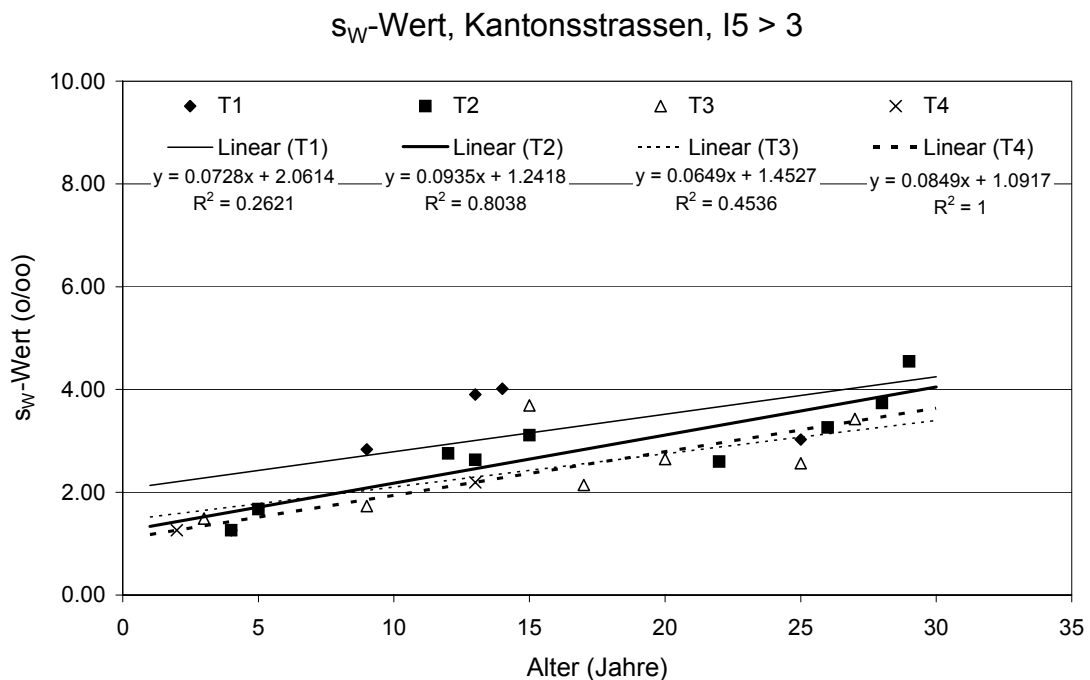


Abb. 50: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für die Längsebenheit (Standardabweichung des Winkelwertes s_W) auf Kantonsstrassen mit einem Tragfähigkeitsindex $I_5 > 3$.

6.5 Modelle für Nationalstrassen

6.5.1 Allgemeine Ebenheitsverhältnisse auf Nationalstrassen

Auf dem schweizerischen Nationalstrassennetz können die Ebenheitsverhältnisse im Allgemeinen als gut bis sehr gut bezeichnet werden. Eine in Abbildung 51 dargestellte Auswertung der im Jahr 2000 durchgeführten Netzaufnahmen auf den Autobahnen (zu beachten: zum Zeitpunkt der Messung und Auswertungen galt noch die Norm SN 640 925a, deshalb gilt bei der Werteskala von Abb. 51 noch ein Indexwert von 5.0 als Bestnote und auch die Umwandlungskurve vom s_W -Wert zum Indexwert entspricht den damaligen Normvorgaben) zeigt, dass der Anteil an Strecken mit schlechten Ebenheitswerten (Indexwerte < 2 , entsprechend $s_W > 4.5$ o/oo) verschwindend klein ist (etwa 2%) und dass 95% der Strecken einen Indexwert von mindestens 3.0, entsprechend einem s_W -Wert von < 3.0 o/oo aufweisen.

Aufgrund der Tatsache dass sich die erwähnte Auswertung auf die 100-m-Auswerteabschnitte bezieht, dürfte ein bedeutender Anteil der schlechteren Werte auch auf den Einfluss von Brückenfugen zurückzuführen sein, welche bekanntlich gerade bei kurzen Auswertungslängen den Abschnittswert durchaus negativ beeinflussen können. Von den übrig bleibenden schlechten Abschnitten gilt es dann noch zu unterscheiden zwischen Strecken deren Ebenheit sich im Laufe der Zeit verschlechtert hat (zum Beispiel N1/N2 Härkingen-Rothrist) und solchen, deren schlechte Ebenheit auf Einbaumängel zurückzuführen ist (zum Beispiel N4 Winterthur-Henggart). Die auf dem Nationalstrassennetz festgestellte Werteverteilung bezüglich der Längsebenheit lässt somit eine sehr langsame Entwicklung der Längsebenheit mit der Zeit erwarten.

Summenkurve Index I2, alle NS

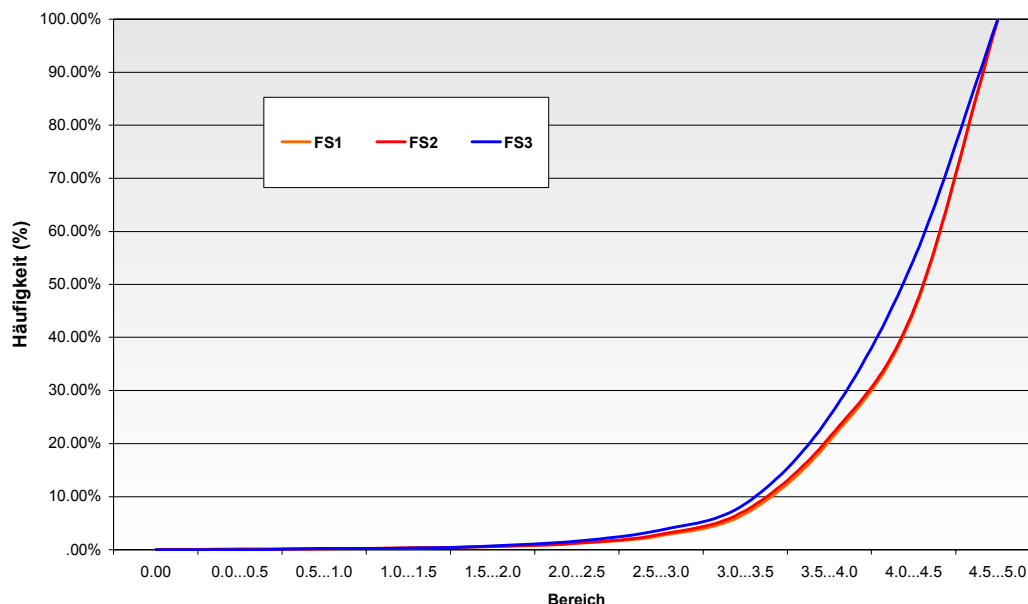


Abb. 51: Summenkurve der Häufigkeiten der Indexwerte I2 auf Nationalstrassen (Netzaufnahme 2000, 100-m Abschnittswerte, Bewertung nach alter Skala) nach Fahrstreifen (FS1: Achsabstand 1.75 = Überholspur, FS2: Achsabstand 5.25 = "rechter" Fahrstreifen, FS3: Achsabstand 8,75 = "dritter" Fahrstreifen, bzw. "Kriechspur")

Nationalstrassen, rechter FS, Entwicklung s_W -Wert

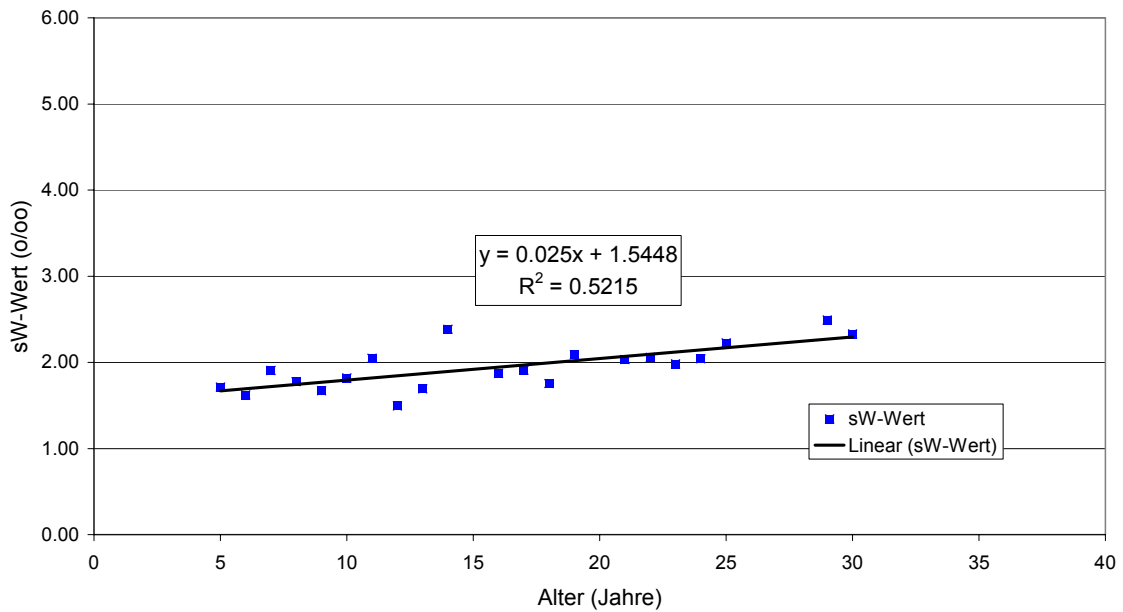


Abb. 52: Modell für die Entwicklung des s_W -Wertes auf dem rechten Fahrstreifen von Nationalstrassen (Grundlage: längengewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für die Nationalstrasse N2 im Teilabschnitt Airolo-Chiasso, Verkehrslastklassen T5 und T6).

Nationalstrassen, linker FS, Entwicklung s_W -Wert

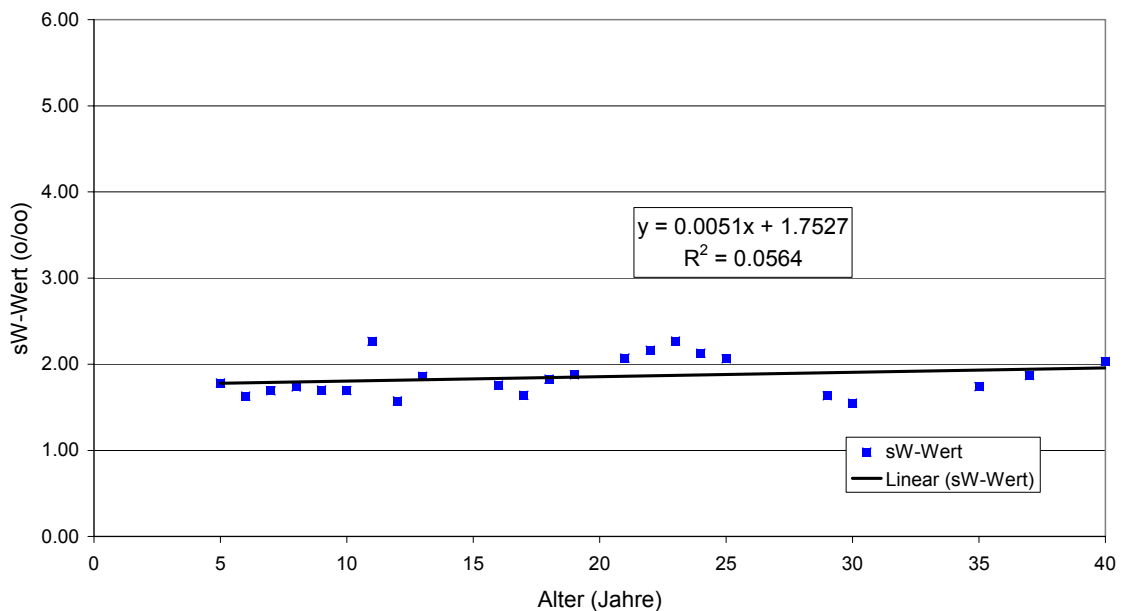


Abb. 53: Modell für die Entwicklung des s_W -Wertes auf dem linken Fahrstreifen von Nationalstrassen (Grundlage: längengewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für die Nationalstrasse N2 im Teilabschnitt Airolo-Chiasso, Verkehrslastklassen T5 und T6).

7. Verhaltensmodelle: Querebenheit (Index I3)

7.1 Ausgangslage

Nach der Norm über die Ebenheit von Strassen wird in der Schweiz die Querebenheit durch die Messung der Abweichung oder der Spurtiefe T unter einer 4-m-Latte erfasst. Die Abnahmewerte für die Querebenheit (4 mm bei Hochleistungsstrassen, 6 mm bei den übrigen Strassen) beziehen sich dabei eher auf den Begriff "Abweichungen" im Sinne von Unregelmässigkeiten der Ausführung, bei Strassen unter Betrieb ist es in erster Linie die eigentliche bleibende Verformung im Sinne der Spurrinnenbildung (allenfalls auch ein übermässiger Abrieb) welche die Querebenheit beeinflusst. Für die manuelle Messung mit der Messlatte bestehen keine Vorschriften bezüglich des Messintervalls. Bei der messtechnischen Erfassung der Querebenheit werden üblicherweise die Spurtiefen in der linken und der rechten Radspur auf Auswertungslängen von 50 oder 100 m gemittelt, wobei das Intervall der erfassten Querprofile im Maximum 10 m beträgt. Für die Herleitung von Verhaltensmodellen wird der jeweilige Maximalwert aus der rechten oder linken Radspur verwendet (Tmax). Bei der Bestimmung der massgebenden Querebenheitswerten für einen "homogenen" Abschnitt wurde der aggregierte Wert verwendet, d.h. der mit der einfachen Standardabweichung addierte Mittelwert.

7.2 Vorgehen

7.2.1 Aufteilung nach Strassenkategorien

Die Auswertung der verfügbaren Daten für die Entwicklung von Verhaltensmodellen erfolgt separat nach der folgenden Gruppierung:

- Gemeinde- und Kantonsstrassen
- Nationalstrassen (Autobahnen)

Der Verzicht auf eine separate Betrachtung von Gemeinde- und Kantonsstrassen bei der Entwicklung von Verhaltensmodellen für die Spurrinnenbildung (Querebenheit, Index I3) ist auf die kategorienunabhängige Wirkung des Schwerverkehrs (massgebender Faktor für die Spurrinnenbildung) zurückzuführen. So zeigt beispielsweise auch die Auswertung der Indizes I1 bis I3 für die Ortsdurchfahrten und die übrigen Teilstrecken verschiedener kantonaler Strassennetze, dass der Unterschied beim Index I3 am geringsten ist.

Bei der Auswertung der Daten für Kanton B wurde die Modelle ausnahmsweise nicht auf die maximale Spurtiefe T bezogen sondern auf den Index I3. Dabei erfolgte die Umwandlung aller Werte aufgrund der Kurve für Strassen von Typ HVS nach SN 640 925b.

Die weitere Unterteilung der Modelle erfolgt aufgrund der Voruntersuchungen bezüglich der massgebenden Einflussfaktoren (siehe Kapitel 7.2.3).

7.2.2 Bestimmung der Ausreisser

Ähnlich wie bei den bisher behandelten Parameter wurde auch bei der Querebeneheit vor Beginn der Auswertung der Daten eine Sichtung der Datensätze auf mögliche "Ausreisser" vorgenommen.

Bei der Festlegung der Grenzlinien für die Längsebeneheit wurden die folgenden Kriterien für die Festlegung der oberen und der unteren Grenzlinie berücksichtigt:

- Obere Grenzlinie: die obere Grenzlinie wird definiert durch eine Gerade die von einer Verformung im Querprofil von 4 mm bei 0 Jahren ausgeht (Grenzwert für Abweichungen im Querprofil für HLS) 0-Punkt ausgeht und durch einen Punkt entsprechend einer Spurtiefe von 16 mm nach 10 Jahren geht. Es wird davon ausgegangen, dass wenn innerhalb von 5 Jahren, d.h. der im Belagsbau üblichen Garantiezeit, ein grösserer Schaden auftritt dieser kein "normaler" Zustand sondern die Folge eines Einbau- oder Materialfehlers sei.
- Untere Grenzlinie: die untere Grenzlinie wird definiert durch eine Gerade die von einer Verformung im Querprofil von 2 mm bei 0 Jahren ausgeht und durch einen Punkt entsprechend einer Spurtiefe von 8 mm nach 40 Jahren geht

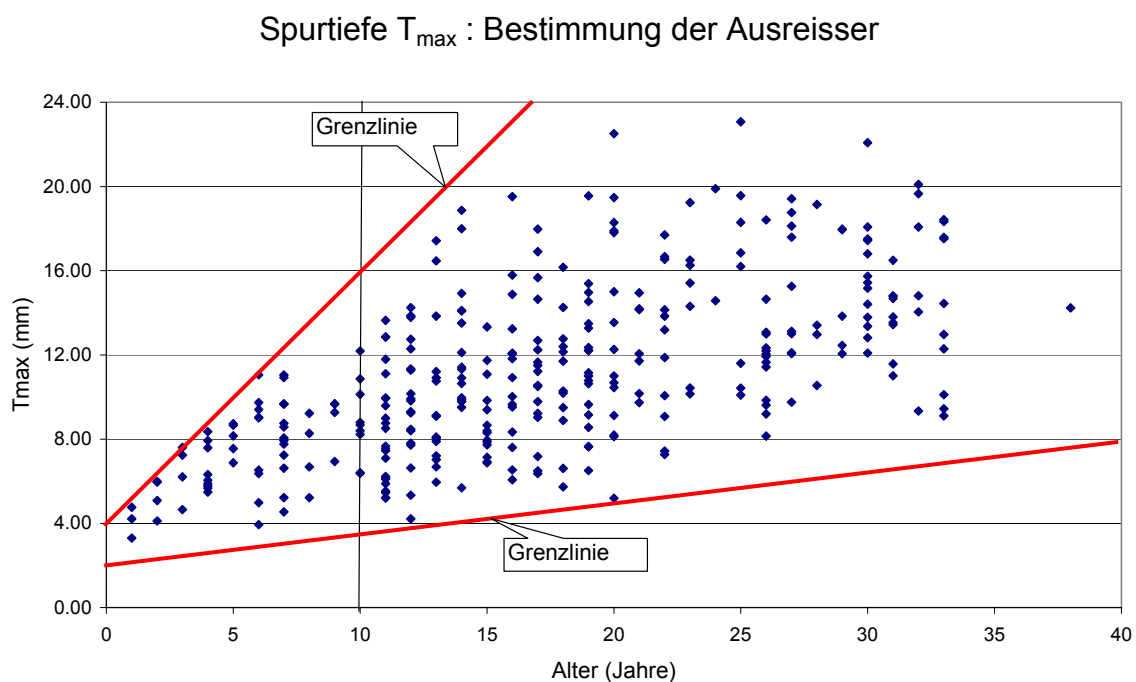


Abb. 54: Darstellung der Grenzlinien für die Bestimmung der Ausreisser bei der Sortierung der Daten für die Auswertung von Verhaltensmodellen bezüglich der Längsebeneheit.

7.2.3 Bestimmung der massgebenden Einflussfaktoren

Nach der Definition der Ziele der Forschungsarbeit gilt es Modelle für verschiedene Randbedingungen zu entwickeln. Im Rahmen der Vorauswertung der Datensätze für die Kantonsstrassen wurden die folgenden möglichen Einflüsse untersucht:

- Verkehrsbelastung (Verkehrslastklasse)
- Tragfähigkeit (gemessen am Index I₅)
- Höhenlage (in den Abstufungen bis 500 müM, 500 bis 900 müM, über 900 müM).

Diese Voruntersuchung bezog sich aus praktischen Gründen auf die Gesamtheit aller Einzelwerte für die Spurtiefe T_{max} und ohne Berücksichtigung unterschiedlicher Abschnittslängen und beruhte auf der Annahme eines logarithmischen Modells vom Typ:

$$T_{\max} = A + B \cdot \text{Log}(\text{Alter})$$

wobei:

A = Konstante (Anfangswert)

B = Neigung der Geraden (Wertzunahme pro Jahr)

Tabelle 12 fasst die Ergebnisse der verschiedenen Falluntersuchungen zusammen. Die durch den Korrelationsfaktor R² angedeuteten grossen Streuungen sind teilweise durch bedeutende Unterschiede in der Länge der ausgewerteten Abschnitte begründet.

Kriterium	Konstante	Zunahme/Jahr	R ²
DTV < 5'000	4.1377	2.2674	0.1799
DTV 5'000 bis 10'000	5.6934	2.0009	0.1768
DTV > 10'000	4.7685	3.0238	0.2134
Tragfähigkeit I ₅ , 0 ... 1	9.9674	-0.0548	0.0001
Tragfähigkeit I ₅ , 1 ... 2	11.988	-0.4216	0.0107
Tragfähigkeit I ₅ , 2 ... 3	12.71	-0.6975	0.0153
Tragfähigkeit I ₅ , 3 ... 4	10.317	0.7317	0.0335
Tragfähigkeit I ₅ , 4 ... 5	15.244	-1.0447	0.0249
Höhenlage, bis 500 m	8.4202	-0.3518	0.0076
Höhenlage, 500...900	11.281	-0.1902	0.0013
Höhenlage, > 900 m	13.456	-0.7398	0.0245

Tab. 12: Parameter der Modellgleichung (Querebenheit) für verschiedene Einflussfaktoren

Aufgrund der Anzahl der verfügbaren Datenbestände und der generellen Abhängigkeiten wird die Modellbildung nach Verkehrslastklasse und in Abhängigkeit der Tragfähigkeit (2 Stufen mit Unterteilung bei einem Indexwert I₅ von 3.0).

7.3 Modelle für Gemeindestrassen

Spurtiefe T_{max} , Gemeindestrassen, $I_5 \leq 3$

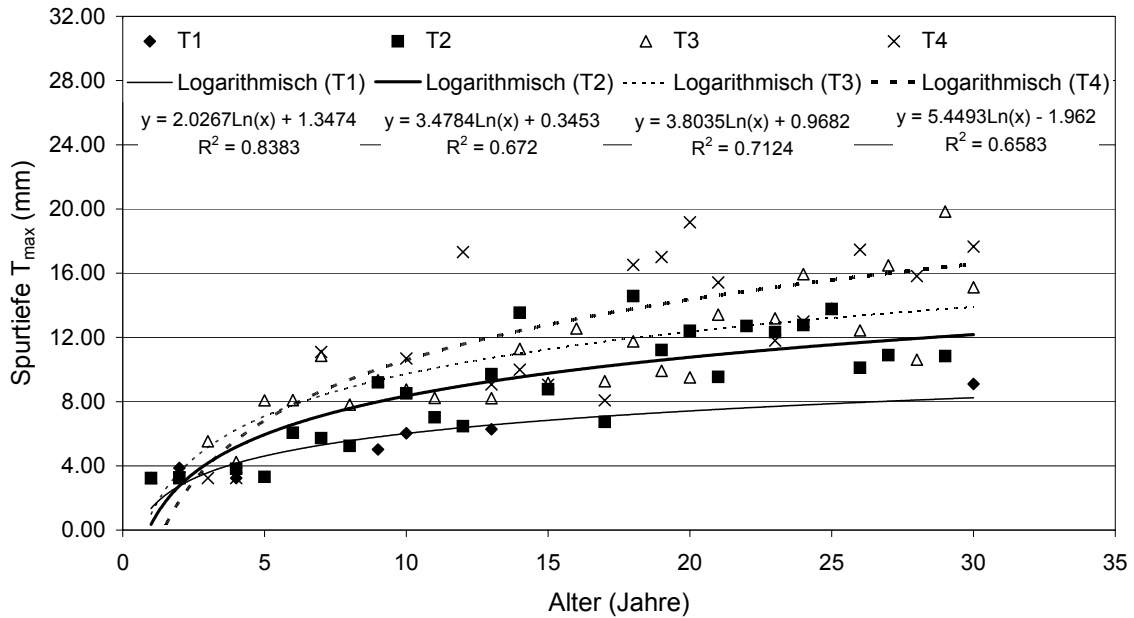


Abb. 55: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für die Querebenheit (maximale Spurtiefe T_{max}) auf Kantonsstrassen innerorts (im Rahmen der Auswertung den "Gemeindestrassen" gleichgestellt) mit einem Tragfähigkeitsindex $I_5 \leq 3$.

Spurtiefe T_{max} , Gemeindestrassen, $I_5 > 3$

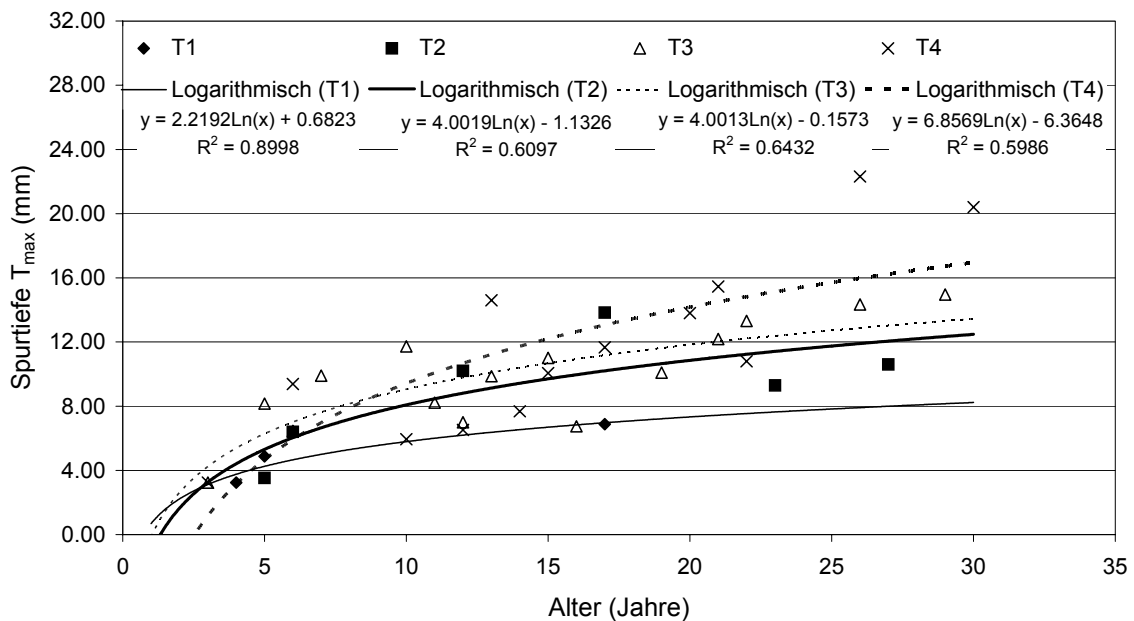


Abb. 56: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für die Querebenheit (maximale Spurtiefe T_{max}) auf Kantonsstrassen innerorts (im Rahmen der Auswertung den "Gemeindestrassen" gleichgestellt) mit einem Tragfähigkeitsindex $I_5 > 3$.

7.4 Modelle für Kantonsstrassen

Spurtiefe T_{max}., Kantonsstrassen, I₅ ≤ 3

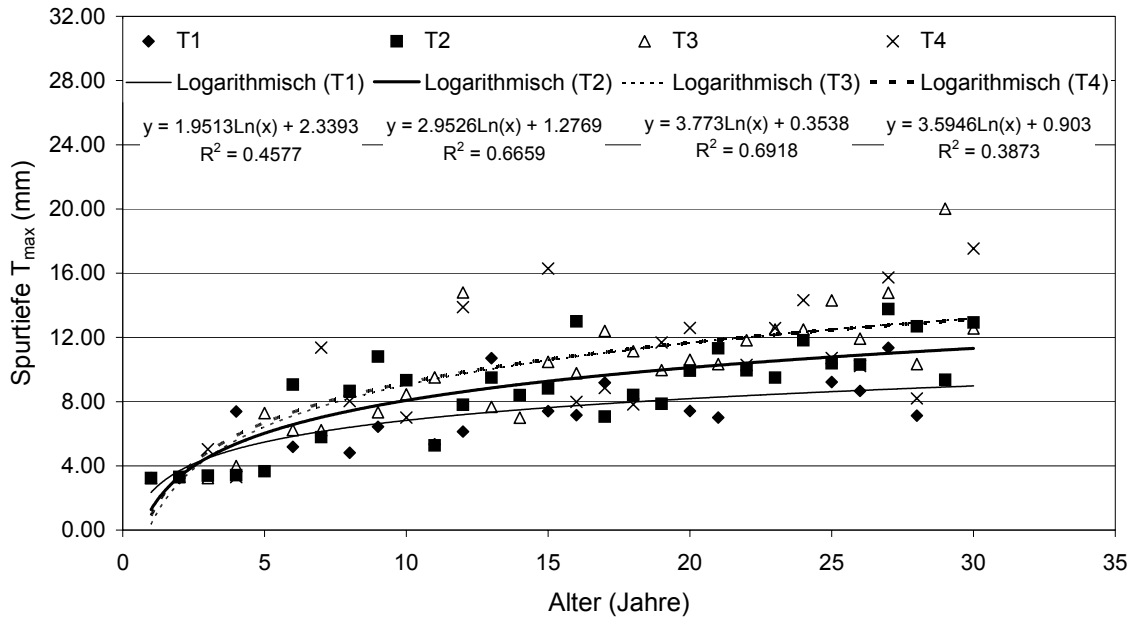


Abb.57: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für die Querebenheit (maximale Spurtiefe T_{max}) auf Kantonsstrassen mit einem Tragfähigkeitsindex I₅ ≤ 3.

Spurtiefe T_{max}., Kantonsstrassen, I₅ > 3

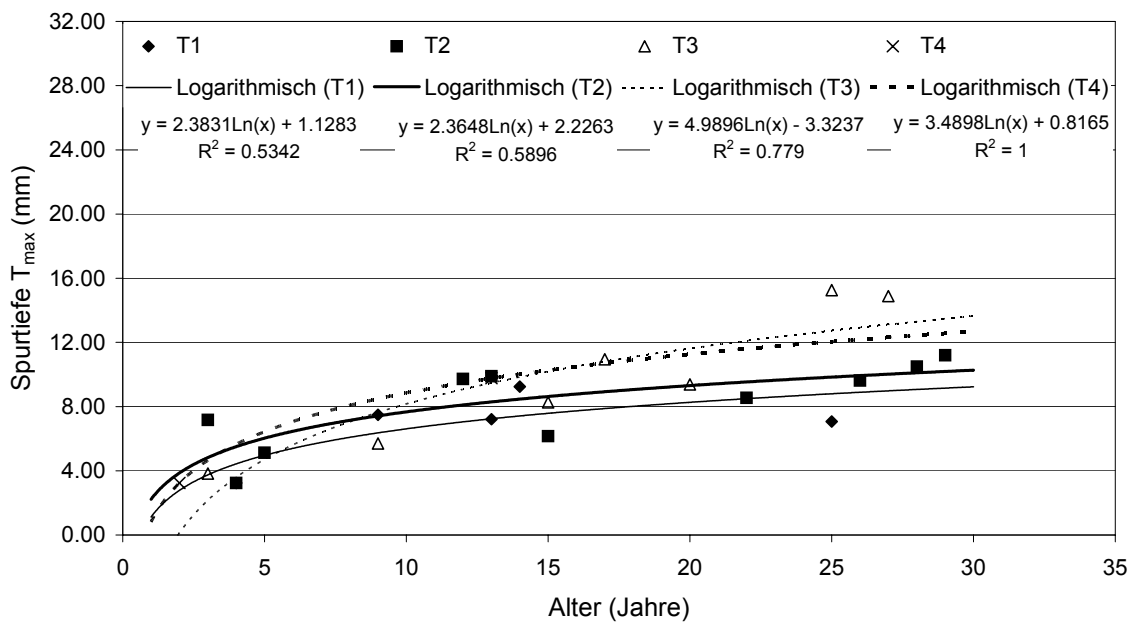


Abb. 58: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für die Querebenheit (maximale Spurtiefe T_{max}) auf Kantonsstrassen mit einem Tragfähigkeitsindex I₅ > 3.

7.5 Modelle für Nationalstrassen

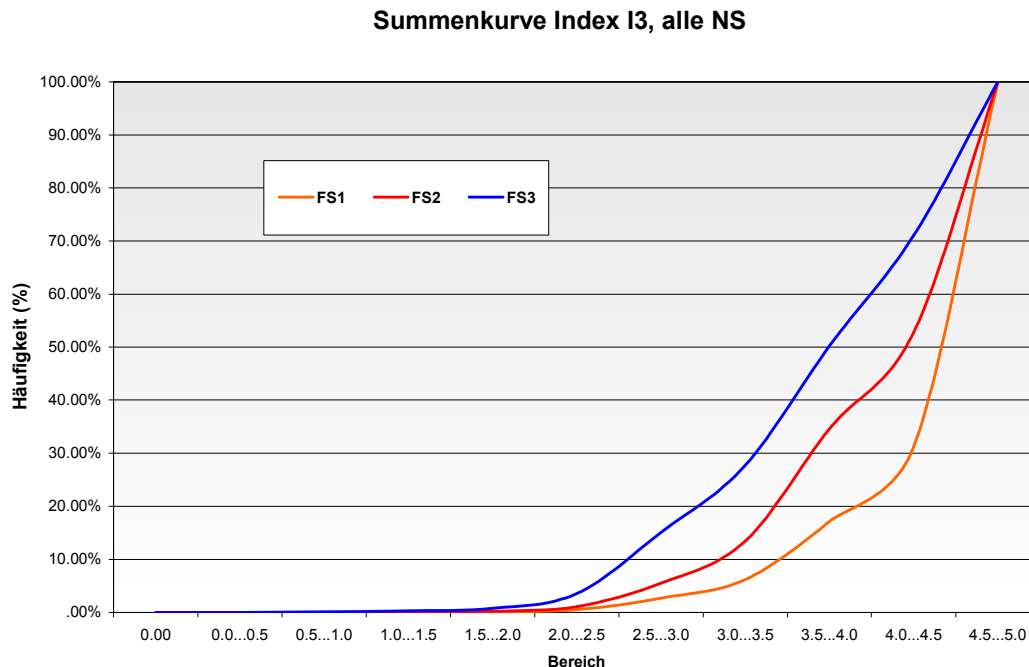


Abb. 59: Summenkurve der Häufigkeiten der Indexwerte I3 auf Nationalstrassen (Netzaufnahme 2000, 100-m Abschnittswerte, Bewertung nach alter Skala) nach Fahrstreifen (FS1: Achsabstand 1,75 = Überholspur, FS2: Achsabstand 5,25 = "rechter" Fahrstreifen, FS3: Achsabstand 8,75 = "dritter" Fahrstreifen, bzw. "Kriechspur")

Die Datenanalyse zur Bestimmung von Verhaltensmodellen für die Spurrinnenbildung auf Autobahnen erfolgte aufgrund der Daten der Nationalstrasse N2 im Kanton Tessin auf der Teilstrecke von Airolo nach Chiasso. Dieser Autobahnabschnitt hat eine Verkehrsbelastung der Klassen T5 und T6, weist neben den üblichen Fahrstreifen auch etliche km Kriechspur auf und war bezüglich der Art und dem Alter der Deckschichten gut dokumentiert.

Das Vorgehen für die Datenaufbereitung war gleich wie bei den Kantonsstrassen, d.h. es wurden nach der Abschnittslänge gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" der aggregierten Abschnittswerte gebildet, und diese mittels Regressionsanalyse mit der Vorgabe eines logarithmischen Modells analysiert.

Die abgeleiteten Modelle sind für Autobahnen der Verkehrslastklassen T5 und T6 gültig und nach folgender Typologie des Fahrstreifens gegliedert:

- Rechter Fahrstreifen (der äusserste rechte Fahrstreifen, ohne Kriechspuren bei grösserer Steigung)
- Linker Fahrstreifen (darunter kann auch der "dritte" Fahrstreifen in der Ebene verstanden werden)
- Kriechspuren (rechts angeordnete Zusatzfahrstreifen auf Steigungsstrecken)

Die Graphiken zur Datenauswertung folgen in den Abbildungen 60 bis 62.

Nationalstrassen, linker FS, Entwicklung Spurtiefe Tmax

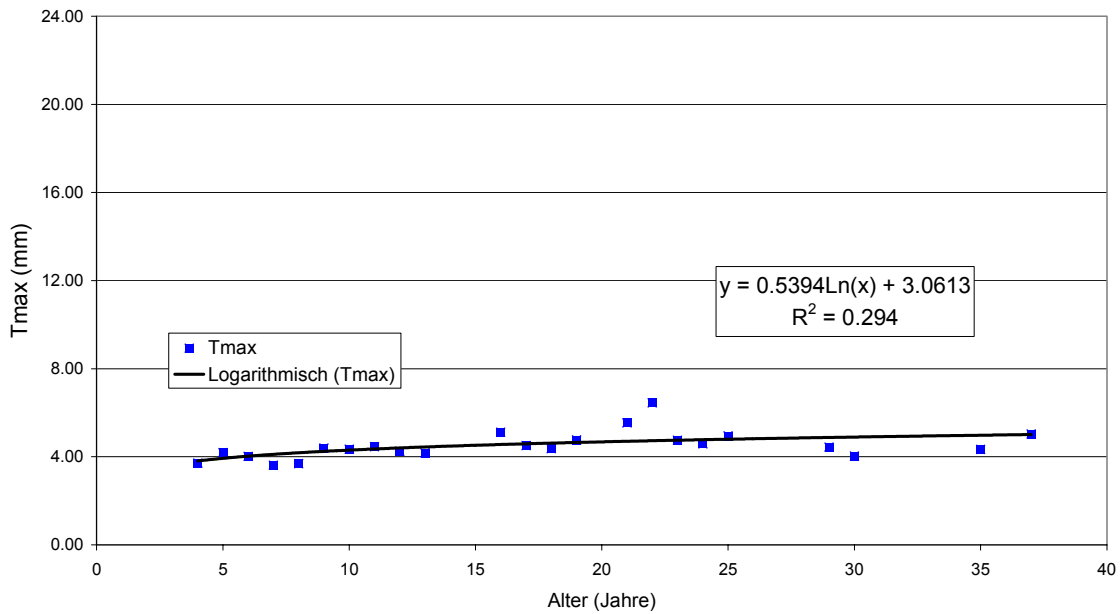


Abb. 60: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für die Querebenheit (maximale Spurtiefe T_{max}) auf dem linken Fahrstreifen von Nationalstrassen im Teilabschnitt Airolo-Chiasso, Verkehrslastklassen T5 und T6.

Nationalstrassen, rechter FS, Entwicklung Spurtiefe Tmax

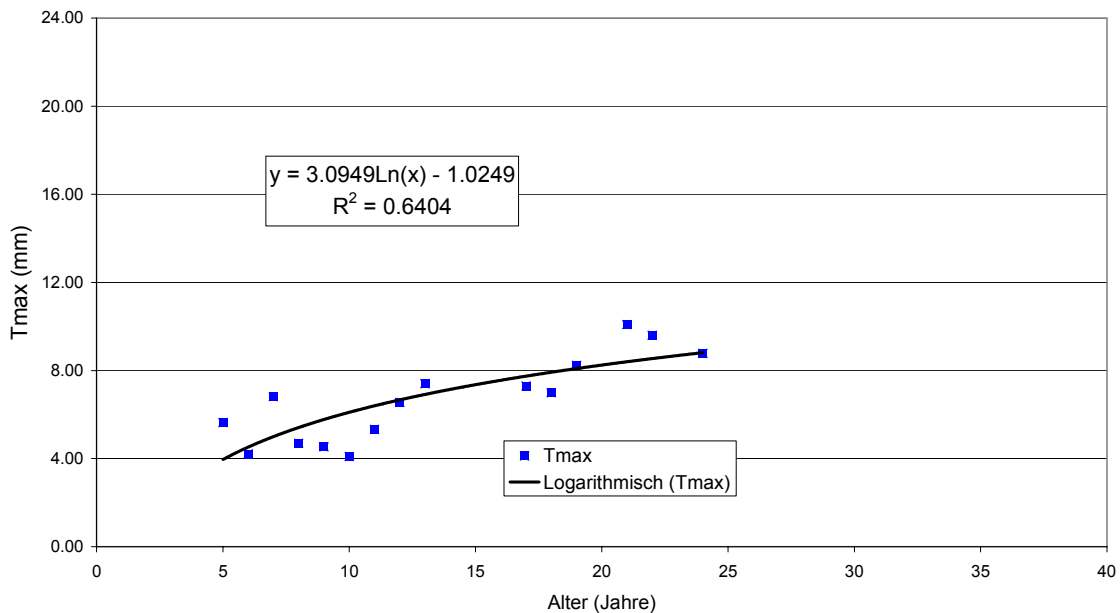


Abb. 61: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für die Querebenheit (maximale Spurtiefe T_{max}) auf dem rechten Fahrstreifen von Nationalstrassen im Teilabschnitt Airolo-Chiasso, Verkehrslastklassen T5 und T6.

Nationalstrassen, "Kriechspur", Entwicklung Spurtiefe Tmax

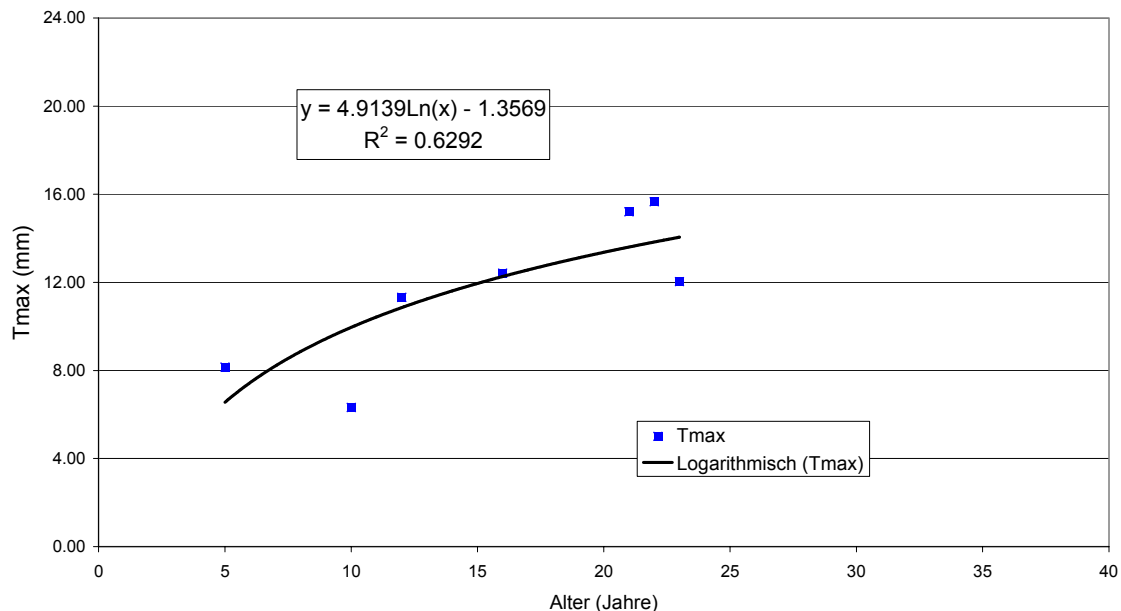


Abb. 62: Gewichtete "Jahrgangsmittelwerte" für die Querebenheit (maximale Spurtiefe T_{\max}) auf den Kriechspuren von Nationalstrassen im Teilabschnitt Airolo-Chiasso, Verkehrslastklassen T5 und T6.

7.6 Streuung der Ergebnisse auf Nationalstrassen

Einen Hinweis auf den möglichen Streubereich der Ergebnisse bezüglich Verhaltensmodelle für die Spurrinnenbildung (indirekt für den Index I3) liefert die in Kapitel 2.2.5 erwähnte Studie über Verhaltensmodelle der Querebenheit aufgrund der Auswertung von Daten der N13 [2].

Bei der Datenauswertung von etwa 170 "homogenen Abschnitten" (homogen bezüglich Alter und Art der Deckschicht) ergaben sich in einer ersten provisorischen Analyse drei mögliche Verhaltenstrends entsprechend den Kurven A, B und C in Abbildung X. Infolge einer weiteren Sichtung der Daten konnte die Gruppe C den zwei einzigen von verbliebenen Abschnitten mit Betonbelag zugeordnet werden, die Gruppe B zwei Arten der Deckschicht, welche insgesamt ca. 80 % der gesamten betrachteten Streckenlängen von 2 x 125 km betrafen und die Gruppe A weitere 10 verschiedene Beläge die vereinzelt (meist im Rahmen einer – provisorischen – Massnahme) zur Anwendung kamen. Aufgrund des skizzierten Trends kann die Gruppe A mit der Auswahl an Deckschichten gleichgesetzt werden, deren Verhalten als Misserfolg zu werten ist.

Die Materialien der Gruppe B entsprechen den beiden Belagsorten die damals (1989-1992) jeweils auf den Tal- oder den Berstrecken der N 13 eingesetzt wurden und deren Verhalten als repräsentativ für den "Normalfall" angesehen werden kann.

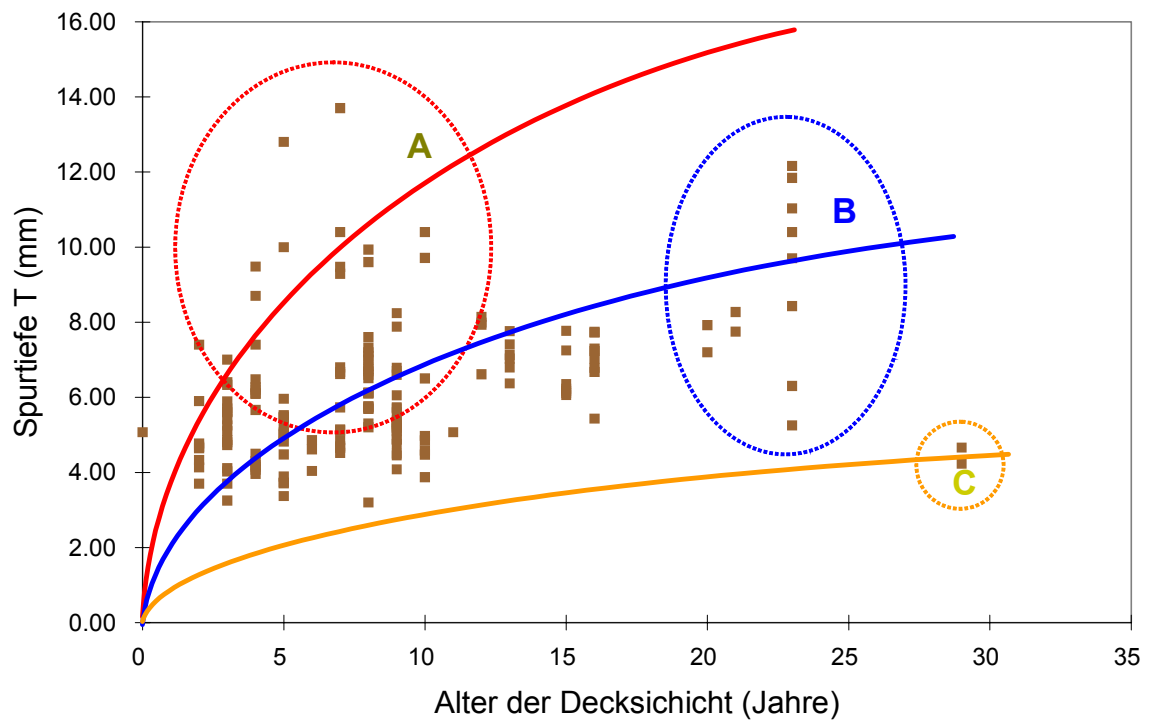


Abb. 63: Streuung der Ergebnisse der Spurrinnenbildung verschiedener Belagsarten auf der Nationalstrasse N13.

8. Verhaltensmodelle: Griffigkeit (Index I4)

8.1 Allgemeines

Wie die Auswertung der Fachliteratur gezeigt hat, haben sich verhältnismässig wenige Autoren mit der Modellierung der zeitlichen Entwicklung der Griffigkeit auseinandergesetzt. Die zeitliche Entwicklung der Griffigkeit ist in den letzten Jahren im deutschsprachigen Raum durch drei Untersuchungen behandelt worden. Die in der Schweiz durchgeführte Forschungsarbeit, welche sich im wesentlichen auf Archivdaten der Griffigkeitsmessungen der ETH Zürich gestützt hat, brachte wohl aufgrund einer ungenügenden Datenlage ein insgesamt unbefriedigendes Ergebnis; d.h. es konnten bei dieser Arbeit keine Verhaltensmodelle vorgeschlagen werden.

Bei der Entwicklung praktisch brauchbarer Verhaltensmodelle stellt sich auch die Frage nach der erfassten Messgrösse, bzw. dem daraus abgeleiteten Indexwert. In der Schweiz ist seit über 30 Jahren die Messmethode mit dem Skiddometer und dem AIPCR-Messreifen gebräuchlich und normiert. Der seit gut 10 Jahren neu eingeführte Stuttgarter Reibungsmesser ist vom Messprinzip her gesehen mit dem Skiddometer weitgehend identisch. Die grösste zusammenhängende Menge von Griffigkeitsdaten in der Schweiz wurde aber im Jahr 2001 anlässlich der netzweiten Erfassung der Griffigkeit auf dem Nationalstrassennetz mit dem SCRIM-Gerät erhoben (Ergebnisübersicht in Abb. 64).

Schliesslich sei noch auf die grössere Unsicherheit bei der Festlegung von Anfangswerten der Griffigkeit hingewiesen. Diese Unsicherheit ist einerseits dadurch bedingt, dass es keine eigentliche "Qualitätsanforderungen" bezüglich Griffigkeit gibt – die verlangten Normwerte richten sich nach dem unteren Bereich der Qualitätsskala und dienen in erster Linie dazu ungenügende Griffigkeitsverhältnisse zu vermeiden – und andererseits durch die temporäre Minderung der Griffigkeitswerte neuer Beläge durch den Bindemittelfilm, welche die Zuschlagstoffe an der Oberfläche noch sehr stark umhüllt. Einen Hinweis auf einen möglichen "mittleren" Anfangswert liefert eine österreichische Untersuchung welche für die Schlupfmessung mit dem SRM-Gerät bei 60 km/h einen Griffigkeitsbeiwert von gut 0.80 zeigt, welcher ungefähr einem Wert von min. 0.50 bei der Blockmessung entspricht (Abb. 66).

Für die Untersuchungen stehen Daten aus dem Nationalstrassennetz zur Verfügung, welche 2001 mittels Messung der Seitenkraftreibung bei 80 km/h erhoben wurden und andererseits die Ergebnisse von zwei Serien von Griffigkeitsmessungen mit dem Skiddometer bei 40 km/h auf Strassen der Stadt Genf, welche im Mittel 12 Jahre zeitlich auseinander liegen.

8.2 Teilanalyse Nationalstrassen

Die Ergebnisse der ZEB-Griffigkeit 2001 auf dem Nationalstrassennetz bestätigen die auf deutschen Autobahnen gemachten Feststellungen, wonach das Griffigkeitsniveau auf dem Überholfahrstreifen deutlich besser ist als auf dem rechten Fahrstreifen. Hier bietet sich nun die Gelegenheit gezielter auf den Einfluss der Verkehrsbelastung einzugehen, als dies in Fall der deutschen Studie praktiziert wurde. Zudem hat sich im Vergleich mit Daten aus anderen Ländern gezeigt, dass die Griffigkeitswerte auf dem Netz der Nationalstrassen auf einem sehr hohen Niveau liegen.

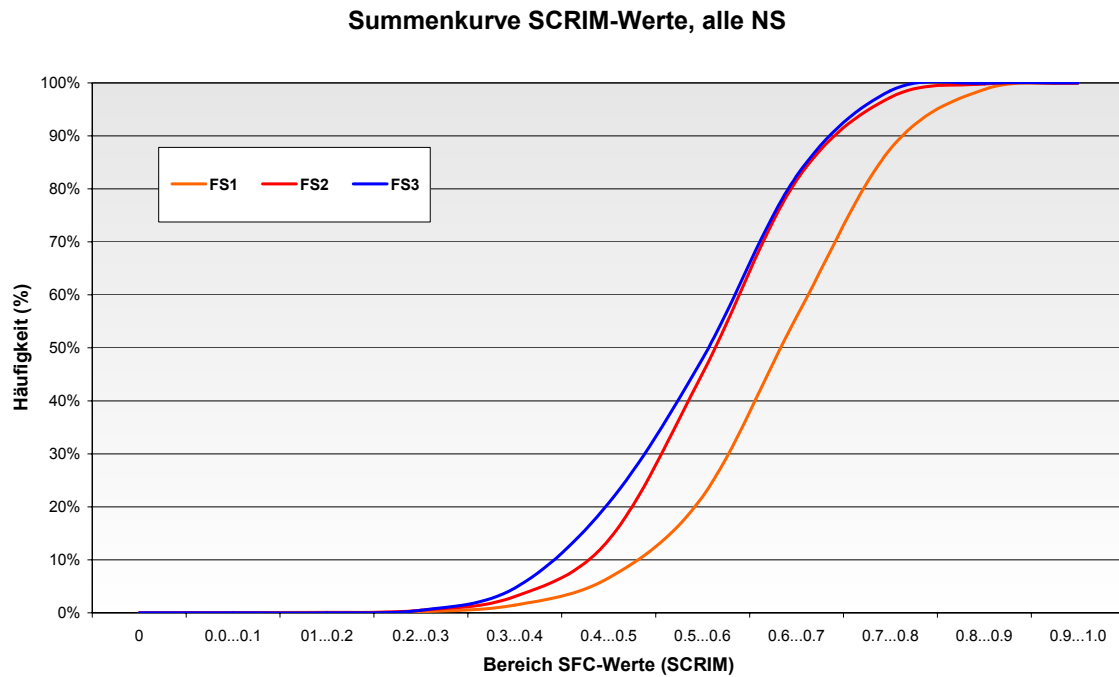


Abb. 64: Summenkurve der SKR-Werte bei 80 km/h. nach Fahrstreifen (Netzaufnahme 2001, 100-m Abschnittswerte) nach Fahrstreifen (FS1: Achsabstand 1.75 = Überholspur, FS2: Achsabstand 5.25 = "rechter" Fahrstreifen, FS3: Achsabstand 8,75 = "dritter" Fahrstreifen, bzw. "Kriechspur")

Griffigkeit: Vergleich CH-Ergebnisse mit EU Strassen (F, D, B)

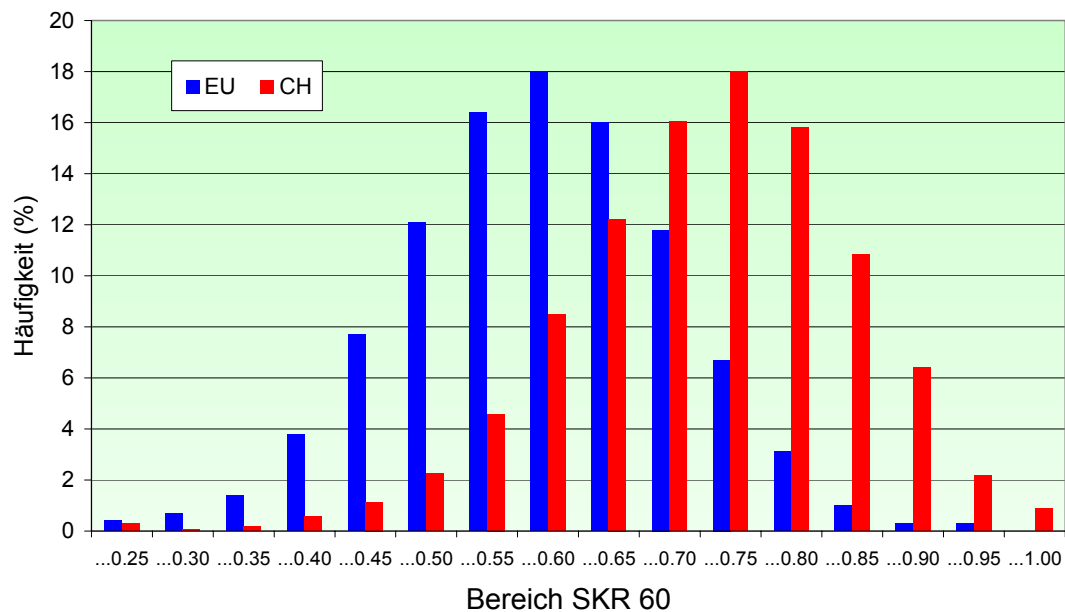


Abb. 65: Vergleich von Daten aus dem Nationalstrassennetz mit einem Hintergrund von 150'000 km Strassen aus Frankreich, Deutschland und Belgien

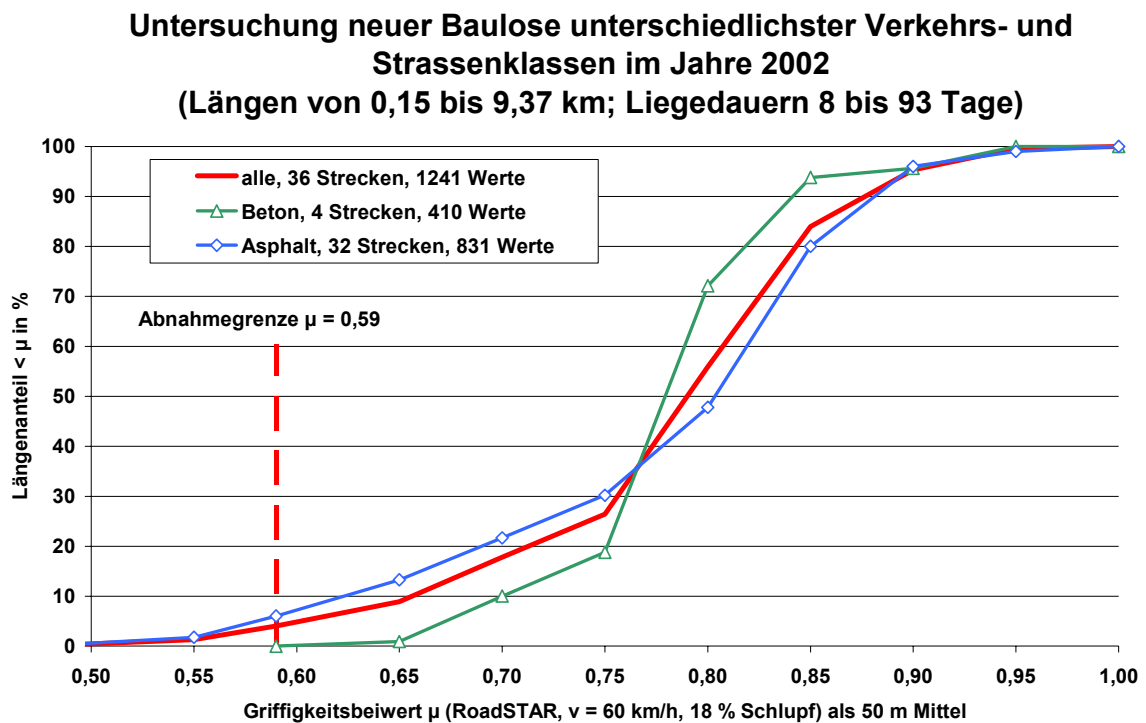


Abb. 66: Griffigkeitswerte neuer Beläge in Österreich (Quelle: Referat H. Tiefenbacher, DACH-PMS-Meeting 2003 Rapperswil)

8.3 Modellbildung gemäss deutschen Forschungsergebnissen

8.3.1 Untersuchungen Versuchsstrecke A70 Bamberg [79]

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Langzeitverhalten der Griffigkeit auf der Versuchsstrecke Bamberg wurden in Kapitel 3.4.4 besprochen. Abb. 67 zeigt eine Übersicht der Ergebnisse mit dem Verlauf der mittleren Kurven für den linken und rechten Fahrstreifen sowie den Streubereich mit dem günstigsten und ungünstigsten Kurvenverlauf für den rechten Fahrstreifen.

8.3.2 Untersuchungen Netz der deutschen Bundesautobahnen [78]

Bei der Verwendung der Ergebnisse aus der netzweiten Zustandserfassung auf den Bundesautobahnen konnten unter anderem auch für die Griffigkeit Verhaltensmodelle hergeleitet werden. Die vorgeschlagenen Modelle sehen einerseits eine Unterscheidung nach verschiedenen Arten der Deckschichten vor, andererseits eine solche nach dem betrachteten Fahrstreifen. In Bezug auf den letztgenannten Parameter wurde bei Auswertung nach dem Hauptfahrstreifen und den "übrigen Fahrstreifen" unterschieden, wobei die so genannten Überholfahrstreifen den grössten Anteil in dieser Gruppe beanspruchen. Bezüglich der Zuweisung der Verkehrswerte wurde hingegen keine auf die Fahrstreifen bezogene Betrachtung angewendet und es wurde für alle Fahrstreifen die Verkehrsbelastung der entsprechenden Richtungsfahrbahn zugeordnet (Abb. 68).

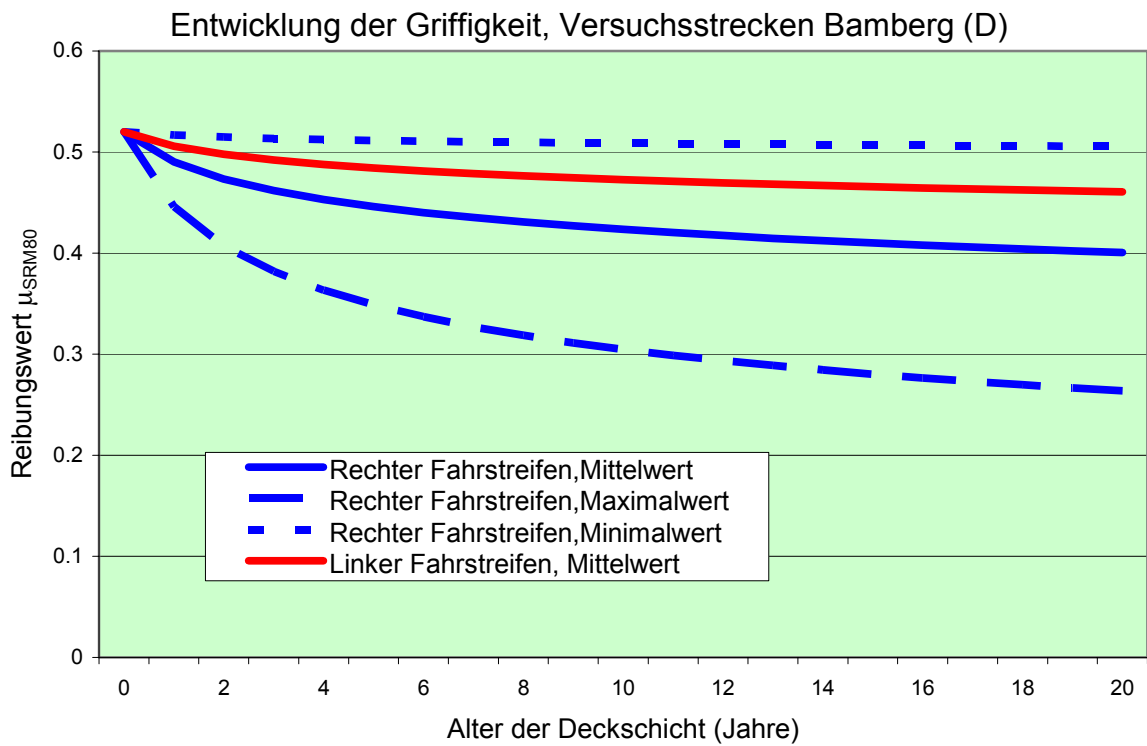


Abb. 67: Verhaltensmodelle Griffigkeit aus der Versuchsstrecke Bamberg [79]

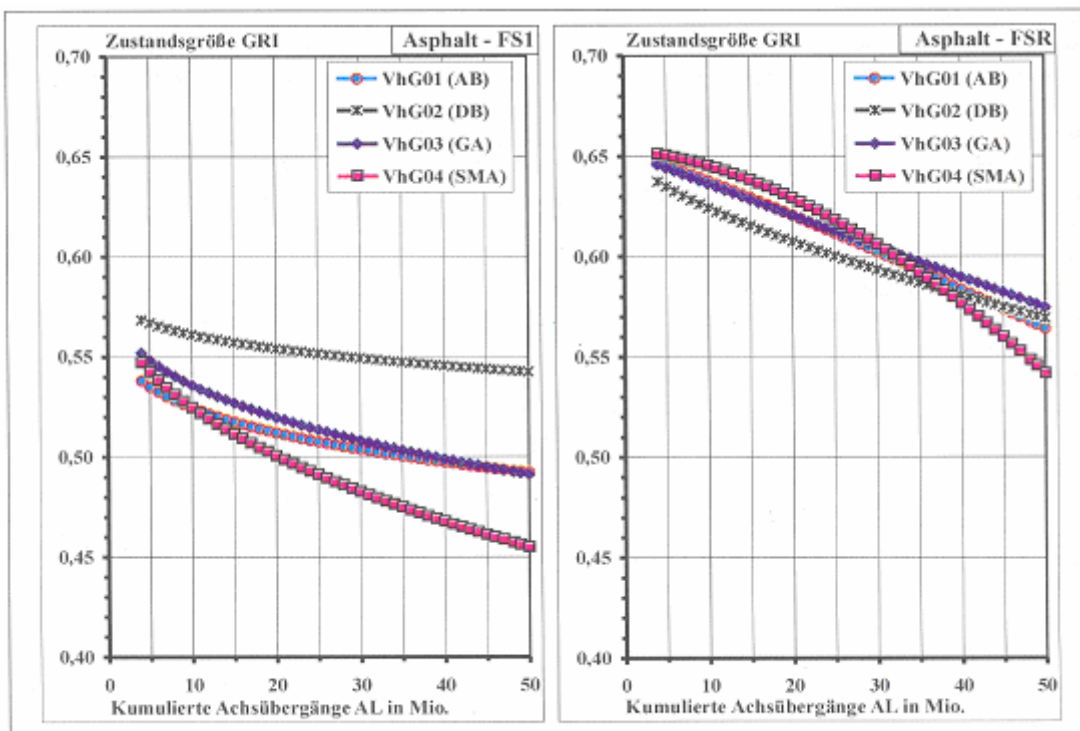


Abb. 5.91b: Standardverhaltensfunktionen für die Griffigkeit GRI und die verhaltenshomogenen Gruppen (VhG) bei Asphaltdecken

Abb. 68: Verhaltensmodelle für die Griffigkeit aus der Auswertung deutscher Autobahnen [78]

8.4 Modelle für Nationalstrassen

Beide deutsche Untersuchungen weisen klar auf die deutlich grössere Abnahme der Griffigkeitswerte auf dem rechten Fahrstreifen. Dies ist gleichzeitig ein klarer Hinweis darauf, dass der Schwerverkehr, welcher vornehmlich den rechten Fahrstreifen befährt, auch im Falle der Griffigkeit der Hauptverursacher für die Schadenentwicklung darstellt, wie dies auch durch die Ergebnisse des europäischen Forschungsprojektes TROWS festgestellt wurde [20]. Dies lässt sich auch dadurch belegen, dass der übrige Verkehr von Personenwagen, bei den für Autobahnen üblicherweise vorkommenden Verkehrsbelastungen eine relativ gleichmässige Verteilung auf beide Fahrstreifen aufweist (Streubereich zwischen 40 und 60%), wie Untersuchungen in der Schweiz [80] gezeigt haben, deren Ergebnisse in Abbildung 69 dargestellt sind.

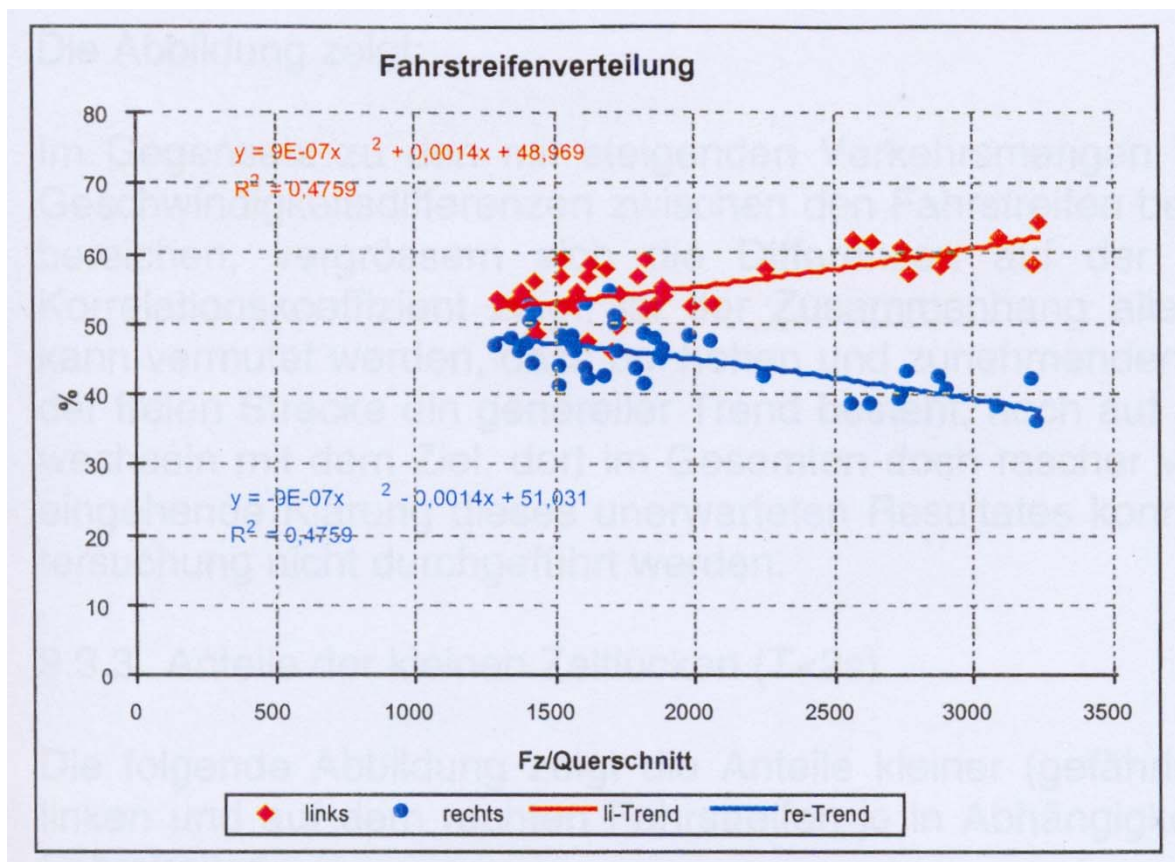


Abb. 69: Verkehrsverteilung auf die Fahrstreifen [80]

Unter diesen Voraussetzungen gilt es also festzustellen, ob die Ergebnisse aus Deutschland auf dem Nationalstrassennetz bestätigt werden können. Die Graphiken der entsprechenden Auswertungen sind in den Abbildungen 70 und 71 dargestellt. In Abbildung 72 werden die aus der Auswertung der Nationalstrassen hervorgegangenen Kurven mit denjenigen der Versuchsstrecke Bamberg verglichen. Zu diesem Zweck wurden auf der x-Achse die kumulierten äquivalenten Verkehrsbelastungen aufgetragen und die SRM-Werte der Versuchsstrecke Bamberg auf SKR-Werte umgerechnet.

Nationalstrassen, rechter Fahrstreifen, Entwicklung SCRIM 80

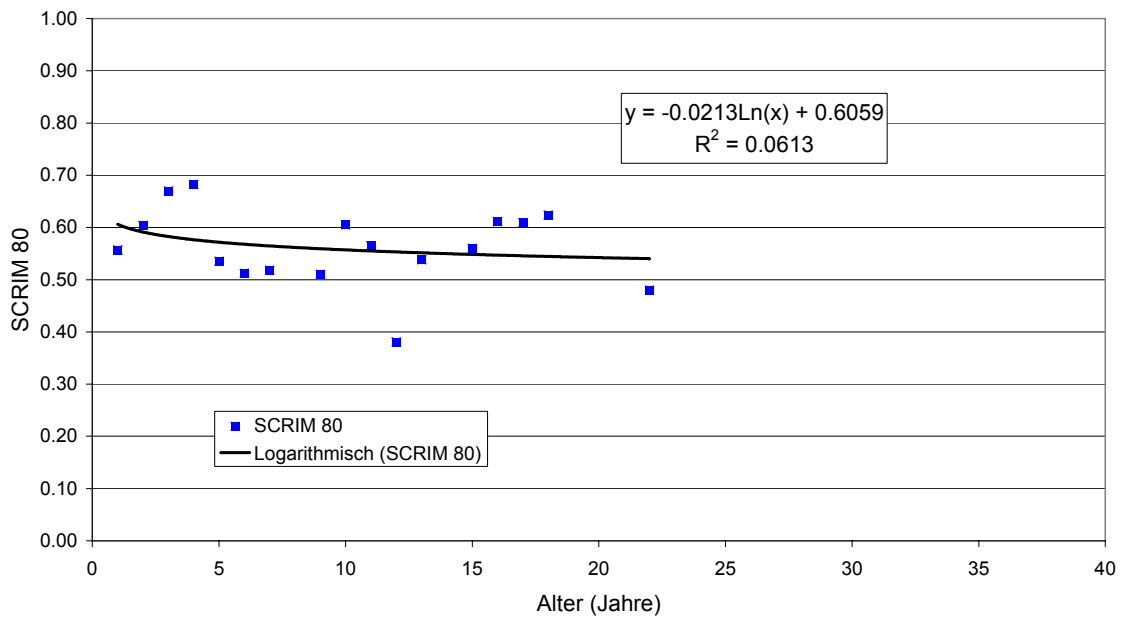


Abb. 70: Verlauf der Griffigkeitswerte auf dem rechten Fahrstreifen der Nationalstrassen

Nationalstrassen, linker Fahrstreifen, Entwicklung SCRIM 80

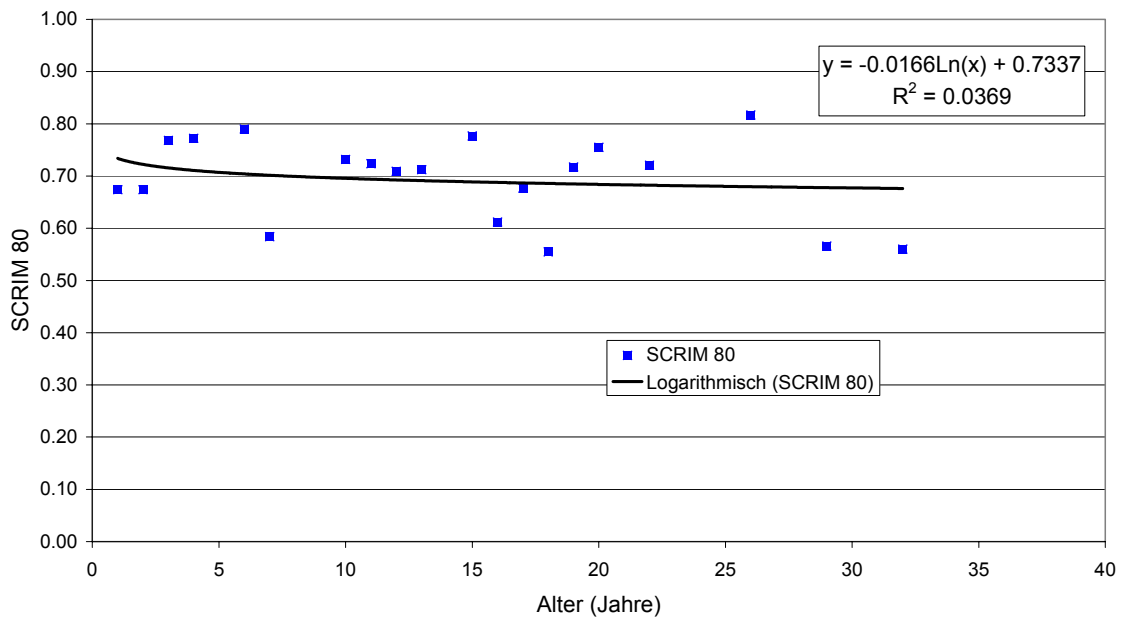


Abb. 71: Verlauf der Griffigkeitswerte auf dem linken Fahrstreifen der Nationalstrassen

Auswertung N2 TI nach Wkum (log-Formel), Vergleich A70 Bamberg

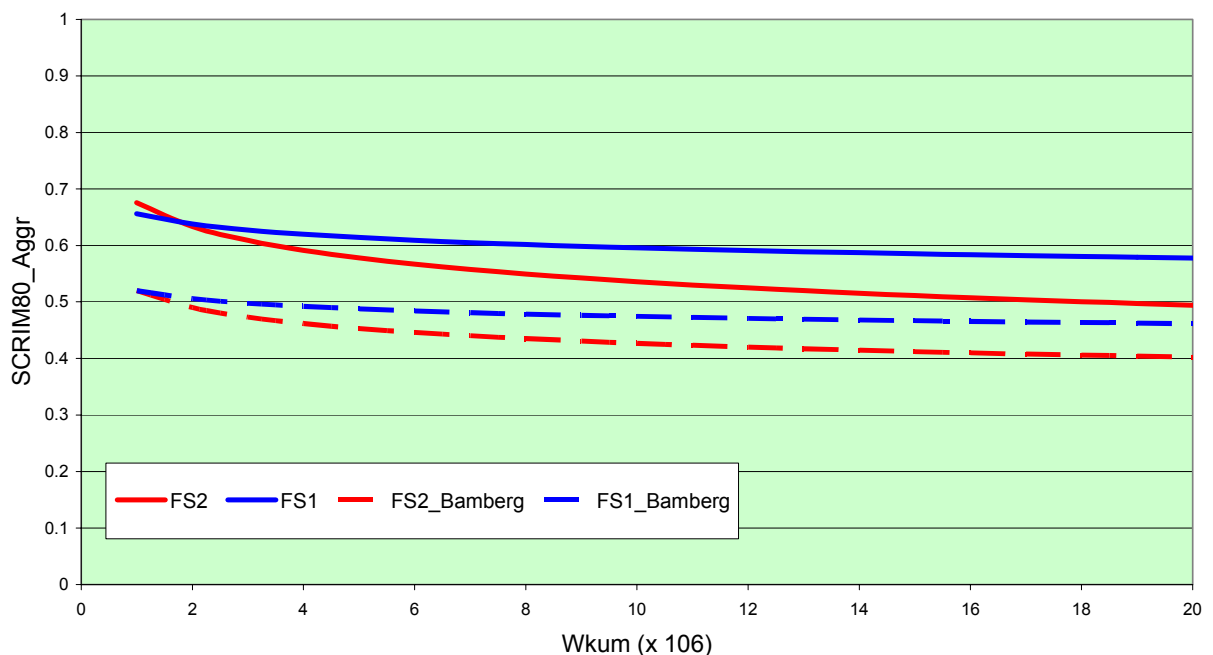


Abb. 72: Vergleich des Griffigkeitsverlaufs zwischen den Nationalstrassen und der Ergebnisse auf der Versuchsstrecke Bamberg.

Der Vergleich der Kurven zeigt eine verblüffende Übereinstimmung, bei welcher der Versatz in der Höhe einerseits mit Ungenauigkeiten in der Umrechnung zwischen unterschiedlichen Messgeräten und andererseits durch die generell besseren Verhältnisse in der Schweiz (siehe Abb. 65) erklärt werden kann.

Die auf dem Nationalstrassennetz nach Fahrstreifen ermittelten Ergebnisse können wie folgt unterschiedlichen Verkehrslastklassen zugeordnet werden, um eine Anwendung auf Kantonsstrassen zu ermöglichen, für welche keine Messdaten zur Auswertung verfügbar waren:

- Rechter Fahrstreifen: T5 und T6
- Linker Fahrstreifen: T1 und T2

Die ermittelten Kurven der generellen Form

$$y = - A \cdot \ln(\text{Alter}) + B$$

können insofern verallgemeinert werden, als für den Koeffizienten B der jeweilige Anfangswert der Griffigkeit eingesetzt wird. Der Koeffizient A drückt die Abnahmerate aus, welche von der Verkehrslastklasse abhängig ist.

8.5 Modelle für kommunale Verhältnisse

Die Ergebnisse der Griffigkeitsmessung beziehen sich auf die Messung mit dem Skiddometer und stellen den Mittelwert von 4 Blockmessungen pro 200 m Teilabschnitt dar. Die in %-Werte ausgedrückten Griffigkeitsbeiwerte wurden auf den gemessenen Strecken von ganz wenigen Ausnahmen abgesehen jeweils in jeder Fahrrichtung aufgenommen (auf dem rechts äussersten Fahrstreifen jeder Richtung). Aus diesen Daten wurde dann ein Abschnittsmittelwert (aus beiden Fahrrichtungen) gebildet und von diesem der Index I4 berechnet. Die Umrechnung erfolgte in Abweichung von der Methode nach Norm SN 640 925 mit einer linearen Relation.

Die Ergebnisse aus der ersten Serie von Messungen stammen aus den Jahren 1985 bis 1995, diejenigen der zweiten Serie ausschliesslich aus dem Jahr 2005. Bei allen Messungen betrug die Messgeschwindigkeit 40 km /h. In dieser Beziehung sind die Ergebnisse vergleichbar.

Die Übertragung der Ergebnisse der Auswertung der Datei der Werte der Längsebenheit (Bestimmung der Abschnitte ohne Massnahmen) auf die Datei mit den Griffigkeitswerten führte zu einer Reduktion der Datensätze um eine Teillänge von etwa 15 km auf insgesamt 42.547 km Fahrbahnlänge. Die Mehrlänge gegenüber der direkten Auswertung der Datei der Längsebenheit ergibt sich aus den unterschiedlichen Teillängen (100 m bei der Längsebenheit, 200 bei der Griffigkeit).

Der Vergleich von 243 Teilabschnitten führt zu folgenden Zwischenergebnissen:

- Mittelwert aller Abschnitte bei der ersten Messung: 54 % (0.54)
- Mittelwert aller Abschnitte bei der zweiten Messung: 58 % (0.58)
- Mittlerer Zeitunterschied zwischen 1. und 2. Messung: 12.34 Jahre
- Mittlerer Griffigkeitsunterschied zwischen 1. und 2. Messung: + 3.99 % (+ 0.04)

Die folgenden Abbildungen zeigen einerseits (Abbildung 73) die Verteilung der Differenzen der Griffigkeitswerte (Griffigkeitswerte in %) in Abhängigkeit des Alters und andererseits (Abbildung 74) die Häufigkeitsverteilung der Differenzen.

Bei einer separaten Auswertung, in welcher auch auf die verschiedenen Verkehrslastklassen Bezug genommen wird (vorhanden Verkehrslastklassen im Kollektiv: T3, T4, T5, T6) ergibt sich ein Ergebnis gemäss Tabelle 13.

Verkehr-Klasse	Gesamtlänge (km)	Mittelwert bei 1. Messung	Mittelwert bei 2. Messung	Mittl. Jahresunterschied	Differenz Griffigkeit
T3	0.250	72	68	14	-4
T4	12.571	55	59	13	4
T5	24.670	53	57	12	4
T6	4.835	50	55	11	6

Tab. 13: Auswertung der Griffigkeitsdaten aus kommunalen Strassen nach Verkehrslastklassen

Wenn die Zahlen der Tabelle einerseits insofern eine gewisse Logik beinhalten, als die Strecken mit der grössten Belastung durch den Schwerverkehr die tiefsten Werte aufweisen, so zeigen andererseits die Unterschiede in den Griffigkeitswerten zwischen der ersten und der zweiten Messung ein völlig unlogisches Bild (die Werte für die Gruppe T3 sind bei der geringen Anzahl von zwei erfassten Strecken völlig irrelevant).

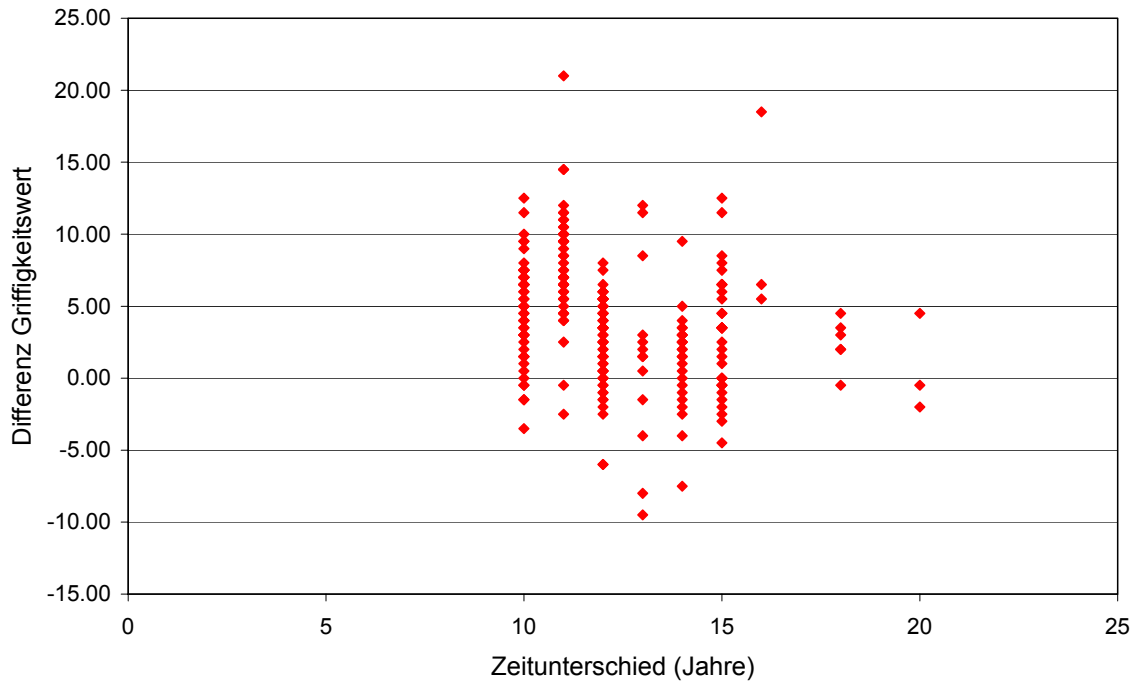


Abb. 73: Differenz der Griffigkeitswerte in Abhängigkeit des Zeitunterschiedes zwischen erster und zweiter Messung

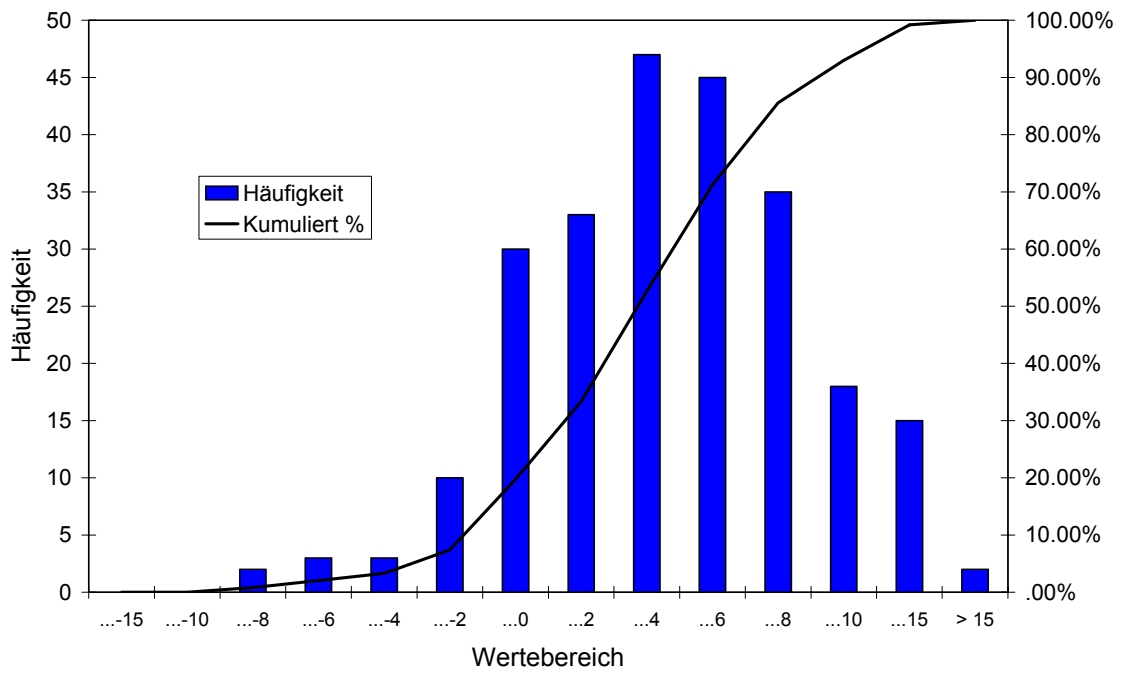


Abb. 74: Häufigkeitsverteilung der Differenzen der Griffigkeitswerte

Die in der Tabelle dargestellten Zahlen können aber auch in einer anderen Art und Weise ausgewertet werden, bei welcher die Unsicherheiten bezüglich der Streuungen der Messungen und der Zuverlässigkeit der Annahmen bezüglich der Durchführung von Massnahmen in Zwischenzeitraum der Messungen ausgeschaltet werden können. Es wird dabei angenommen:

- dass die Mittelwerte der Griffigkeit jeder Verkehrslastklasse repräsentativ sind
- dass in jeder Verkehrslastklasse das mittlere Alter der Strecken 15 Jahre betrage
- dass die mittlere Verkehrsbelastung pro Verkehrslastklasse etwa 80% des oberen Grenzwertes der Klassenskala betrage (Ausnahme T6: 40%).

Setzt man diese Annahmen in konkrete Werte um, so ergibt sich folgendes Ergebnis:

Verkehrslastklasse	TF-Bereich	TF (Annahme)	W	Griffigkeit
T3	100-300	250	1'368'750	68
T4	300-1000	800	4'380'000	59
T5	1000-3000	2500	13'687'500	57
T6	>3000	4000	21'900'000	55

Tab. 14: Annahmen der Werte der kumulierten äquivalenten Verkehrsbelastung nach Verkehrslastklassen

Setzt man die Ergebnisse von Tabelle 14 in eine Graphik um, so ergibt sich der in Abbildung 75 dargestellte Verlauf der Griffigkeitswerte in Abhängigkeit der kumulierten Verkehrsbelastung, das am besten mit einer logarithmischen Funktion angenähert werden kann. Dieses Ergebnis kommt sehr nahe an die Zwischenergebnisse der Griffigkeitsauswertung auf Nationalstrassen heran.

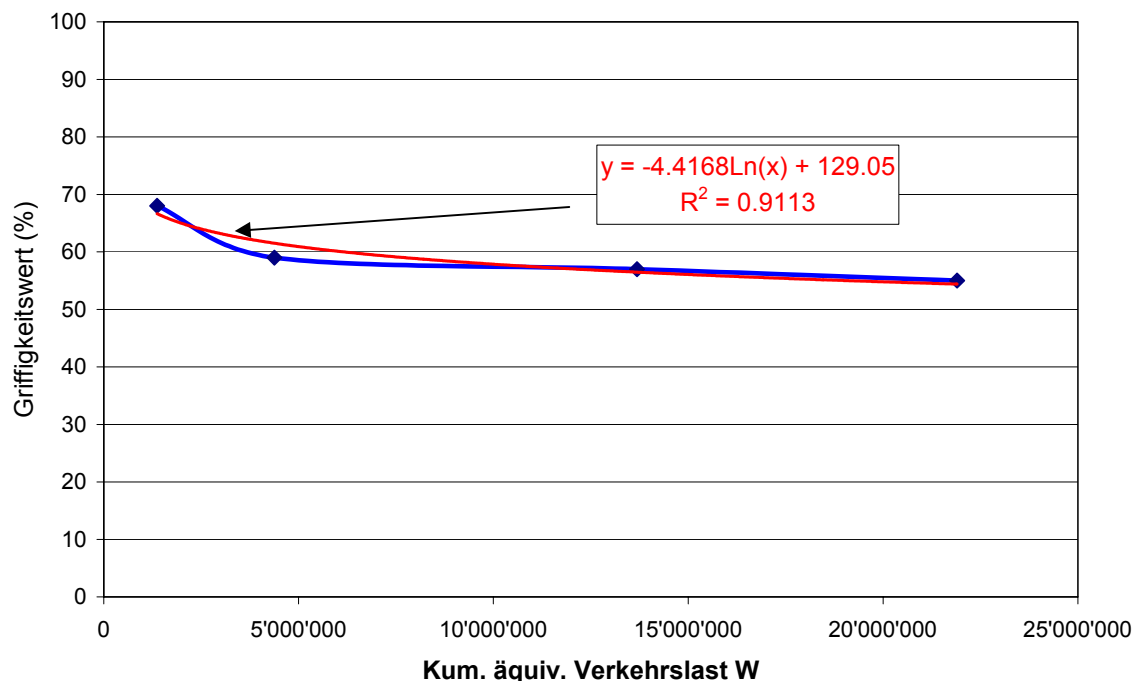


Abb. 75: Herleitung eines Verhaltensmodells für die Griffigkeit aufgrund der Messungen aus kommunalen Strassen (Stadt Genf).

Die in dieser Weise ermittelten Ergebnisse, bei welchen der Verlauf der Griffigkeitswerte in Abhängigkeit der kumulierten äquivalenten Verkehrslast W dargestellt wird, können auch so umgerechnet werden, dass sich daraus Verhaltenskurven in Abhängigkeit des Alters ergeben (Annahmen für die TF-Werte gemäss Tabelle 14). Die Kurven sind in Abbildung 76 dargestellt und die Gleichungen der Verhaltensmodelle in Tabelle 15.

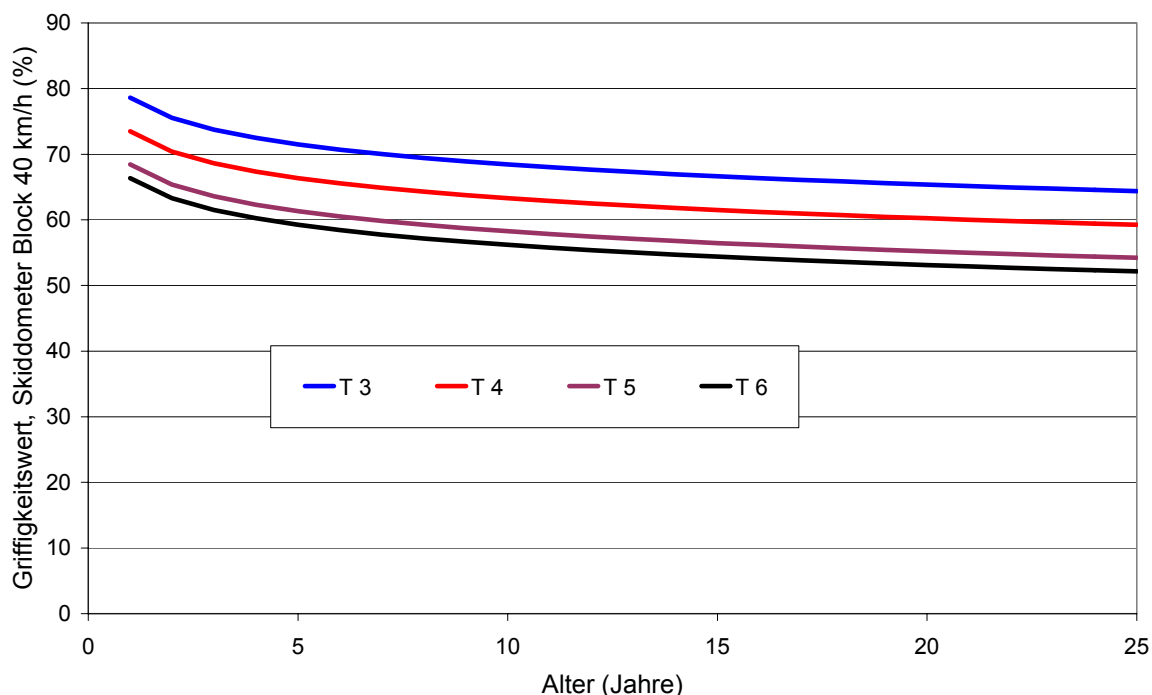


Abb. 76: Verhaltensmodelle für die Griffigkeit in Abhängigkeit des Alters aufgrund der Messungen aus kommunalen Strassen (Stadt Genf).

Verkehrslastklasse	Modellgleichung
T3	$y = - 4.4168 \cdot \ln(\text{Alter}) + 78.604$
T4	$y = - 4.4168 \cdot \ln(\text{Alter}) + 73.467$
T5	$y = - 4.4168 \cdot \ln(\text{Alter}) + 68.434$
T6	$y = - 4.4168 \cdot \ln(\text{Alter}) + 66.358$

Tab. 15: Gleichungen der Verhaltensmodelle der Griffigkeit in Abhängigkeit des Alters (Griffigkeit, kommunale Strassen)

8.6 Modelle für Kantonsstrassen

Die Ergebnisse für Gemeindestrassen und Nationalstrassen eignen sich für eine Übernahme oder rechnerische Anpassung (je nach Messgerät und Messgeschwindigkeit) an die Verkehrslastklassen T3 und T4, für welche Kurven zwischen den Ergebnissen für den rechten oder linken Fahrstreifen auf den Autobahnen interpoliert werden können.

9. Variation der Tragfähigkeit

9.1 Allgemeines

Zweifel an der konkreten Möglichkeit der Entwicklung von Verhaltensmodellen für die Tragfähigkeit wurden bereits vor Beginn der Forschungsarbeit ausgedrückt, wie dies zum Beispiel im Anhang zum Kreditbegehren formuliert wurde:

Im Unterschied zu den bisher besprochenen Schäden (Oberflächenschäden, Ebenheit im Längs- und Querprofil, Griffigkeit) welche alle einer mehr oder weniger kontinuierlichen Veränderung während der Gebrauchsdauer einer Strasse unterworfen sind, also einen deutlich evolutiven Charakter haben, stellt die Deflektion einen über längere Zeitabschnitte konstant bleibenden Wert dar, der durch den vorhandenen Oberbau und die gegebenen Untergrundverhältnisse bedingt ist. Das ganze Jahr hindurch können die Deflektionswerte allerdings variieren, einerseits aufgrund des Temperatureinflusses auf bituminös gebundene Schichten (hohe Temperaturen) bzw. Oberbau und Untergrund (Frost) und andererseits wegen den natürlichen Schwankungen des Grundwasserspiegels und einer allfälligen Auftauwirkung.

Eine Reduktion der Deflektionswerte infolge Nachverdichtung und Konsolidation kann vielfach in der Anfangsphase der Gebrauchsdauer beobachtet werden. Ebenso tritt bei einer Oberbauverstärkung eine Reduktion der Deflektionen ein. Deutliche, irreversible Erhöhungen der Deflektionswerte treten jeweils plötzlich auf und sind kaum vorauszusehen, so z.B. bei einem Wassereinbruch in Unterbau und Untergrund oder beim Bruch einer hydraulisch gebundenen Schicht. In beiden Fällen wird die nachträglich feststellbare Erhöhung der Deflektionswerte zunächst einmal durch deutlich erkennbare Schäden (Risse und Verformungen) begleitet.

Die Aussagen im zitierten Text gehen auf eine Fülle praktischer Erfahrungen und Beobachtungen zurück, insbesondere aus dem Umfeld von Forschungsarbeiten mit intensiver und periodisch wiederholter Messtätigkeit hervor, unter anderem im Rahmen der beschleunigten Prüfungen auf der Rundlaufanlage der ETH Zürich zurück.

Aus den Ergebnissen vom zweiten Versuch auf der Rundlaufanlage mit verschiedenen Versuchsfeldern mit einem zementstabilisierten Oberbau wird in Abb. 78 und 79 der Verlauf der Deflektionswerte von Feld 22 (Zementstabilisierung 150 mm, Belag 80 mm) und von Feld 25 (Schichtdicke der Zementstabilisierung = 300 mm, Belagsdicke 30 mm) dargestellt mit dem Versuch einer Interpretation verschiedener Phasen des zeitlichen Verlaufs der Deflektionswerte [83]. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass die Unterlage der zementstabilisierten Fundamentalschichten eine sehr schwache Tragfähigkeit aufwies, welche zu einem Verlust der Plattenwirkung (infolge Brüche) der Zementstabilisierung führte.

Der Nachweis der Brüche in verschiedenen zementstabilisierten Feldern ist durch die Aufnahme von Abb. 77 belegt, welche die gerissene Unterseite der zementstabilisierten Schicht von Feld 22, aufzeigt. Die Aufnahme wurde bei Ende des Versuches und dem schichtweisen Abtragen der einzelnen Schichten aufgenommen.



Abb. 77: Rundlauf, Versuch Nr. 2: Gerissene Unterseite der zementstabilisierten Schicht von Feld 22 (Schichtdicke der Zementstabilisierung = 150 mm, Belagsdicke 80 mm); die ursprünglich als durchgehende halbstarre Platte vorhandene Schicht ist in einzelne Bruchstücke zerfallen; damit ist ein Verlust der lastverteilenden Plattenwirkung verbunden [83].

9.2 Nachweis der Stabilität der Deflektionswerte

Für diese Forschungsarbeit standen die Ergebnisse von Tragfähigkeitmessungen auf dem Strassennetz der Stadt Genf zur Verfügung, wobei die Messergebnisse auch eine Wiederholung der Messungen nach durchschnittlich 12.5 Jahren umfassten.

Wie schon bei der Auswertung der Ergebnisse der Griffigkeitsmessungen der Strassen der Stadt Genf, wurden auch für die Auswertung der Deflektionsmessungen diejenigen Teilstrecken nicht berücksichtigt, bei denen aufgrund des Vergleiches aufeinander folgender Messungen der Längsebenheit angenommen werden konnte, dass in der Zwischenzeit eine Erhaltungsmassnahme erfolgt war (auch wenn die vermutete Mehrzahl von Massnahmen ohne wesentliche Veränderung des Oberbaus – z.B. Ersatz der Deckschicht nach Abfräsen – keinen Einfluss auf die Entwicklung der Tragfähigkeit hat). Für die Auswertung der Daten standen nach der erwähnten Reduktion der Datensätze noch Ergebnisse aus einer Streckenlänge von 85 km zur Verfügung. Die Ergebnisse der Auswertung sind in Abbildungen 80 und 81 sowie in den Tabellen 16 und 17 dargestellt.

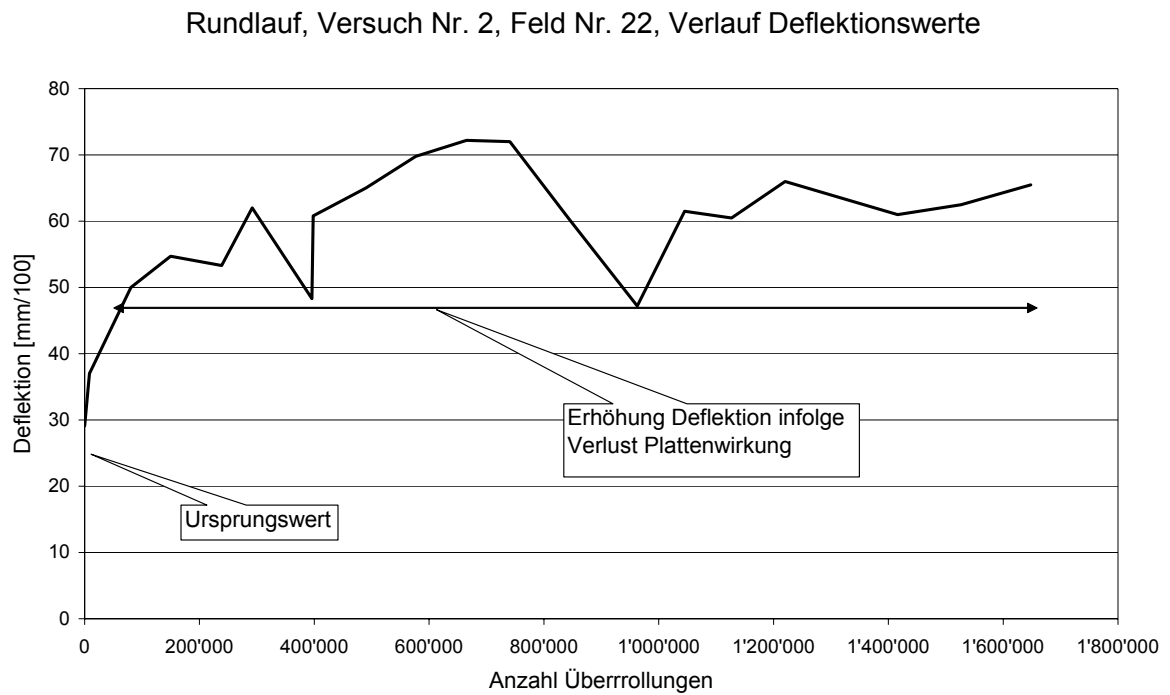


Abb. 78; Rundlauf, Versuch Nr. 2, Feld 22 (Zementstabilisierung 150 mm, Belag 80 mm): Verlauf der Deflektionswerte mit Interpretation des Verlaufs

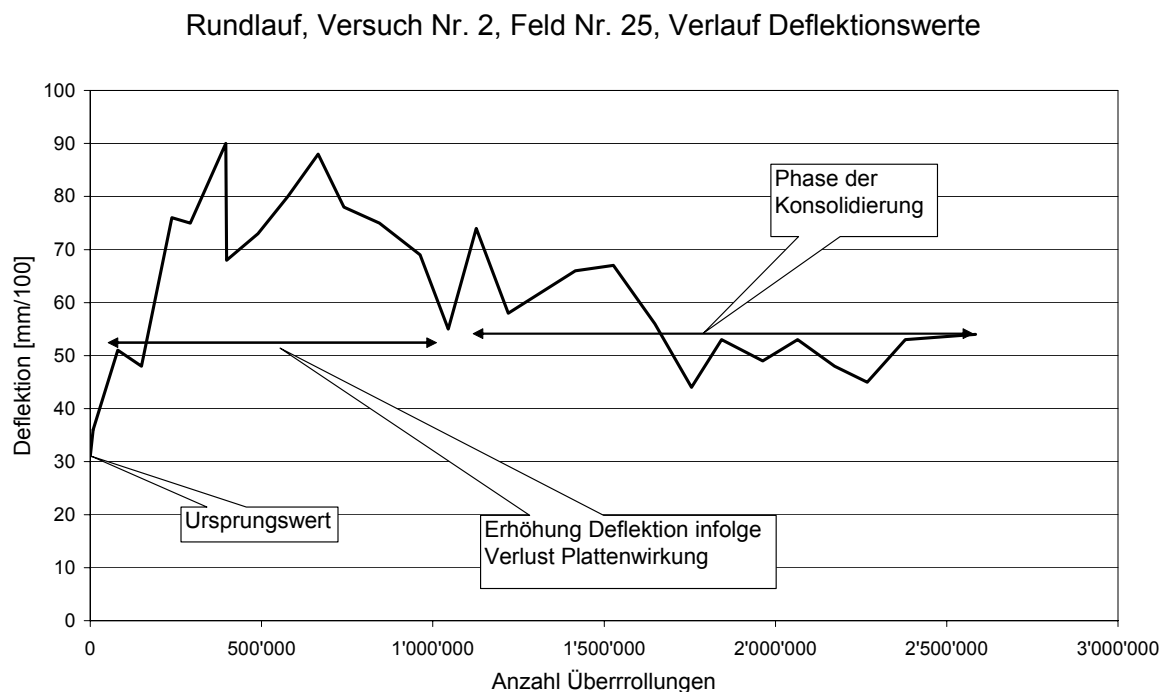


Abb. 79; Rundlauf, Versuch Nr. 2, Feld 25 (Zementstabilisierung 300 mm, Belag 30 mm): Verlauf der Deflektionswerte mit Interpretation des Verlaufs

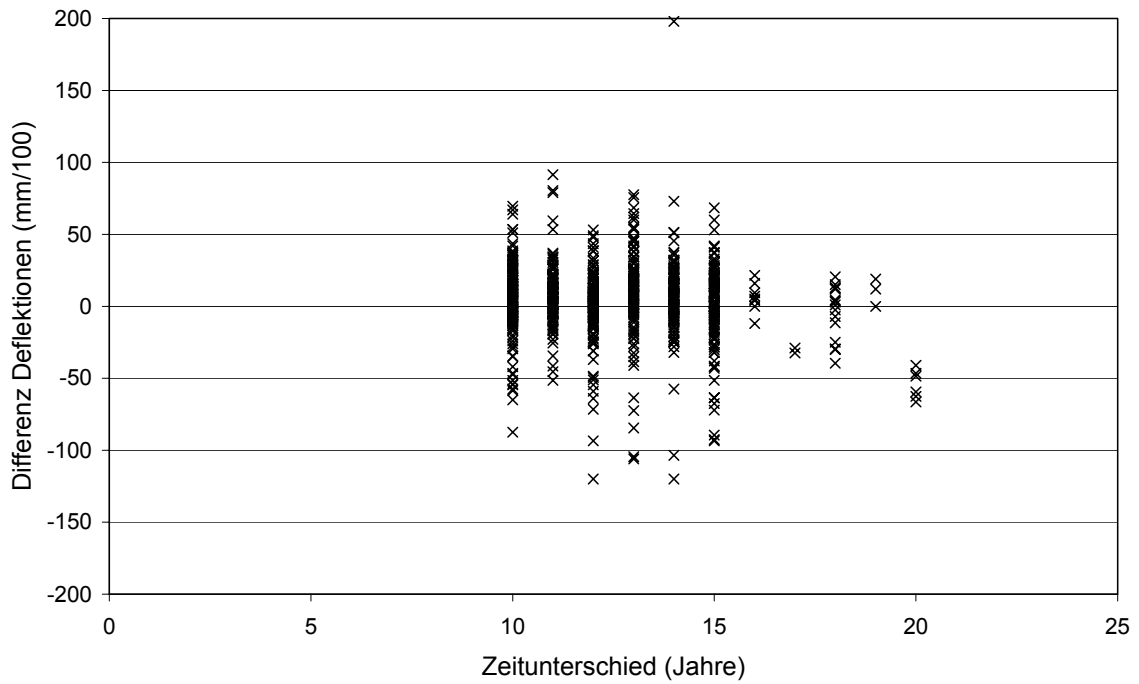


Abb. 80: Vergleich der Differenzen der Abschnittsmittelwerte der Deflektionen aus aufeinander folgenden Erhebungen auf dem Strassennetz der Stadt Genf.

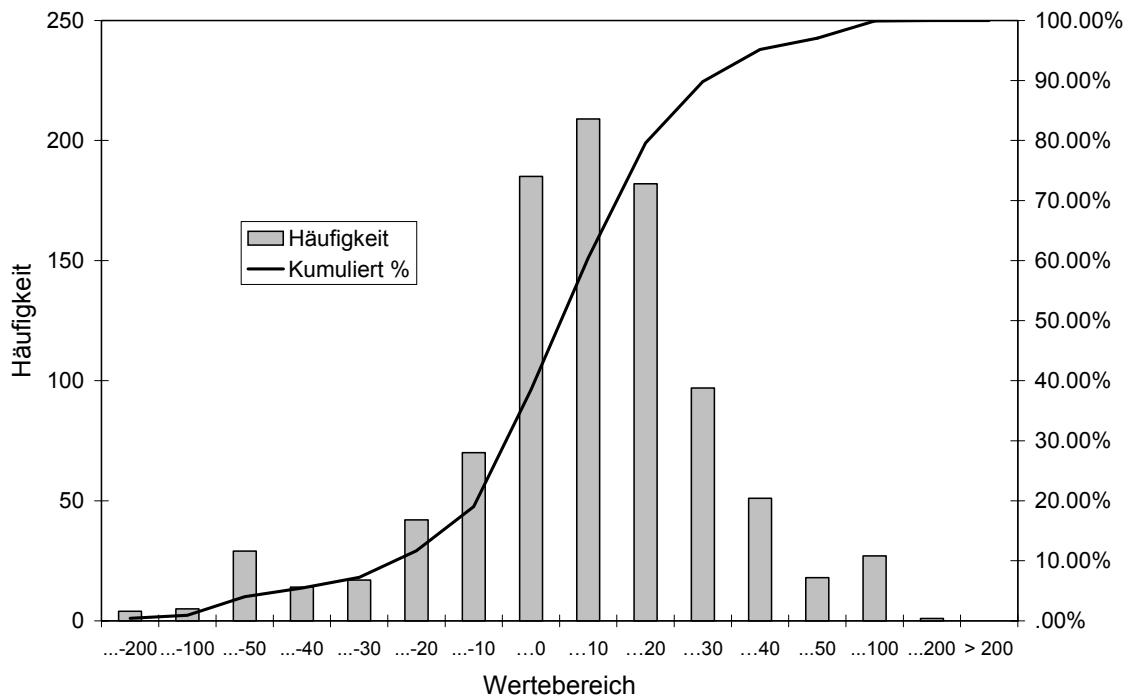


Abb. 81: Häufigkeitsverteilung der Differenzen der Abschnittsmittelwerte der Deflektionen aus aufeinander folgenden Erhebungen auf dem Strassennetz der Stadt Genf.

In Abbildung 80 sind die Differenzen aus der mittleren Deflektionen alle Abschnitte in Abhängigkeit des Zeitunterschiedes zwischen aufeinander folgenden Messreihen

dargestellt. Abbildung 81 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Differenzen der Deflektionswerte. Aus beiden Abbildungen geht eine sehr gleichmässige Verteilung der Differenzwerte nach oben ("Verschlechterung" der Tragfähigkeit), bzw. nach unten ("Verbesserung" der Tragfähigkeit), hervor. In den Tabelle 16 und 17 werden die Ergebnisse nach Verkehrslastklasse ausgewertet.

Verkehrslastklasse	Länge (km)	Mittelwert 1. Messung (mm/100)	Mittelwert 2. Messung (mm/100)	Differenz Zeit (Jahre)	Differenz Deflektion (mm/100)
Alle	85	84	87	12.5	3
T2	2	120	115	12	-5
T3	17	93	98	13	5
T4	32	86	89	13	2
T5	29	74	77	12	3
T6	5	77	84	11	7

Tab. 16: Auswertung Deflektionsmessungen Stadt Genf. Mittelwerte aller Abschnitte aus aufeinander folgenden Messreihen nach Verkehrslastklasse.

Die festgestellten Differenzwerte der Deflektionen nach einem mittleren Zeitabstand von 12.5 Jahren zwischen den Messreihen liegen in einem Bereich zwischen -5/100 und + 7/100 mm.

Dieser Wertebereich

- entspricht etwa auch einem prozentualen Wert der Differenz bezogen auf den Absolutwert
- liegt im Bereich der Messgenauigkeit
- und ist deutlich kleiner als die normale Variation der Ergebnisse infolge Temperatureinfluss ($\pm 1/100$ mm pro °C) und saisonaler Schwankungen auf das Messergebnis.

Verkehrslastklasse	Länge (km)	Mittlerer Indexwert I5 1. Messung	Mittlerer Indexwert I5 2. Messung	Differenz Zeit (Jahre)	Differenz Indexwert
T2	2	1.0	0.5	12	- 0.5
T3	17	1.15	1.40	13	0.25
T4	32	2.30	2.45	13	0.15
T5	29	2.92	3.1	12	0.18
T6	5	4.65	4.96	11	0.31

Tab. 17: Auswertung Deflektionsmessungen Stadt Genf. Mittelwerte aller Abschnitte aus aufeinander folgenden Messreihen nach Verkehrslastklasse.

Werden die Differenzen bezüglich des Indexwertes betrachtet, so gilt es zu beachten, dass die Umwandlungskurven vom Messwert auf den Indexwert gerade für den Bereich hoher Tragfähigkeitswerte sehr steil sind (im Extremfall führt bereits eine Wertedifferenz von 1/100 zu einer Differenz von 0.1 Punkten im Indexwert). Selbst unter Beachtung dieser Voraussetzung und unter der Annahme eines linearen Verhaltens führen die festgestellten Differenzen zu höchstens einer Änderung des Indexwertes I5 von etwa einem halben Punkt nach 25 Jahren.

9.3 Folgerungen für die Modellbildung

Die aufgrund der Auswertung von Deflektionsmessungen auf dem Strassennetz der Stadt Genf nach einem mittleren Messintervall ermittelten Ergebnisse bestätigen die eingangs erwähnte These, wonach die Tragfähigkeit einer Strasse eine weitgehend konstante Eigenschaft ist. Unter diesen Voraussetzungen kann auch kein Verhaltensmodell gebildet werden.

Im Rahmen der Konzeption von PMS-Anwendungen kann demzufolge die Tragfähigkeit solange als konstante Grösse betrachtet werden, bis nach einer strukturellen Massnahme (Teilerneuerung, Gesamterneuerung, Verstärkung) eine Stärkung des Strassenoberbaus erfolgt.

10. Alternative Verfahren und Anpassung der Modelle

10.1 Verfahren bei Unkenntnis der Altersangaben

Die Kapitel 5 bis 8 (bei der in Kapitel 9 behandelten Tragfähigkeit wird auf den Vorschlag von Verhaltensmodellen in begründeter Weise verzichtet) enthalten Vorschläge für Verhaltensmodelle welche auf die Auswertung von Datensätzen beruhen, welche die Angabe des Belagsalters enthalten. Bei vielen Strassenverwaltungen liegen Ergebnisse aus vielen, teils auch netzweiten Zustandserfassungen vor, ohne dass gleichzeitig das Alter der Beläge bekannt ist. Wenn sich solche Daten für eine ähnliche Auswertung wie in den erwähnten Kapitel beschrieben nicht eignen, so bestehen doch Möglichkeiten, mit Hilfe von Schätzungen auch diese Daten für die Bestimmung von Verhaltensmodellen zu verwenden. Selbstverständlich werden diese Modelle eine geringere Zuverlässigkeit oder "Trefferquote" aufweisen, da sie auf deutlich weniger detaillierte Daten beruhen und mit dem Element der Schätzung vorlieb nehmen müssen.

Eine Möglichkeit der Herleitung von Verhaltensmodellen bei fehlenden Altersangaben der Strecken bietet das in Kapitel 2.2.5, Untertitel "Verhaltensmodelle Kantonsstrassen" beschriebene Verfahren, das in Zusammenhang mit Datensätzen der Kantone Schaffhausen und Wallis [8] zur Anwendung gelangte und auch in Italien erfolgreich eingesetzt wurde [9].

10.2 Wahl eines Verhaltensmodells aus einer vorgegebenen Kurvenschar

Eine weitere Alternative für die Anwendung von Verhaltensmodellen ohne gezielte Untersuchungen besteht darin, einen Satz von Verhaltenskurven zu verwenden, welche aufgrund theoretischer Überlegungen sowie praktischer Erfahrungen "konstruiert" werden. Die folgende Abbildung 82 zeigt beispielsweise wie ein Satz "Standardkurven" für die Spurrinnenbildung aussehen könnte, bei welchem die einzelnen Kurven die bekannte Entwicklungstendenz widerspiegeln, wonach die Verformung in einer anfänglichen Phase stark ansteigt um später eher zu verflachen, wie dies auch durch die in Kapitel 7 ermittelten Kurven bestätigt wird.

Die drei in Abbildung 82 dargestellten Kurven könnten summarisch mit "geringe Verformbarkeit", "mittlere Verformbarkeit" und "starke Verformbarkeit" benannt werden. Die Wahl der für einen betrachteten Strassenabschnitt zutreffendsten Kurve erfolgt aufgrund des Kriteriums der geringeren Distanz vom Ausgangswert (im Bild durch den schwarzen Punkt dargestellt) zur näheren Kurve. Dabei muss das Alter des Abschnittes bekannt sein.

Das hier skizzierte Vorgehen wurde in Rahmen der ersten bundesweiten PMS-Anwendung für die Bundesautobahnen in Deutschland vorgeschlagen und bis zum Vorliegen gesicherter Ergebnisse aus neueren Forschungsarbeiten angewendet [15].

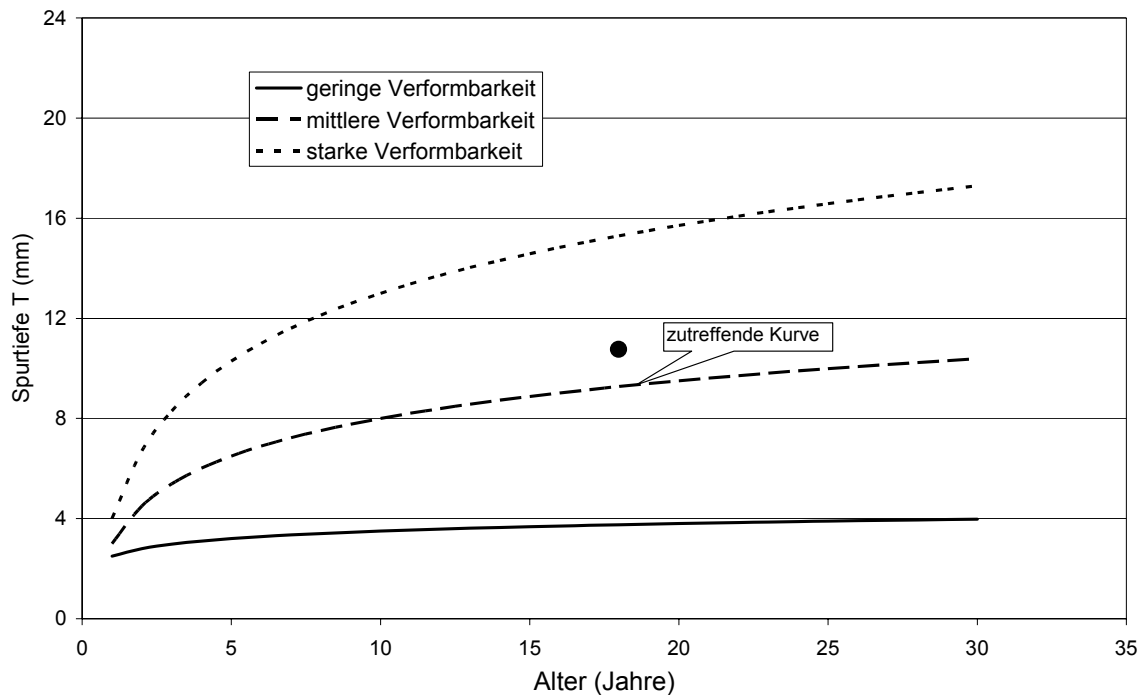


Abb. 82; Beispiel eines Satzes von "Standardkurven" für die Spurrinnenbildung

10.3 Anpassung der Modelle an den Ausgangswert

Der Begriff "Anpassung" der Modelle betrifft einen wesentlichen Aspekt der praktischen Anwendung der Modelle, die Notwendigkeit nämlich, ein vorgegebenes Modell an den vorhandenen Ausgangswert jeden einzelnen Abschnittes anzupassen oder in anderen Worten, die Kurve durch den Ausgangspunkt zu führen.

Dabei stehen theoretisch zwei Möglichkeiten zur Verfügung, einerseits diejenige einer vertikalen Verschiebung der Kurve, andererseits die einer horizontalen Verschiebung, wie dies in der folgenden Skizze aufgezeigt wird.

Im Falle eines linearen Modells spielt es keine Rolle ob die Verschiebung vertikal oder horizontal erfolgt; in allen anderen Fällen ist das Ergebnis des weiteren Zustandsverlaufs hingegen deutlich unterschiedlich. Hier kommt nur die horizontale Verschiebung in Frage, wobei dem betreffenden Abschnitt ein "fiktives Alter" zugeordnet werden muss. Aus dem Schnittpunkt der horizontalen Linie mit dem Ausgangswert und der Kurve ergibt sich das Alter das dem entsprechenden Kurvenwert entspricht.

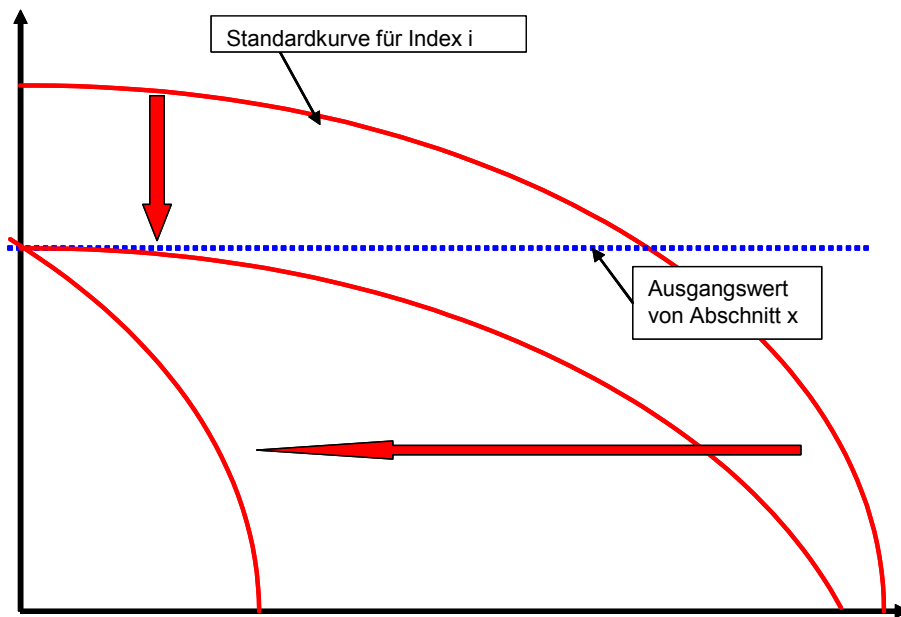


Abb. 83: Theoretische Möglichkeiten der Kurvenanpassung

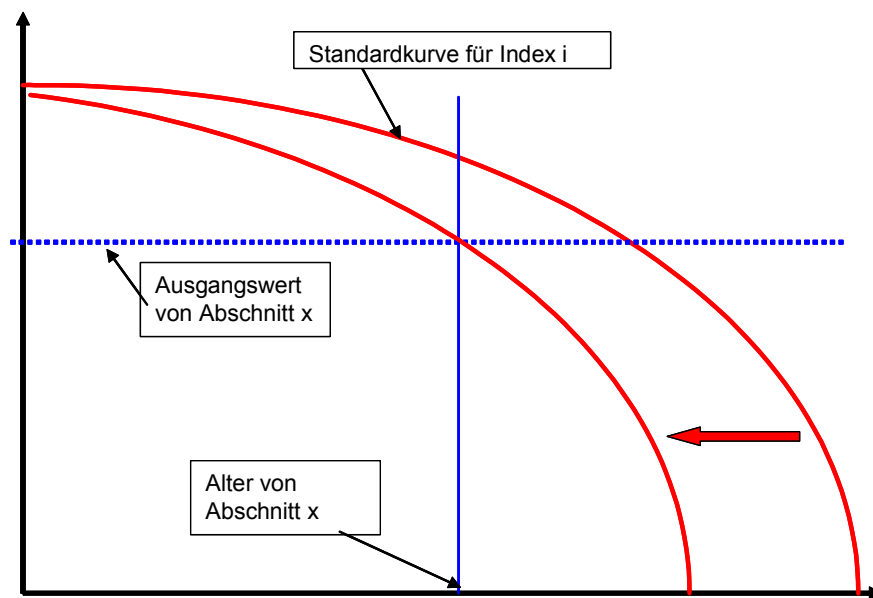


Abb. 84: Bestimmung des fiktiven Alters eines Abschnittes zum Zweck der Modellanpassung

11. Normierung der Thematik "Verhaltensmodelle"

11.1 Grundsätzliches

Der Begriff "Normen" wird vom Schreibenden als eine Festlegung bewährter Fachregeln, wobei der Ausdruck "bewährt" einerseits eine "Anwendungssicherheit" über eine längere Zeitperiode einschliesst und andererseits auch einen weitergehenden Bestand der Gültigkeit dieser Norm erwarten lässt.

Verhaltensmodelle lassen sich nur schwer in das oben erwähnte Verständnis von Normen eingliedern, weil beide Aspekte des Ausdruckes "bewährt" in diesem Fall nicht zutreffend sind. Weder kann auf eine längere Anwendungsphase der in diesem Bericht ausgearbeiteten Modelle hingewiesen werden, noch auf eine möglichst lange Gültigkeitsdauer gezählt werden, zumindest nicht in genereller Hinsicht über sämtliche betrachteten Parameter hinweg.

Die Entwicklung von Verhaltensmodellen ist viel eher als ein kontinuierlicher Prozess zu verstehen bei welchem mit jeder Erweiterungsstufe der Verfügbarkeit von detaillierten Daten zur Charakterisierung der Strassen (Aufbau, Materialeigenschaften), der Belastung (Verkehrslasten, TF-Werte) und externer Einflussfaktoren (Klima, Exposition, usw.) eine höhere Zuverlässigkeit der Modelle erreicht werden kann. Bei all dem sei auch auf den Aspekt der Qualität der verfügbaren Daten hingewiesen.

Unter Berücksichtigung der vorstehend genannten Argumente wird deshalb vorgeschlagen, auf die konkrete Angabe von Verhaltensmodellen in einer entsprechenden Norm zu verzichten und allenfalls einige Modellgleichungen als Beispiele aufzuführen. Diese sollten explizit als solche deklariert werden. Hingegen sollte die Norm dem Anwender konkrete Hinweise dazu liefern, wie er zu Modellen kommen kann, die auf die jeweiligen lokalen Bedingungen anwendbar sind und auf welche Details bei der Wahl eines Modells geachtet werden soll. Entsprechend wird in der folgenden Ziffer der mögliche Aufbau einer Norm zum Thema der Verhaltensmodelle vorgestellt.

11.2 Schema für den Normaufbau

A *Einleitung*

- 1 Geltungsbereich
- 2 Gegenstand
- 3 Zweck
- 4 Begriffe

B *Allgemeines*

- 5 Anwendungsbereich der Verhaltensmodelle
- 6 Einflussfaktoren auf das Verhalten (mit Matrixdarstellung)
- 7 Typische Verhaltensfunktionen
- 8 Voraussetzungen für den Einsatz (Datenbedarf)

C *Auswahl und Herleitung von Verhaltensmodellen*

- 9 Übernahme bestehender Modelle

- 10 Auswertung von Zeitreihen von Beobachtungen
- 11 Auswertung von einmaligen Netzaufnahmen
- 12 Vereinfachte Verfahren

D *Anwendung von Verhaltensmodellen*

- 13 Berücksichtigung des Anfangswertes
- 14 Kurvenanpassung
- 15 Einsatz bei PMS-Anwendungen

E Literaturverzeichnis

Anhang, Beispiele

12. Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

12.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die folgenden Tabellen fassen die Ergebnisse der Auswertung zur Bestimmung von Verhaltensmodellen zusammen.

Parameter	Strasstyp	Bedingung	Modell	R ²
Index I _{A1} Oberflächenglätte	National- strassen	rechter FS	kein Modell	
		linker FS	kein Modell	
Index I _{A2} Belagschäden	(Autobahnen, HLS)	rechter FS	$y = 1.3413 \cdot \text{Alter}^{0.2692}$	0.50
		linker FS	$y = 1.2934 \cdot \text{Alter}^{0.3201}$	0.62
Index I _{A3} Belagverformungen		rechter FS	kein Modell, siehe I ₃	
		linker FS	kein Modell, siehe I ₃	
Index I _{A4} strukturelle Schäden		rechter FS	kein Modell, siehe I ₂	
		linker FS	kein Modell, siehe I ₂	
s _w -Wert (Index I ₂)		rechter FS	$y = 0.025 \cdot \text{Alter} + 1.5448$	0.52
		linker FS	$y = 0.0051 \cdot \text{Alter} + 1.7527$	0.06
Spurtiefe T _{max} (Index I ₃)		Kriechspur	$y = 4.9139 \cdot \ln(\text{Alter}) - 1.3569$	0.63
		rechter FS	$y = 3.09499 \cdot \ln(\text{Alter}) - 1.0249$	0.64
		linker FS	$y = 0.5394 \cdot \ln(\text{Alter}) + 3.0613$	0.29

Tab. 18: Verhaltensmodelle für Nationalstrassen, Indizes I_{A1}, I_{A2}, I_{A3}, I_{A4}, I₂, I₃

Parameter	Strasstyp	Bedingung	Modell	R ²
Griffigkeit, SRM 40	Gemeinde- strassen	T3	$y = -4.4168 \cdot \ln(\text{Alter}) + 78.604$	
		T4	$y = -4.4168 \cdot \ln(\text{Alter}) + 73.467$	
		T5T6	$y = -4.4168 \cdot \ln(\text{Alter}) + 68.434$	
			$y = -4.4168 \cdot \ln(\text{Alter}) + 66.358$	
Griffigkeit, SKR 80	Kantons- strassen	T1	$y = -0.0166 \cdot \ln(\text{Alter}) + \text{Anfangswert}$	
		T2	$y = -0.0166 \cdot \ln(\text{Alter}) + \text{Anfangswert}$	
		T3	$y = -0.0181 \cdot \ln(\text{Alter}) + \text{Anfangswert}$	
		T4	$y = -0.0197 \cdot \ln(\text{Alter}) + \text{Anfangswert}$	
Griffigkeit, SKR 80	National- strassen	rechter FS	$y = -0.0213 \cdot \ln(\text{Alter}) + 0.6059$	0.06
Griffigkeit, SKR 80		linker FS	$y = -0.0166 \cdot \ln(\text{Alter}) + 0.7337$	0.04

Tab. 19: Verhaltensmodelle für die Griffigkeit (Index I₄), alle Strassen

Parameter	Strassentyp	Bedingung	Modell	R ²
Index I _{A1} Oberflächenglätte	Gemeinde- strassen	T1, I ₅ ≤ 3	siehe T2	
		T1, I ₅ > 3		
		T2, I ₅ ≤ 3	y = 0.4957 · Ln(Alter) + 0.0736	0.51
		T2, I ₅ > 3		
		T3, I ₅ ≤ 3	y = 0.3239 · Alter ^{0.5521}	0.53
		T3, I ₅ > 3	y = 0.3095 · Alter ^{0.5496}	0.58
		T4, I ₅ ≤ 3	y = 0.2395 · Alter ^{0.6744}	0.62
		T4, I ₅ > 3	y = 0.623 · Alter ^{0.39}	0.53
Index I _{A2} Belagschäden		T1, I ₅ ≤ 3	y = 0.0602 · Alter + 1.0641	0.62
		T1, I ₅ > 3	y = 0.017 · Alter + 0.863	0.05
		T2, I ₅ ≤ 3	y = 0.4462 · Alter ^{0.5455}	0.38
		T2, I ₅ > 3	y = 0.0812 · Alter + 1.1185	0.95
		T3, I ₅ ≤ 3	y = 0.4874 · Alter ^{0.4787}	0.60
		T3, I ₅ > 3	y = 0.4249 · Alter ^{0.5306}	0.49
		T4, I ₅ ≤ 3	y = 0.2496 · Alter ^{0.749}	0.63
		T4, I ₅ > 3		
Index I _{A3} Belagverformungen		T1, I ₅ ≤ 3	y = 1.6353 · Ln(Alter) - 2.085	0.96
		T1, I ₅ > 3		
		T2, I ₅ ≤ 3	y = 0.8736 · Ln(Alter) - 0.4793	0.33
		T2, I ₅ > 3	y = 1.0951 · Ln(Alter) - 0.9477	0.51
		T3, I ₅ ≤ 3	y = 1.0583 · Ln(Alter) - 0.8273	0.51
		T3, I ₅ > 3	y = 1.3686 · Ln(Alter) - 1.3294	0.59
		T4, I ₅ ≤ 3	y = 1.0143 · Ln(Alter) - 0.587	0.30
		T4, I ₅ > 3		
Index I _{A4} strukturelle Schäden		T1, I ₅ ≤ 3	y = 0.0615 · Alter + 0.8573	0.45
		T1, I ₅ > 3	y = 0.4173 · Alter ^{0.4932}	0.61
		T2, I ₅ ≤ 3	y = 0.4593 · Alter ^{0.4496}	0.71
		T2, I ₅ > 3	y = 0.4726 · e ^{0.0795 · Alter}	0.71
		T3, I ₅ ≤ 3	y = 0.2767 · Alter ^{x0.6062}	0.40
		T3, I ₅ > 3	y = 0.052 · Alter + 0.9626	0.45
		T4, I ₅ ≤ 3	siehe T3	
		T4, I ₅ > 3	siehe T3	
s _w -Wert (Index I ₂)		T1, I ₅ ≤ 3	y = 0.0352 · Alter + 1.586	0.21
		T1, I ₅ > 3	y = 0.1077 · Alter + 0.7466	0.99
		T2, I ₅ ≤ 3	y = 0.0705 · Alter + 1.3863	0.58
		T2, I ₅ > 3	y = 0.0779 · Alter + 1.9569	0.26
		T3, I ₅ ≤ 3	y = 0.064 · Alter + 1.3513	0.62
		T3, I ₅ > 3	y = 0.0636 · Alter + 1.9171	0.33
		T4, I ₅ ≤ 3	y = 0.0188 · Alter + 1.9166	0.04
		T4, I ₅ > 3	y = 0.1085 · Alter + 1.0584	0.57
Spurtiefe T _{max} (Index I ₃)		T1, I ₅ ≤ 3	y = 2.0267 · Ln(Alter) + 1.3474	0.84
		T1, I ₅ > 3	y = 2.2192 · Ln(Alter) + 0.6823	0.90
		T2, I ₅ ≤ 3	y = 3.4784 · Ln(Alter) + 0.3453	0.67
		T2, I ₅ > 3	y = 4.0019 · Ln(Alter) - 1.1326	0.61
		T3, I ₅ ≤ 3	y = 3.8035 · Ln(Alter) + 0.9682	0.71
		T3, I ₅ > 3	y = 4.0013 · Ln(Alter) - 0.1573	0.64
		T4, I ₅ ≤ 3	y = 5.4493 · Ln(Alter) - 1.962	0.66
		T4, I ₅ > 3	y = 6.8569 · Ln(Alter) - 6.364	0.60

Tab. 20: Verhaltensmodelle für Gemeindestrassen, Indizes I_{A1}, I_{A2}, I_{A3}, I_{A4}, I₂, I₃

Parameter	Datenquelle	Bedingung	Modell	R ²
Index I _{A1} Oberflächenglätte	A	T1, I ₅ ≤ 3	0.4782 · Ln(Alter) + 0.1729	
	A	T1, I ₅ > 3	0.4782 · Ln(Alter) + 0.1729	
	A	T2, I ₅ ≤ 3	0.4782 · Ln(Alter) + 0.1729	
	A	T2, I ₅ > 3	0.4782 · Ln(Alter) + 0.1729	
	A	T3, I ₅ ≤ 3	0.4782 · Ln(Alter) + 0.1729	0.67
	A	T3, I ₅ > 3	0.4782 · Ln(Alter) + 0.1729	
	A	T4, I ₅ ≤ 3	0.4782 · Ln(Alter) + 0.1729	
	A	T4, I ₅ > 3	0.4782 · Ln(Alter) + 0.1729	
	B	T1	0.8191 · Ln(Alter) - 0.1322	0.69
	B	T2	0.868 · Ln(Alter) - 0.0545	0.64
	B	T3	1.1032 · Ln(Alter) - 0.5438	0.72
	B	T4	1.0476 · Ln(Alter) - 0.3273	0.48
Index I _{A2} Belagschäden	A	T1, I ₅ ≤ 3	0.0139 · Alter + 1.8062	0.07
	A	T1, I ₅ > 3	0.1005 · Alter + 0.8093	0.62
	A	T2, I ₅ ≤ 3	0.3058 · Alter ^{0.675}	0.68
	A	T2, I ₅ > 3	0.7714 · Alter ^{0.3727}	0.39
	A	T3, I ₅ ≤ 3	0.2785 · Alter ^{0.7008}	0.74
	A	T3, I ₅ > 3	0.2665 · Alter ^{0.7929}	0.81
	A	T4, I ₅ ≤ 3	0.1435 · Alter ^{0.9957}	0.77
	A	T4, I ₅ > 3		
	B	T1	0.9248 · Ln(Alter) - 0.3876	0.69
	B	T2	0.8873 · Ln(Alter) - 0.2275	0.82
	B	T3	0.5826 · Alter ^{0.4612}	0.63
	B	T4	0.821 · Ln(Alter) + 0.2789	0.40
Index I _{A3} Belagverformungen	A	T1, I ₅ ≤ 3	0.7749 · Ln(Alter) - 0.3836	0.34
	A	T1, I ₅ > 3	0.006 · Alter + 1.6125	1.00
	A	T2, I ₅ ≤ 3	0.7378 · Ln(Alter) - 0.1217	0.49
	A	T2, I ₅ > 3	0.571 · Ln(Alter) + 0.8056	0.19
	A	T3, I ₅ ≤ 3	1.0202 · Ln(Alter) - 0.5688	0.66
	A	T3, I ₅ > 3	1.2854 · Ln(Alter) - 1.2744	0.75
	A	T4, I ₅ ≤ 3	0.9028 · Ln(Alter) - 0.3359	0.36
	B	T1	0.6871 · Ln(Alter) - 0.1375	0.87
	B	T2	0.7685 · Ln(Alter) - 0.2156	0.64
	B	T3	0.9182 · Ln(Alter) - 0.3503	0.67
	B	T4	0.5922 · Ln(Alter) + 0.2982	0.47
	Index I _{A4} strukturelle Schäden	A	T1, I ₅ ≤ 3	0.2577 · Ln(Alter) + 1.2161
A		T1, I ₅ > 3	0.0651 · Alter ^{1.2687}	0.99
A		T2, I ₅ ≤ 3	0.254 · Alter ^{0.7073}	0.58
A		T2, I ₅ > 3	0.2347 · Alter ^{0.8376}	0.52
A		T3, I ₅ ≤ 3	0.3477 · Alter ^{0.5533}	0.60
A		T3, I ₅ > 3	0.3259 · Alter ^{0.6156}	0.78
A		T4, I ₅ ≤ 3	0.1622 · Alter ^{0.8484}	0.64
B		T1	0.7974 · Ln(Alter) - 0.1853	0.79
B		T2	0.8536 · Ln(Alter) - 0.2975	0.73
B		T3	0.6619 · Ln(Alter) + 0.0288	0.41
B		T4	0.8773 · Ln(Alter) - 0.2002	0.40
Index I _{A5} Flicke		B	T1	0.0749 · Alter + 0.1128
	B	T2	0.0706 · Alter + 0.2394	0.75
	B	T3	0.052 · Alter + 0.4204	0.45
	B	T4	0.0689 · Alter + 0.1501	0.80

Parameter	Datenquelle	Bedingung	Modell	R ²
s _w -Wert (Index I ₂)	A	T1, I ₅ ≤ 3	0.0623 · Alter + 1.4822	0.53
	A	T1, I ₅ > 3	0.0728 · Alter + 2.0614	0.26
	A	T2, I ₅ ≤ 3	0.056 · Alter + 1.4276	0.62
	A	T2, I ₅ > 3	0.0935 · Alter + 1.2418	0.80
	A	T3, I ₅ ≤ 3	0.0343 · Alter + 1.538	0.43
	A	T3, I ₅ > 3	0.0649 · Alter + 1.4527	0.45
	A	T4, I ₅ ≤ 3	0.0282 · Alter + 1.7178	0.21
	A	T4, I ₅ > 3	0.0849 · Alter + 1.0917	1.00
Index I ₂	B	T1	1.0148 · Ln(Alter) - 0.0598	0.39
Index I ₂	B	T2	0.8042 · Ln(Alter) - 0.0653	0.56
Index I ₂	B	T3	0.8939 · Ln(Alter) - 0.4761	0.65
Index I ₂	B	T4	0.0749 · Ln(Alter) + 1.5322	0.01
Spurtiefe T _{max} (Index I ₃)	A	T1, I ₅ ≤ 3	1.9513 · Ln(Alter) + 2.3393	0.46
	A	T1, I ₅ > 3	2.3831 · Ln(Alter) + 1.1283	0.53
	A	T2, I ₅ ≤ 3	2.9526 · Ln(Alter) + 1.2769	0.67
	A	T2, I ₅ > 3	2.3648 · Ln(Alter) + 2.2263	0.59
	A	T3, I ₅ ≤ 3	3.773 · Ln(Alter) + 0.3538	0.69
	A	T3, I ₅ > 3	4.9896 · Ln(Alter) - 3.3237	0.78
	A	T4, I ₅ ≤ 3	3.5946 · Ln(Alter) + 0.903	0.38
	A	T4, I ₅ > 3	3.4898 · Ln(Alter) + 0.8165	1.00
Index I ₃	B	T1	0.843 · Ln(Alter) - 0.4461	0.45
Index I ₃	B	T2	0.9163 · Ln(Alter) - 0.6016	0.63
Index I ₃	B	T3	0.7189 · Ln(Alter) - 0.0734	0.69
Index I ₃	B	T4	0.6511 · Ln(Alter) + 0.2127	0.28

Tab. 21: Verhaltensmodelle für Kantonsstrassen, Indizes I_{A1}, I_{A2}, I_{A3}, I_{A4}, I_{A5}, I₂, I₃

12.2 Bewertung der Ergebnisse

Die festgestellten Ergebnisse gelten streng genommen für die Strassennetze der jeweils berücksichtigten und verfügbaren Datensätze, sie dürften im grossen und ganzen als typisch für schweizerische Verhältnisse betrachtet werden.

Bei der Auswertung der Gemeindestrassen, haben die zusätzlich gelieferten Daten nur in einem bescheidenen Masse verwendet werden können. Es wurde deshalb "Ersatz" gesucht in Form einer separaten Auswertung der Ortsdurchfahrten von Kantonsstrassen, im Bewusstsein, dass diese nur in beschränktem Masse die Verhältnisse von Erschliessungs- und Sammelstrassen der Verkehrslastklassen T1 und T2 widerspiegeln können.

Die Auswertungen für die Kantonsstrassen können im Allgemeinen als typisch für Mittellandverhältnisse betrachtet werden, extreme Höhenlagen über 1000 m über Meer wurden im Rahmen der Auswertung nicht erfasst. Durch die detaillierte separate Analyse der Daten von 2 Kantonen ist auch die generelle Streuung der Modelle abschätzbar.

Die Wahl von Daten der Nationalstrasse N2 auf dem Gebiet des Kantons Tessin hat sich deshalb angeboten, weil hier vollständige Datensätze aus der Sicht der Zustands-, der Verkehrs und der Altersdaten vorlagen. Zudem kommen auf dieser Strecke beide höchsten Verkehrslastklassen T5 und T6 vor und infolge der gegebenen topographischen Verhältnisse konnte hier auch die Schadenentwicklung bei konzentrierter und langsam

fahrender Verkehrsbelastung untersucht werden, wie sie auf Kriechspuren vorkommen kann. Die allgemeine Zustandsverteilung der Indexwerte I2, I3 und I4 auf dem schweizerischen Nationalstrassennetz, wie sie nach den ersten netzweiten Zustandsmessungen der Jahre 2000 und 2001 festgestellt wurde (es wird davon ausgegangen, dass auch die Ergebnisse der Zustandserfassung 2004 dies bestätigen, auch wenn eine Gesamtauswertung dieser Daten bisher ausgeblieben ist) zeigt ohnehin einen sehr gleichmässigen Situation auf einem hohen Qualitätsniveau, bei welcher schliesslich die Wahl einer Auslese von Strecken für die Erarbeitung von Verhaltensmodellen keine grössere Verlagerungen der Datenstreuung nach sich ziehen kann.

Die im Bericht vorgestellten Ergebnisse und die Angabe der gewählten Vorgehensweise bilden auch die Ausgangslage für mögliche weitere Untersuchungen und eine mit der Zeit immer detailliertere Ausrichtung der Modelle, bei welchen auch zusätzliche Einflussfaktoren werden berücksichtigt werden können, die im Rahmen dieser Arbeit aufgrund einer noch uneinheitlichen Verfügbarkeit von Daten noch nicht in die Auswertung einbezogen werden konnten.

12.3 Zusammenarbeit

Im Rahmen der Durchführung dieser Forschungsarbeit konnten viele Zusatzinformationen durch die Mithilfe und das Entgegenkommen vieler Kollegen aus dem In- und Ausland aus dem Umfeld der Strassenverwaltungen, akademischer Institutionen und von Ingenieurbüros und Labors gewonnen werden. All diesen Leuten und insbesondere den Verwaltungsstellen, welche die Verwendung ihrer Daten für die vorliegende Forschungsarbeit gestattet haben, gebührt der aufrichtige Dank des Verfassers.

13. Literaturverzeichnis

- [1] J.-D. Zufferey, D. Monsch, I. Scazziga, Forschungsauftrag 31/84, Entwicklung von Verhaltensmodellen als Grundlage eines programmierten Erhaltungskonzeptes, Teil 1: Modelle für bleibende Verformungen, Forschungsbericht UVEK/ASTRA Nr. 196, Zürich, Juli 1990
- [2] Viaconsult AG, Vergleich der Zustandserfassung 1988/1991 mit dem ARAN-Gerät, Ergänzende Untersuchungen, Bericht vom 1.11.1991 für das Tiefbauamt des Kantons Graubünden (unveröffentlicht).
- [3] Scazziga, Forschungsauftrag 31/84, Entwicklung von Verhaltensmodellen als Grundlage eines programmierten Erhaltungskonzeptes, Teil 2: Modelle für Betonbeläge, Forschungsbericht UVEK/ASTRA Nr. 320, Zürich, Dezember 1993
- [4] République et Canton de Neuchâtel / Service des Ponts et Chaussées, Office des Routes cantonales, Développement d'un système de gestion pour le réseau des routes nationales, Rapport N°952404, septembre 1996 (unveröffentlicht).
- [5] Viagroup AG: Projekt PMS NE-VS: Aufgabe 1.2 "Datenaggregation", 12/1998
- [6] Viagroup AG: Projekt PMS NE-VS: Tâche 8.3: Extension lois d'évolution RN A5, 12/1998
- [7] Scazziga, Forschungsauftrag 12/99, Evaluation des Strassenzustandes, Forschungsbericht UVEK/ASTRA Nr. 1040, Winterthur, September 2000
- [8] Département des Transports, de l'Équipement et de l'Environnement du Canton du Valais, Service des routes et cours d'eau, Exploitation des données d'auscultation et analyses optimisées des résultats, Rapport No. 61624, avril 2004 (unveröffentlicht).
- [9] M. Crispino, G. Olivari, M. Poggioli, I. Scazziga, Development of pavement management system in the Province of Milano, II International congress SIIV, Firenze, 2004.
- [10] A.-G. Dumont, J.-C. Turtschy, T. Pucci, M. Fontana, I. Scazziga, Analyse des modèles de comportement des chaussées. Forschungsbericht UVEK/ASTRA Nr. 1002, Lausanne, 2001
- [11] W.D.O. Paterson, Road deterioration and maintenance effects, Models for planning and management, The Highway Design and Maintenance Standard Series, World Bank Publication, The Johns Hopkins University Press, Baltimore and London, 1987.
- [12] M. Horat, M. Caprez, L.Seiler-Scherer, Entwicklung der Griffigkeit von Strassenbelägen verschiedener Strassentypen in der Schweiz, Forschungsbericht UVEK/ASTRA Nr. 1037, Zürich, 2003
- [13] -, PARIS, Performance analysis of road infrastructure, Transport Research Fourth Framework Programme, Road Transport DG – 109, Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg, 1999.
- [14] COST 324, *Long Term Performance of Road Pavements*, Final report of the Action, European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research, Luxemburg 1997
- [15] G. Maerschalk, Erhaltungsmanagement: Anwenderhandbuch zum Inhalt des PMS, im Auftrag der Bundesanstalt für Strassenwesen (Bast), Deutschland, Januar 1999
- [16] Alfred Weninger-Vycudil, Dissertation: Entwicklung von Systemelementen für ein österreichisches Pavement Management System, TU Wien 12/2001 (auch erschienen als Mitteilung Nr. 14 des Instituts für Strassenbau und Strassenerhaltung der TU Wien, 2003).
- [17] L.J.E. Heleven, Rational maintenance planning in Flanders (Belgium), Fourth International Conference on Managing Pavements, Durban, 1998.

-
- [18] H.P. Lindenmann und andere: Schlussbericht – Zustandserfassung und Bewertung Nationalstrassen (Fahrbahnen) ZEB-NS (1999-2002), ASTRA, Bern, 2003.
- [19] M. Gothié, CETE Lyon, Präsentation bei Projektmeeting TROWS 2002 in Winterthur (unveröffentlicht).
- [20] M. Gothié, M.T.Do, Road Polishing Assessment Methodology (TROWS), Proceedings, PIARC XXIInd WORLD ROAD CONGRESS, Durban, 2003.
- [21] R. Deighton, J. Sztraka, Pavement Condition, dTV Technical Guide (Volume 3), Deighton Associates, Bowmanville, Ont., 1995.
- [22] R. L. Lytton, Concepts of pavement performance prediction and modeling, Second North American Conference on Managing Pavements, Toronto, Proceedings, Ontario Ministry of Transportation, Toronto, 1987
- [23] J.B. Rauhut, D. S. Gendell, Proposed development of pavement performance prediction models from SHRP/LTPP data, Second North American Conference on Managing Pavements, Toronto, Proceedings, Ontario Ministry of Transportation, Toronto, 1987
- [24] N.C. Jackson, K.R. Keith, A.J. Peters, Predictive pavement condition program in the Washington State pavement management system, Second North American Conference on Managing Pavements, Toronto, Proceedings, Ontario Ministry of Transportation, Toronto, 1987
- [25] R.A. Eaton, S. Gerard, R.S. Dattilo, A rating system for unsurfaced roads to be used in maintenance management, Second North American Conference on Managing Pavements, Toronto, Proceedings, Ontario Ministry of Transportation, Toronto, 1987
- [26] W.D. Cook, A. Kazakov, Pavement performance prediction and risk modelling in rehabilitation budget planning: a Markovian approach, Second North American Conference on Managing Pavements, Toronto, Proceedings, Ontario Ministry of Transportation, Toronto, 1987
- [27] J.K. Cable, Y.C. Suh, Development of pavement performance curves for the Iowa Department of Transportation, Second North American Conference on Managing Pavements, Toronto, Proceedings, Ontario Ministry of Transportation, Toronto, 1987
- [28] D. Bertelsen, A Norwegian model for prediction of pavement deterioration, Second North American Conference on Managing Pavements, Toronto, Proceedings, Ontario Ministry of Transportation, Toronto, 1987
- [29] I. Gschwendt, I. Poljacek, F. Lehovec, M. Prochadzka, Pavement performance prediction model Second North American Conference on Managing Pavements, Toronto, Proceedings, Ontario Ministry of Transportation, Toronto, 1987
- [30] L.D. Hill, Minnesota Department of Transportation implementation of a pavement life prediction model, Second North American Conference on Managing Pavements, Toronto, Proceedings, Ontario Ministry of Transportation, Toronto, 1987
- [31] J. Isotalo, Impacts of studded tyres and their role in pavement management, Second North American Conference on Managing Pavements, Toronto, Proceedings, Ontario Ministry of Transportation, Toronto, 1987
- [32] A.T. Visser, C. Queiroz, A. Caroca, Total cost rehabilitation design method for use in pavement management, Third International Conference on Managing Pavements, San Antonio, Proceedings, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1994.
- [33] V.K. Sood, B.M. Sharma, P.K. Kanchan, K. Sitaramanjyneyulu, Pavement deterioration modeling in India, Third International Conference on Managing Pavements, San Antonio, Proceedings, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1994.
- [34] Nii O. Attoh-Okine, Prediction roughness progression in flexible pavements using artificial neural networks, Third International Conference on Managing Pavements,

- San Antonio, Proceedings, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1994.
- [35] E.O. Lukanen, C. Han, Performance history and prediction modeling for Minnesota pavements, Third International Conference on Managing Pavements, San Antonio, Proceedings, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1994.
- [36] J.M. Jansen, B. Schmidt, Performance models and prediction of increase in overlay need in the Danish state highway pavement management system, BELMAN, Third International Conference on Managing Pavements, San Antonio, Proceedings, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1994.
- [37] K.H. Chua, C.L. Monismith, K.C.Crandall, Mechanistic performance model for pavement management, Third International Conference on Managing Pavements, San Antonio, Proceedings, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1994.
- [38] Cheetham, Auto-adaptive pavement performance prediction methodology, Fourth International Conference on Managing Pavements, Durban, University of Pretoria, Pretoria, 1998
- [39] S.H. Cardoso, A.F. Marcon, Pavement performance models for the state of Santa Catarina (Brazil), Fourth International Conference on Managing Pavements, Durban, University of Pretoria, Pretoria, 1998
- [40] H. Ertman Larsen, P. Ullidtz, Development of improved mechanistic deterioration models for flexible pavements, Fourth International Conference on Managing Pavements, Durban, University of Pretoria, Pretoria, 1998
- [41] F. La Torre, L. Domenichini, M.I. Darter, Roughness prediction model based on the artificial neural network approach, Fourth International Conference on Managing Pavements, Durban, University of Pretoria, Pretoria, 1998
- [42] P. Virtala, Modeling the effects of maintenance and rehabilitation actions on road condition at network level, Fourth International Conference on Managing Pavements, Durban, University of Pretoria, Pretoria, 1998
- [43] W.D.O. Paterson, C.R. Bennett, Guidelines on applying and calibrating the HDM model to local conditions, Fourth International Conference on Managing Pavements, Durban, University of Pretoria, Pretoria, 1998
- [44] Hedfi, P.J. Stephanos, Pavement Performance Modeling: An Applied Approach at the State of Maryland, Fifth International Conference on Managing Pavements, Seattle, Proceedings (CD), 2001
- [45] O. Smadi, Knowledge Based Expert System Pavement Management Optimization, Fifth International Conference on Managing Pavements, Seattle, Proceedings (CD), 2001
- [46] C. Molzer, K. Felsenstein, J. Litzka, R. Viertl, Bayesian Statistics for Developing Pavement Performance Models, Fifth International Conference on Managing Pavements, Seattle, Proceedings (CD), 2001
- [47] Ferreira, A. Antunes, L. Picado-Santos, A GIS-Based Pavement Management System, Fifth International Conference on Managing Pavements, Seattle, Proceedings (CD), 2001
- [48] L. Ningyuan, T. Kazmierowski, S. Tighe, R. Haas, Integrating Dynamic Performance Prediction Models into Pavement Management Maintenance and Rehabilitation Programs, Fifth International Conference on Managing Pavements, Seattle, Proceedings (CD), 2001
- [49] J. Lang, J. Dahlgren, Prediction Model in the Swedish PMS, Fifth International Conference on Managing Pavements, Seattle, Proceedings (CD), 2001

-
- [50] K.S. Venukanthan, P. Sebaaly, G. Fernandez, Development of Performance Models from PMS Data, Fifth International Conference on Managing Pavements, Seattle, Proceedings (CD), 2001
- [51] A. Veeraragavan, P. Rao, Application of Reliability Concepts in Pavement Maintenance Management Fifth International Conference on Managing Pavements, Seattle, Proceedings (CD), 2001
- [52] T. Henning, N. Pradhan, D.J. Wilson, C.R. Bennett, The Nationwide Implementation of Pavement Prediction Modeling in New Zealand, Fifth International Conference on Managing Pavements, Seattle, Proceedings (CD), 2001
- [53] Marchionna, A. Belli, Airport PMS based on a new structural deterioration model, First European Pavement Management Systems Conference, Budapest, Proceedings (CD), 2000
- [54] A.G. Dumont, J.C. Turtshy, Pavement Performance Models for the Swiss Primary Road Network, First European Pavement Management Systems Conference, Budapest, Proceedings (CD), 2000
- [55] V. Forrai-Hernádi, L. Gáspár, A. Gulyás, Highway performance modelling in Hungary, First European Pavement Management Systems Conference, Budapest, Proceedings (CD), 2000
- [56] Gschwendt, R. Stano, I. Stevuska, Modelling of asphalt pavements degradation for PMS, First European Pavement Management Systems Conference, Budapest, Proceedings (CD), 2000
- [57] O. Gutiérrez-Bolivar, F. Achútegui, Relation between fatigue and deflection, First European Pavement Management Systems Conference, Budapest, Proceedings (CD), 2000
- [58] J. Lang, J.M. Dahlgren, Prediction model in the Swedish PMS, First European Pavement Management Systems Conference, Budapest, Proceedings (CD), 2000
- [59] M. Nawaiseh, O. Attoh Okine, Effect of different learning rates of adaptive logic networks: a case for pavement performance modelling, First European Pavement Management Systems Conference, Budapest, Proceedings (CD), 2000
- [60] P. Pereira, Y. Delanne, The prediction of pavement ride quality from pavement roughness Indexes, First European Pavement Management Systems Conference, Budapest, Proceedings (CD), 2000
- [61] K.J. Feighan, Conversion of deterministic models to stochastic models for use in PMS, First European Pavement Management Systems Conference, Budapest, Proceedings (CD), 2000
- [62] T.C. Martin, Pavement performance prediction in PMS: quantifying the influence of maintenance in reducing pavement deterioration and life-cycle costs, First European Pavement Management Systems Conference, Budapest, Proceedings (CD), 2000
- [63] J.D. Roberts, A pavement structural deterioration model for HDM-4, First European Pavement Management Systems Conference, Budapest, Proceedings (CD), 2000
- [64] L. Gáspár, Actual condition improving effect of major pavement maintenance treatments, Second European Pavement and Asset Management Conference, Berlin, 2004 (CD)
- [65] Ph. Lepert, M. Reche, D. Leroux, Y. Savard, K. de Blois, Development of pavement performance model from test sections database – application, Second European Pavement and Asset Management Conference, Berlin, 2004 (CD)
- [66] G. Bosurgi, A. D'Andrea, F. Trifirò, Development of a sideways force coefficient prediction model based on the artificial neural networks, Second European Pavement and Asset Management Conference, Berlin, 2004 (CD)

-
- [67] R. Roos, H.-J. Freund, A. Großmann, Substanzbewertung und Prognose des Gebrauchsverhaltens von Betonfahrbahnen, Second European Pavement and Asset Management Conference, Berlin, 2004 (CD)
- [68] Aavik, P. Sürje, Use of Falling Weight Deflectometer measurement data in Estonian pavement management system, Second European Pavement and Asset Management Conference, Berlin, 2004 (CD)
- [69] P.D. Hunt, J.M.Bunker, Roughness Deterioration of Bitumen Sealed Pavements, Sixth International Conference on Managing Pavements, Brisbane, Proceedings (CD), 2004
- [70] G.J. Giummarra, T.C. Martin, L. Choummanivong, Establishing Deterioration Models for Local Roads in Australia, Sixth International Conference on Managing Pavements, Brisbane, Proceedings (CD), 2004
- [71] I.D. Greenwood, C. Parkman C, W. Hatcher, Implementation of Sensitivity Testing into a National Pavement Deterioration Model: The Transit New Zealand Experience, Sixth International Conference on Managing Pavements, Brisbane, Proceedings (CD), 2004
- [72] T.P.F. Henning, R.C.M. Dunn, S.B. Costello, G. Hart, C.C.Parkman, G. Burgess, Long-term Pavement Performance (LTPP) Studies in New Zealand – Lessons, the Challenges and the Way Ahead, Sixth International Conference on Managing Pavements, Brisbane, Proceedings (CD), 2004
- [73] J.W.H. Oliver, Prediction of the Life of Sprayed Seals and the Effect of Climate, Durability and Seal Size, Sixth International Conference on Managing Pavements, Brisbane, Proceedings (CD), 2004
- [74] T. Kazmierowski, N. Li, Impact of Performance Measures on Pavement Asset Management in Canada, Sixth International Conference on Managing Pavements, Brisbane, Proceedings (CD), 2004
- [75] Z. Hoque, T.C. Martin, Status of Australia's Long Term Pavement Performance Maintenance (LTPPM) Study, Sixth International Conference on Managing Pavements, Brisbane, Proceedings (CD), 2004
- [76] P. Kadar, The Impact of Routine Maintenance onto Pavement Performance – The Missing Link, Sixth International Conference on Managing Pavements, Brisbane, Proceedings (CD), 2004
- [77] N.C. Jackson, R. Deighton, D.L. Huft, Development of Pavement Performance Curves for Individual Distress Indexes in south Dakota Based on Expert Opinion, Transportation Research Record No. 1524, TRB, National Academy Press, Washington, D.C., 1996.
- [78] K. Hinsch, G. Krause, G. Maerschalk, J. Rübensam, Katalogisierung von beschreibenden Grössen für das Gebrauchsverhalten von Fahrbahnbefestigungen und die Wirkung von Erhaltungsmassnahmen, Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 915, Bonn, 2005.
- [79] S. Huschek, Entwicklung der Oberflächeneigenschaften auf der Versuchsstrecke Bamberg A70, Messtechnische Erfassungen 1999 – 2001, Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 898, Bonn, 2004.
- [80] H.P. Lindemann, R. Weber, B. Ranft, Y. Chabot-Zhang, Unfallgeschehen auf stark belasteten Autobahnen, IVT-ETH Zürich, 2000.
- [81] M. Hussain-Khan, J.D. Burnat, B. Collaud, Système informatisé de gestion des chaussées, Forschungsbericht UVEK/ASTRA Nr. 390, 1997
- [82] E. Simond, Relevé visuel des dégradations I1, Essai croisé réalisé sur 10 tronçons des routes nationales vaudoises, Service des routes / routes nationales du Canton Vaud, Rapport interne, 2000.

- [83] A. Jacot, I. Scazziga, Langzeitverhalten und Dimensionierung von Zementstabilisierungen, Forschungsbericht UVEK/ASTRA Nr. 113, 1985.
- [84] R. werner, I. Scazziga, C. Raab, M.N. Partl, Kombinierte Beläge, Belagsüberzüge auf Betondecken, Kompositbeläge, Forschungsbericht UVEK/ASTRA Nr. 1180, 2007.