



Modelle der Zustandsentwicklung von Fahrbahnen – mapFALKE (Methoden und Anforderungen der Prognose des Fahrbahnzustands zur Abschätzung von langfristigen Kosten in der Erhaltungsplanung)

**Modèles pour l'évolution de l'état des chaussées - mapFALKE
(Méthodes et exigences de prévision de l'état des routes pour
estimer les coûts à long terme de la planification d'entretien)**

**Models of pavement deterioration - mapFALKE
(Methods and requirements of road condition forecasting for
estimating long-term costs of maintenance planning)**

**Infrastructure Management Consultants (IMC) GmbH
Dr. Frank Schiffmann
Dr. Rade Hajdin
Dr. Tim Blumenfeld
Arnór Elvarsson**

**Eidgenössische Materialprüfanstalt (Empa)
Prof. Dr. Christiane Raab
Dr. Martin Arraigada**

**Deighton Ingenieurbüro für Verkehrswesen und Infrastrukturplanung GmbH
Dr. Alfred Weninger-Vycudil**

**ISBS Technische Universität Braunschweig
Prof. Dr. Michael Wistuba
Dr. Johannes Büchner
Tess Sigwarth**

**Forschungsprojekt VSS 2018/421 auf Antrag des Schweizerischen
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

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

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

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

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

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

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

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

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



Modelle der Zustandsentwicklung von Fahrbahnen – mapFALKE (Methoden und Anforderungen der Prognose des Fahrbahnzustands zur Abschätzung von langfristigen Kosten in der Erhaltungsplanung)

**Modèles pour l'évolution de l'état des chaussées - mapFALKE
(Méthodes et exigences de prévision de l'état des routes pour
estimer les coûts à long terme de la planification d'entretien)**

**Models of pavement deterioration - mapFALKE
(Methods and requirements of road condition forecasting for
estimating long-term costs of maintenance planning)**

**Infrastructure Management Consultants (IMC) GmbH
Dr. Frank Schiffmann
Dr. Rade Hajdin
Dr. Tim Blumenfeld
Arnór Elvarsson**

**Eidgenössische Materialprüfanstalt (Empa)
Prof. Dr. Christiane Raab
Dr. Martin Arrigada**

**Deighton Ingenieurbüro für Verkehrswesen und Infrastrukturplanung GmbH
Dr. Alfred Weninger-Vycudil**

**ISBS Technische Universität Braunschweig
Prof. Dr. Michael Wistuba
Dr. Johannes Büchner
Tess Sigwarth**

**Forschungsprojekt VSS 2018/421 auf Antrag des Schweizerischen
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Dr. Frank Schiffmann, IMC GmbH

Mitglieder

Dr. Rade Hajdin, IMC GmbH

Dr. Tim Blumenfeld, IMC GmbH (ab 01.10.2020)

Arnór Elvarsson, IMC GmbH (bis 31.12.2020)

Prof. Dr. Christiane Raab, EMPA

Dr. Martin Arraigada, EMPA

Dr. Alfred Weninger-Vycudil, Deighton GmbH

Prof. Dr. Michael Wistuba, ISBS TU Braunschweig

Dr. Johannes Büchner, ISBS TU Braunschweig

Tess Sigwarth, ISBS TU Braunschweig

Federführende Fachkommission

Fachkommission 4: Bau und Geotechnik, Strassenerhaltung, Baumanagement

Begleitkommission

Präsident

Martin Horat

Mitglieder

Luzia Seiler

Alain Jacot

Prof. Martin Stolz

Dr. Michael Lobsiger

Antragsteller

Bundesamt für Strassen (ASTRA)

Bezugsquelle

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

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	9
Résumé	13
Summary	17
1 Einleitung	21
1.1 Ausgangslage und Problemstellung	21
1.2 Ziele	22
1.3 Methodik und Lösungsansatz	23
1.4 Aufbau des Berichts	23
2 Grundlagen der Entscheidungsfindung im Erhaltungsmanagement	25
2.1 Allgemeines	25
2.2 Prozesse des Erhaltungsmanagements	25
2.3 Schadenentstehung und Ableitung des Zustands	27
2.3.1 Schadensbilder	27
2.3.2 Einflussgrößen auf die Schadensentwicklung	28
2.3.3 Untersuchungsmethoden zur Analyse und Prognose des Strassenoberbauzustands	30
2.4 Zustand der Fahrbahnoberfläche und dessen Bewertung	30
2.4.1 Erhobene Zustandsmerkmale	31
2.4.2 Zustandserfassung	32
2.4.3 Zustandsbewertung	33
2.4.4 ZEB im D-A-CH-Vergleich	34
2.5 Kapitelzusammenfassung	36
3 Qualitätsanforderungen an den Strassenoberbau	37
3.1 Allgemeines	37
3.2 Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche	37
3.3 Eigenschaften des Strassenoberbaus	38
3.4 Schweizerische Qualitätsüberwachung im Rahmen eines Prüfplanablaufs	38
3.5 Datenqualität in der Praxis	43
3.5.1 Schweiz	43
3.5.2 Deutschsprachiges Ausland	45
3.6 Kapitelzusammenfassung	49
4 Prognosemodelle für Fahrbahnen	51
4.1 Grundlagen	51
4.1.1 Allgemeines	51
4.1.2 Phasen der Zustandsveränderung	52
4.1.3 Möglichkeiten der Zustandsprognose	53
4.2 Deterministische Prognosemodelle	54
4.2.1 Multivariate deterministische Zustandsprognosemodelle am Beispiel Österreich	55
4.2.2 Anwendung von deterministischen Zustandsprognosemodellen im PMS und Stufen der Kalibrierung	56
4.3 Probabilistische Prognosemodelle	58
4.3.1 Grundlagen	58
4.3.2 Survival Analyse	58
4.3.3 Markov-Prozess	60
4.3.4 Bayes'scher Ansatz	61

4.4	Vor- und Nachteile der Prognoseverfahren	63
4.5	Kapitelzusammenfassung.....	64
5	Datengrundlage.....	65
5.1	Allgemeines	65
5.2	Versuchsstrecke Thüringen	65
5.2.1	Aufbaudaten.....	66
5.2.2	Materialkennwerte.....	66
5.2.3	Verkehrsdaten.....	69
5.2.4	Zustandsdaten	70
5.3	Versuchsstrecke Staffeleggstrasse	71
5.3.1	Aufbaudaten.....	72
5.3.2	Beschleunigte Verkehrssimulation Versuche mit die MLS10 in Jahr 2010	73
5.3.3	Materialkennwerte.....	76
5.3.4	Verkehrsdaten.....	94
5.3.5	Zustandsdaten	95
5.4	Kapitelzusammenfassung.....	96
6	Methoden zur Nutzung von Materialuntersuchungen bei Prognosemodellen	99
6.1	Konventionelle Bitumenprüfungen	99
6.2	Rheologische Bitumenprüfungen im Dynamischen Scherrheometer (DSR)	100
6.2.1	Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren (BTSV)	101
6.2.2	Performance Prüfungen.....	102
6.3	Simulation der Bitumenalterung.....	104
6.4	Belastungsversuche.....	105
6.4.1	Berücksichtigte MLS10 Projekte	107
6.4.2	Ergebnisse	110
6.5	Bewertung des Potentials von Prüfverfahren	114
6.5.1	Bewertungskriterien	114
6.5.2	Bewertungsergebnisse	114
6.6	Kapitelzusammenfassung.....	115
7	Integration von Materialuntersuchungen in die Modellbildung	117
7.1	Allgemeines	117
7.2	Methodischer Ansatz	117
7.3	Anwendungsfall 1 – Ermittlung einer Masterkurve (Stufen 0 und 1)	118
7.4	Anwendungsfall 2 – Zustandsbasierte Kalibrierung (Stufe 2).....	119
7.5	Anwendungsfall 3 – Materialbasierte Kalibrierung (Stufe 3).....	120
7.5.1	Anwendungsfall 3a – Integration von Druck-Schwell-Versuchen	120
7.5.2	Anwendungsfall 3b – Integration der Bindemittelalterung	122
7.5.3	Anwendungsfall 3c – Bestimmung des Alters	123
7.6	Modellvariante 1 – Umsetzung von Anwendungsfall 1	125
7.6.1	Vorüberlegungen zu möglichen Eingangsgrößen	125
7.6.2	Durchführung der Untersuchung	126
7.6.3	Ergebnisse und Bewertung.....	130
7.7	Modellvariante 2 – Umsetzung von Anwendungsfall 3b und 3c.....	131
7.7.1	Laboruntersuchungen	132
7.7.2	Ergebnisse und Bewertung.....	136
7.7.3	Bestimmung von Alterungsfunktionen	137
7.7.4	Integration der Alterungsfunktionen in die Zustandsprognose	140
7.8	Kapitelzusammenfassung.....	142
8	Prototyp und exemplarische Anwendung.....	145
8.1	Allgemeines	145
8.2	Grundstruktur des Prototyps.....	145

8.2.1	Datenstruktur	145
8.2.2	Datengrundlage	146
8.2.3	Grundfunktionen	148
8.2.4	Modellparameter und Randbedingungen	149
8.3	Theoretische Grundlagen und Berechnungsschritte	150
8.3.1	Allgemeines	150
8.3.2	Fall 0: Erstellung von clusterspezifischen Masterkurven (Stufe 0 und 1)	150
8.3.3	Fall 1: zustandsbasierte Kalibrierung (Stufe 2)	151
8.3.4	Fall 2: materialspezifische Kalibrierung – Integration der Bindemittelalterung (Stufe 3)	153
8.4	Anwendungsbeispiele	155
8.4.1	Allgemeines	155
8.4.2	Fall 0: Netzweite materialspezifische Kalibrierung der Masterkurve	156
8.4.3	Fall 1: Abschnittsbezogene zustandsbasierte Kalibrierung der Verhaltensfunktion	157
8.4.4	Fall 2: Abschnittsbezogene materialspezifische Kalibrierung	159
8.5	Kapitelzusammenfassung	160
9	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	161
9.1	Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen	161
9.1.1	Zustandsdaten der Fahrbahnoberfläche	162
9.1.2	Daten des vorhandenen Schichtensystems	162
9.1.3	Daten von ausgeführten Erhaltungsmaßnahmen	162
9.1.4	Ursachen und Wirkungen bei der Zustandsentwicklung	163
9.1.5	Modellbildung der Zustandsentwicklung	163
9.2	Empfehlungen für die Praxis	163
9.2.1	Einsatz von Modellen der Zustandsentwicklung	164
9.2.2	Anforderungen an die Durchführung der Zustandserfassung	164
9.2.3	Einführung von neuartigen Bindemittel- und/oder Mastixprüfungen mit dem Dynamischen Scherrheometer (DSR)	164
9.2.4	Datenmanagement und Digitalisierung	165
9.3	Empfehlungen für die Normierung	165
9.3.1	Anforderungen und Qualitätsstandards der Zustandserfassung und -bewertung für Strassen	165
9.3.2	Revision der VSS 40925/40926 Zustandserfassung und -bewertung von Fahrbahnen	166
9.3.3	Erarbeitung der VSS 40920 Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen	166
9.4	Forschungsbedarf	166
9.4.1	Genauigkeit von Messverfahren der Zustandserfassung und Kennzahlen des Strassenoberbaus nach Einbau	166
9.4.2	Zusammenhänge zwischen der Zustandsentwicklung der Fahrbahnoberfläche und Material- und Schichtendaten	167
9.4.3	Erweiterung der Kalibrierung unter Verwendung eines Partikelfilters	167
	Anhänge	169
	Glossar	178
	Literaturverzeichnis	179
	Projektabschluss	183

Zusammenfassung

Das steigende Bedürfnis nach Mobilität von Personen und Gütern führt nicht nur im schweizerischen Strassennetz zu einem stetigen Anstieg der Verkehrsbelastung und des Schwerverkehrs. Wie bei allen Ingenieuraufgaben, die mit komplexen Baustoffen zusammenhängen, ist auch die Konzeption, die Erstellung und das Management von Asphaltbelägen ein Optimierungsprozess, der letztlich nur durch sorgfältiges Abwägen sämtlicher kurz- und langfristiger Zielvorgaben alle Anspruchsgruppen zufriedenstellen vermag. Hierbei ist ein Gleichgewicht zwischen den Anforderungen des Betreibers, der Nutzenden und der Öffentlichkeit an die Strasseninfrastruktur zu finden. Dabei sind neben den zu erwartenden Einwirkungen auf den Strassenoberbau auch die konstruktive Lösung des Ingenieurs einschliesslich Konzept und Ausführung sowie das Verhalten und die Beschaffenheit der Baustoffe bzw. der Schichten zu berücksichtigen. Das Ziel des Erhaltungsmanagements ist das Erreichen bzw. Aufrechterhalten eines erforderlichen Leistungsniveaus der bestehenden Strasseninfrastruktur durch eine systematische Bestimmung von notwendigen und optimalen Erhaltungsmassnahmen. Modelle zur Zustandsentwicklung von Fahrbahnen sind dabei ein wichtiger Baustein zur Abschätzung langfristiger Erhaltungskosten. Derzeit werden in der Schweiz vereinzelt deterministische Verhaltensfunktionen für die kurz-, mittel- oder langfristige Erhaltungsplanung eingesetzt, die aufgrund der notwendigen Eingangsparametern zum Teil nur eine sehr generalisierte Prognose ermöglichen.

Ziel

Das Ziel des Forschungsprojekts mapFALKE war die Verbesserung der Abschätzung der langfristigen Kosten in der Erhaltungsplanung. Dies wird durch die Weiterentwicklung von Methoden zur Bildung von Modellen der Zustandsprognose unter Heranziehung erweiterter Kalibrierverfahren zur Bestimmung verhaltensorientierter Materialeigenschaften erreicht. Die bisherigen Ansätze, welche u. a. Zustandsdaten, Klimadaten über Temperatur und Niederschlag, Bauweisen und Deckschichtarten sowie die Altersstruktur berücksichtigen, stellen dabei die Ausgangsbasis dar. Gleichfalls sollten Möglichkeiten aufgezeigt werden, wie man bei einer beschränkten Datenqualität bzw. -quantität vorgehen kann. Dabei sollten zusätzlich vorhandene bzw. leicht zu ermittelnde Informationen aus Materialuntersuchungen aus der Realisierung von Baumassnahmen die Genauigkeit der Modelle der Zustandsentwicklung erhöhen oder bei Bedarf eine Ergänzung zur Verbesserung der eventuell schlechten Qualität bzw. bei fehlenden Daten darstellen.

Methodik

Die Methodik beim Vorgehen der Entwicklung von deterministischen bzw. probabilistischen Modellen war identisch zu dem Vorgehen bei empirischen Untersuchungen unter Heranziehung von Beobachtungen und deren Einflussfaktoren. Die Neuheit im Bereich der Modelle der Zustandsentwicklung sind die Verwendung von einerseits netzweit vorhandenen Strassendaten, hierzu gehören meist ausschliesslich die Zustandsdaten, und andererseits Daten von vorhandenen bzw. zusätzlich leicht zu erhebenden Laborergebnissen aus örtlichen Materialuntersuchungen für die Kalibrierung der Modelle einzelner Strassenabschnitte. Im Rahmen der Modellentwicklung und -kalibrierung wurden Daten aus Materialuntersuchungen benötigt. Im Rahmen der Forschungsarbeit standen durch das ISBS der TU-Braunschweig und die EMPA zwei Teststrecken mit bereits vorhandenen Laborergebnissen aus der Vergangenheit zur Verfügung, an welchen weitere Materialuntersuchungen durchgeführt werden konnten. Zudem konnten Daten aus unterschiedlichen Belastungsversuchen der EMPA nochmals für die Modellbildung ausgewertet werden. Es wurden zusätzlich Korrelationen an vorhandenen Zustandsdaten geprüft.

Ergebnisse

Zu Beginn wurden die grundlegenden Prozesse eines systematischen Erhaltungsmanagements vorgestellt. Es wurde aufgezeigt, dass die Prognose der Zustandsentwicklung innerhalb eines Erhaltungsmanagements ein wesentliches Kernelement ist und wie deren Ergebnisse bei der Entscheidungsfindung verwendet werden. Zudem wurde verdeutlicht, wie Schäden am Strassenoberbau entstehen und die Ableitung eines Zustandsbegriffs beim Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen stattfindet. Die Aussagefähigkeit, bzw. -genauigkeit der Zustandsprognosen von bisherig eingesetzten Modellen ist beschränkt. Dies liegt zum einen daran, dass die Eingangsdaten natürliche Streuungen aufweisen. Zum anderen besteht eine Herausforderung darin, die komplexen Schadensmechanismen mit Hilfe von Modellen treffend abzubilden. Die Vielzahl an Einflussfaktoren und deren komplexes Zusammenwirken erschweren die Fragestellung zusätzlich.

Grundlagen

Weiterhin wurden die derzeitigen minimalen Qualitätsanforderungen an den Strassenoberbau dargestellt. In der Schweiz bestehen hierbei Normen und Richtlinien, welche einerseits Anforderungen an die Fahrbahnoberfläche und andererseits an den Strassenoberbau für das verwendete Mischgut und die eingebauten Schichten im Rahmen eines Prüfplans definieren. Für die Anforderungen über die Lebensdauer sind zusätzlich für die Oberflächenmerkmale relevante Schwellenwerte definiert. Diese oberflächenbezogenen Zustandsmerkmale sind unabhängig von der vorhandenen Bewertung im Rahmen der Zustandserfassung und -bewertung des Erhaltungsmanagements. Des Weiteren wurde die aktuelle Datenhaltung in der Schweiz betrachtet. Während Zustandsdaten bei den schweizerischen Strassenbetreibern überwiegend bereits aus mehreren Messkampagnen der Zustandserfassung und -bewertung im Strasseninformationssystem vorliegen, sind Aufbaudaten mehrheitlich unvollständig oder zum Teil nicht erfasst. Dieses Defizit ist erkannt und wird bereits bei den Strassenbetreibern langfristig bearbeitet. Ein vorhandener Bruch in der Informationskette zeigt sich bei den projektbezogenen Daten der Kontrollprüfungen. Obwohl die für diese Prüfungen zuständigen Baulabore die Prüfungsergebnisse weitestgehend digital in standardisierter Form ablegen, fehlt eine Referenzierung auf das standardisierte Referenzsystem der vorhandenen Strasseninformationssysteme. Zusätzlich werden die Ergebnisse meist in Papierform weitergegeben oder existieren in digitaler Form nur als PDF-Scan bei den Strassenbetreibern. Eine datenbanktechnische Verknüpfung der netzweit vorhandenen Strassendaten im Erhaltungsmanagement mit den Daten aus Materialprüfungen ist aktuell nur mit erheblichem manuellem Aufwand möglich.

In Hinblick auf die Aufgabenstellung erfolgte schliesslich eine Übersicht zu möglichen Prognosemethoden, die für eine Abschätzung der Zustandsentwicklung von Fahrbahnen im Einsatz sind oder zukünftig in Frage kommen. Dazu wurden zunächst die charakteristischen Phasen der Zustandsveränderung einer Strasse und die mathematischen Grundlagen zu deterministischen und probabilistischen Prognosemethoden sowie deren jeweilige Vor- und Nachteile aufgezeigt. Damit einhergehend wurden auch die jeweiligen Anforderungen an die Eingangsdaten erläutert. Weiterhin erfolgte die Darstellung von einigen Anwendungsbeispielen in Hinblick auf die Möglichkeiten zur Integration von Materialparametern in die Modellansätze und Verfahren zu deren Kalibrierung.

Erhebung und Analyse von Daten aus zwei Teststrecken

Darauf aufbauend wurden zwei Versuchsstrecken vorgestellt, deren Daten im Rahmen dieses Projektes aufbereitet und ausgewertet wurden. Dies umfasste, neben der Erfassung und Bewertung des Zustands der Fahrbahnoberfläche, auch Aufbaudaten, materialbezogene Daten und Verkehrsdaten. Die vorliegenden Daten dieser Versuchsstrecken erlaubten die Integration von Materialuntersuchungen in die Zustandsprognose. Es zeigte sich, dass die Daten zum Zustand der Fahrbahnoberfläche in Datenbanken meist historisiert vorliegen. Damit stehen diese Daten maschinenlesbar für netzweite Analysen zur Verfügung. Zum Teil konnten dabei jedoch Defizite in der

Datenqualität festgestellt werden. Ein weiteres Defizit zeigte sich bei den Aufbau- bzw. Schichtendaten. Diese für die Modellentwicklung notwendigen Daten sind aktuell bei den meisten Strassenbetreibern nicht flächendeckend, sondern nur sehr lückenhaft vorhanden. Auch werden oftmals ausgeführte Erhaltungsmassnahmen nicht ausreichend dokumentiert. Die vorhandenen Projektdaten von Bohrkernuntersuchungen, welche Aufschluss über die Ergebnisse der Kontrollprüfungen von Material und Schichteneinbau geben, werden nicht kompatibel zur Strassendatenbank referenziert und meist auch nicht digital abgelegt. Eine Analyse von Zusammenhängen durch netzweite statistische Auswertungen war somit nur begrenzt möglich.

Analyse von Daten aus Belastungsversuchen

Aufbauend auf der Darstellung unterschiedlicher klassischer und neuartiger Materialuntersuchungen wurden schliesslich die Daten verschiedener Vorgängerprojekte, bei denen Belastungsversuche mit der MLS10 durchgeführt wurden, ausgewertet und das Potential von innovativen Prüfverfahren für die Verwendung bei der Entwicklung von Modellen der Zustandsentwicklung bewertet. In diesem Zusammenhang konnte festgestellt werden, dass ein konventionelles Vorgehen bei der Bitumenprüfung an seine Grenzen stösst. Performance-Prüfungen zeigen jedoch neue Perspektiven auf. Bis jetzt werden diese Daten nicht zusammen referenziert mit den Strassendaten im Strasseninformationssystem abgelegt. Zudem wurde bisher eine Historisierung dieser Projektdaten analog den Zustandsdaten nicht verfolgt. Dies machte eine statistische Analyse über ein Strassennetz unmöglich. Insbesondere bei den Auswertungen zu den MLS10-Daten von fünf verschiedenen Belastungsversuchen zeigte sich die Notwendigkeit von zusätzlichen Daten, welche eine Auswertung zum Erkennen von statistischen Zusammenhängen ermöglichen. Während bei der Bildung von Spurrinnen ein relativ klares Muster erkennbar war, konnte für die Rissausbreitung keine Aussage getroffen werden.

Entwicklung methodischer Ansätze

Schliesslich wurden methodische Ansätze entwickelt, die eine Integration von unterschiedlichen Materialuntersuchungen in die Modellbildung zur Zustandsprognose ermöglichen. Hierzu wurden verschiedene Kalibrierungsstufen der Modellbildung in Abhängigkeit der verwendeten Eingangsdaten eingeführt.

Die Eingangsdaten können nach verschiedenen Randbedingungen geclustert werden. Ziel der Clusterung ist es hierbei, den Anteil an Streuungen innerhalb der gefitteten Verhaltenskurve je Cluster zu minimieren. Zu diesem Zwecke wurde im Rahmen von Voruntersuchungen basierend auf Korrelationsanalysen der potenzielle Einfluss einzelner Materialkennwerte auf die Zustandsentwicklung der Oberflächeneigenschaften untersucht. Aufgrund einer verhältnismässig geringen Datengrundlage sowie vermuteten geringen Effektstärken konnten nur vereinzelt statistisch signifikante Abhängigkeiten festgestellt werden.

Zuerst erfolgt die Ermittlung einer clusterspezifischen Masterkurve und zugehörigen der Funktionskoeffizienten. In einem weiteren Schritt wurden die möglichen Vorgehensweisen für eine abschnittsbezogene Kalibrierung mit Hilfe von vorhandenen Daten der Zustandserfassung dargestellt. Eine Erweiterung der bestehenden Ansätze erfolgte schliesslich durch die Integration von Bindemitteluntersuchungen in die Modellierung der Zustandsentwicklung. Hierzu wurden parameterspezifische Alterungskurven aus den Laboruntersuchungen zur Bestimmung der Ermüdungs-, Verformungs- und Rissbildungseigenschaften hergeleitet und aufgezeigt, wie diese in die bestehenden, sowohl deterministischen als auch probabilistischen, Ansätze zur Prognosemodellierung integriert werden können.

Proof-of-Concept

Die entwickelten Ansätze wurden im Rahmen einer prototypischen Anwendung umgesetzt. Der Prototyp ermöglicht eine probabilistische Zustandsprognose von einzelnen Strassenabschnitten sowie eine Analyse der Zustandsentwicklung auf der Netzebene. Im

Prototyp wurden die Analysemöglichkeiten der vorhandenen Strasseninfrastrukturdaten exemplarisch getestet und entsprechende Visualisierungen erstellt. Die Zustandsprognose basiert auf vorgegebenen *a priori* Prozessfunktionen, merkmalsbezogenen Zustandsdaten sowie Ergebnissen aus Materialuntersuchungen im Labor, im gegenständlichen Fall von Bindemitteluntersuchungen. Mit Hilfe des entwickelten Prototyps konnten die *a priori* festgelegten Prozessfunktionen durch Clusterung verfeinert und in die abschnittsbezogene Kalibrierung von Verhaltensfunktionen integriert werden. Damit wird eine Methodik zur Verfügung gestellt, die durch Berücksichtigung von Material- und Schichteneigenschaften eine Verfeinerung der Zustandsprognose ermöglicht.

Schlussfolgerungen

Insgesamt konnten anhand der Bearbeitung dieses Forschungsprojekts und der erzielten Ergebnisse verschiedene Erkenntnisse gewonnen und daraus entsprechende Schlussfolgerungen gezogen werden. Diese betreffen einerseits die vorhandene Datenlage und -qualität der Zustandsdaten der Fahrbahnoberfläche sowie andererseits die Daten zum Schichtenaufbau und die dazugehörigen Materialprüfungen.

Die vorhandenen Informationen sind zum Teil heterogen und nicht im Strasseninformationssystem integriert, d. h. dadurch nicht netzweit auswertbar. Es zeigt sich, dass Daten einerseits nicht vollständig erfasst und zum Teil vor der Integration in die Strassendatenbank unzureichend validiert sowie auf ihre Plausibilität hin nicht überprüft werden. Dies lässt auf eine fehlende Qualitätssicherung im Datenmanagement schliessen.

Es ist bekannt, dass jede Art der netzweiten Zustandserfassung durch schnellfahrende Messsysteme Messunsicherheiten beinhaltet. Diese Messunsicherheiten können durch standardisierte qualitätssichernde Massnahmen begrenzt werden. Eine Standardisierung zur Qualitätssicherung der Zustandserfassung und -bewertung von Fahrbahnen fehlt aktuell in der Schweiz.

Die vorhandenen Strassendaten stellen jedoch die Grundlage für das Erhaltungsmanagement dar (z. B. für die Erarbeitung von Modellen der Zustandsentwicklung). Ihr effektiver Nutzen im Erhaltungsmanagement lässt sich nur durch eine hohe Qualität der Daten und der Verknüpfung von unterschiedlichen Strassendaten realisieren.

Andererseits erweisen sich die Zusammenhänge unterschiedlicher Ursachen der Zustandsentwicklung innerhalb des Schichtensystems als sehr komplex. Statistische Analysen sind aktuell aufgrund der fehlenden Daten zur netzweiten Auswertung nicht sinnvoll, da die Stichprobe für eine aussagekräftige Analyse zu klein ist. Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Bindemitteluntersuchungen sind jedoch durchaus gut interpretierbar, auch wenn ein direkter Zusammenhang zu den Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche noch nicht hergestellt werden konnte.

Résumé

Le besoin croissant de mobilité des personnes et des marchandises entraîne une croissance continue du volume de trafic et du trafic de poids lourds, et pas seulement sur le réseau routier suisse. Comme pour toutes les tâches d'ingénierie impliquant des matériaux de construction complexes, la conception, la construction et la gestion des chaussées en enrobés bitumineux est un processus d'optimisation qui ne peut finalement satisfaire toutes les parties prenantes qu'en prenant soigneusement en compte tous les objectifs à court et à long terme. Un équilibre doit être trouvé entre les demandes des autorités routières, des usagers et du public sur l'infrastructure routière. Outre les effets attendus sur la surface de la chaussée, il faut également prendre en compte la solution constructive de l'ingénieur, y compris le concept et l'application, ainsi que le comportement et l'état des matériaux de construction et des couches. L'objectif de la gestion des chaussées est d'atteindre ou de maintenir un niveau de service requis de l'infrastructure routière existante en déterminant systématiquement les mesures d'entretien nécessaires et optimales. Les modèles de détérioration des chaussées sont un élément important pour l'estimation des coûts d'entretien à long terme. Actuellement, les modèles déterministes pour la planification de l'entretien à court, moyen et long terme sont utilisés de manière sporadique en Suisse, qui ne permettent en partie qu'une prévision très généralisée en raison des paramètres d'entrée nécessaires.

Objectif

L'objectif du projet de recherche mapFALKE était d'améliorer l'estimation des coûts à long terme dans la planification de l'entretien. Cet objectif est atteint grâce au développement de méthodes de modélisation de la détérioration de la surface des chaussées utilisant des procédures de calibrage étendues pour la détermination des propriétés des matériaux axées sur la performance. Les approches précédentes, qui prennent en compte par exemple les données sur l'état, les données climatiques sur la température et les précipitations, les méthodes de construction et les types de couche de surface, ainsi que leur structure d'âge, représentent le point de départ. En même temps, il faut montrer les possibilités de procéder dans le cas d'une qualité ou d'une quantité limitée de données. Dans ce contexte, les informations supplémentaires disponibles ou facilement déterminées à partir des essais de matériaux du processus de construction devraient augmenter la précision des modèles de détérioration ou, si nécessaire, représenter un complément pour améliorer la mauvaise qualité des données ou les données manquantes.

Méthodologie

La méthodologie pour le développement de modèles déterministes ou probabilistes était identique à la procédure pour les enquêtes empiriques utilisant les observations et leurs facteurs d'influence. La nouvelle approche des modèles de détérioration des chaussées est l'utilisation des données routières disponibles sur l'ensemble du réseau, d'une part, qui comprennent généralement uniquement des données sur l'état de la chaussée, et d'autre part, des données provenant de résultats de laboratoire existants ou facilement collectés lors d'essais de matériaux locaux pour le calibrage des modèles de sections de route individuelles. Dans le cadre de la génération et de la calibration du modèle, des données provenant d'essais de matériaux étaient nécessaires. Pour le projet de recherche, l'ISBS de TU-Braunschweig et l'EMPA ont pu fournir deux sections d'essai avec des résultats d'essais antérieurs et la possibilité de procéder à d'autres essais de matériaux dans le cadre du projet. En outre, les données existantes des projets d'essais accélérés de chaussées de l'EMPA ont pu être analysées à nouveau pour la modélisation. Les corrélations ont également été vérifiées sur les données disponibles sur l'état des chaussées.

Résultats

Dans un premier temps, les processus de gestion systématique de la maintenance ont été présentés. Il a été montré que les modèles de détérioration dans la gestion de l'entretien constituent un élément de base essentiel et comment ses résultats sont utilisés dans la prise de décision. En outre, il a été expliqué pourquoi les dommages aux routes apparaissent et comment un concept d'évaluation de l'état des routes est dérivé dans la gestion des chaussées. La valeur informative ou la précision des modèles de prédiction de l'état de détérioration utilisés jusqu'à présent est limitée. D'une part, cela est dû au fait que les données d'entrée présentent une dispersion naturelle. D'autre part, c'est un défi de refléter avec précision les mécanismes complexes de détérioration par la modélisation. La variété des facteurs d'influence et leur interaction complexe compliquent encore la question.

Bases

En outre, les exigences minimales de qualité actuelles pour le revêtement routier ont été présentées. En Suisse, il existe des normes et des directives qui définissent les exigences pour la surface de la route, d'une part, et pour l'enrobé utilisé et les couches installées, d'autre part, dans le cadre du plan d'essai normalisé des enrobés. Pour les exigences relatives à la durée de vie, des valeurs seuils pertinentes sont en outre définies pour les caractéristiques de surface. Ces caractéristiques de surface sont indépendantes de l'évaluation existante dans le cadre de la collecte de données normalisées et de l'évaluation de l'état de la gestion des chaussées. En outre, la gestion actuelle des données en Suisse a été examinée. Alors que pour la plupart des autorités routières, les données sur l'état sont déjà disponibles dans des bases de données routières provenant de plusieurs campagnes d'enquête sur les chaussées, la plupart des données sur la structure sont incomplètes ou n'ont pas encore été collectées. Ce déficit a été reconnu et plusieurs autorités routières s'y attaquent déjà. Une rupture dans la chaîne d'information est évidente pour les données des essais d'acceptation de l'enrobé après le processus de construction. Bien que les laboratoires de chaussée responsables de ces essais de réception enregistrent en grande partie les résultats des essais sous forme numérique et standardisée, il n'y a pas de connexion avec le système de référence suisse standardisé des bases de données routières existantes. En outre, les résultats sont généralement soumis sous forme de papier ou n'existent sous forme numérique que sous forme de scans PDF auprès des autorités routières. Un lien entre les données routières de la gestion des chaussées et les données d'essais d'enrobés n'est possible qu'au prix d'un effort manuel important.

Enfin, un aperçu a été donné des modèles de détérioration possibles qui sont utilisés ou pourraient être envisagés à l'avenir pour estimer la détérioration des routes. Pour ce faire, les phases caractéristiques de la détérioration des chaussées et les principes mathématiques des méthodes de prévision déterministes et probabilistes, ainsi que leurs avantages et inconvénients, ont d'abord été présentés. En outre, une clarification des exigences minimales pour les données d'entrée a suivi. En outre, quelques exemples d'application ont été présentés concernant les possibilités d'intégrer les paramètres d'essai de la chaussée dans les approches du modèle et les procédures pour leur calibration.

Collecte et analyse des données de deux sections d'essai

Sur cette base, deux sections d'essai ont été présentées, leurs données ont été préparées et évaluées dans le cadre de ce projet. En plus des données existantes sur l'état de la chaussée provenant des campagnes d'enquête précédentes, ces sections comprenaient également des données sur la structure, les essais de matériaux et le trafic. Les données disponibles de ces sections d'essai ont permis d'intégrer les résultats des essais de matériaux dans le pronostic de l'état. Il s'est avéré que les données historiques sur l'état des chaussées sont généralement disponibles dans les bases de données routières existantes. Cela signifie que ces données sont disponibles sous une forme lisible par machine pour les analyses de réseaux routiers. Certains problèmes de qualité des données ont pu être identifiés pour les données sur l'état des chaussées. D'autres déficits

ont été constatés pour les données sur la structure et les couches. Ces données, qui sont nécessaires pour le développement du modèle, sont actuellement non disponibles ou incomplètes pour la plupart des autorités routières. De plus, les mesures d'entretien appliquées ne sont souvent pas suffisamment documentées dans les bases de données routières existantes. Les données de projet existantes provenant des examens des carottes de forage pour les essais de réception et leurs résultats pour le matériau utilisé et l'application de la couche ne sont pas référencées dans le système de référencement des bases de données routières et ne sont généralement pas non plus stockées numériquement. Une analyse des corrélations par le biais d'évaluations statistiques à l'échelle du réseau n'a donc été possible que dans une mesure limitée.

Analyse des données des essais accélérés sur les chaussées

Sur la base de la description de différents essais de matériaux classiques et nouveaux, les données de divers projets antérieurs de l'EMPA avec des essais de chaussée accélérés en combinaison avec le MLS10 ont finalement été évaluées, et le potentiel des méthodes d'essai innovantes pour une utilisation dans la modélisation de la détérioration des chaussées a été évalué. Dans ce contexte, on a pu constater que l'approche conventionnelle des essais de bitume atteint ses limites. En revanche, les essais de performance ouvrent de nouvelles perspectives. Cependant, les données des essais de bitume n'ont pas été combinées avec les données sur les chaussées dans les bases de données routières. De plus, une historisation des données d'essais des projets de construction par rapport aux données d'état fait défaut jusqu'à présent. Ainsi, une analyse statistique au niveau du réseau routier est actuellement impossible. En particulier, les évaluations des données MLS10 provenant de cinq projets différents ont montré la nécessité de disposer de données supplémentaires qui permettraient d'identifier des corrélations statistiques. Si un modèle a été trouvé pour la détérioration de l'ornièrage, aucun comportement clair n'a pu être observé pour la propagation des fissures.

Développement d'approches méthodologiques

Enfin, des approches méthodologiques ont été conçues pour permettre l'intégration de différents résultats d'essais de matériaux dans la modélisation de la détérioration des chaussées. Différentes étapes de calibration du modèle en fonction des données d'entrée ont été introduites.

Les données d'entrée peuvent être regroupées en fonction de diverses conditions limites. L'objectif du regroupement est de minimiser la quantité de dispersion dans le modèle de détérioration ajusté pour chaque groupe. À cette fin, l'influence potentielle des paramètres individuels des matériaux sur la détérioration des caractéristiques de surface des chaussées a été étudiée dans le cadre d'études préliminaires basées sur des analyses de corrélation. En raison d'une base de données relativement petite et d'une force d'effet présumée faible, seules des dépendances isolées statistiquement significatives ont été trouvées.

Dans un premier temps, une courbe maîtresse spécifique au cluster est déterminée et les coefficients de fonction associés sont calculés. Dans un deuxième temps, les approches possibles pour un calibrage spécifique à une section à l'aide des données existantes sur l'état de la chaussée ont été présentées. Enfin, les approches existantes ont été étendues en intégrant de nouveaux tests de liants bitumineux dans la modélisation de la détérioration des chaussées. Dans un premier temps, la détermination d'une courbe maîtresse affectée aux conditions limites respectives par un regroupement des données d'entrée et la détermination ultérieure des coefficients de fonction en fonction du regroupement. L'objectif du regroupement était de maximiser la proportion de dispersion explicable au sein des données à l'aide de la courbe de comportement ajustée pour chaque groupe. À cette fin, des courbes de vieillissement des liants bitumineux spécifiques aux paramètres ont été dérivées d'essais en laboratoire pour déterminer la fatigue, la déformation et la propagation des fissures, et il a été montré comment celles-ci pouvaient être intégrées dans les approches existantes, tant déterministes que probabilistes, pour la modélisation de la détérioration.

Preuve de concept

Les approches développées ont été mises en œuvre dans une application prototype. Le prototype permet une prédiction probabiliste de l'état de tronçons routiers individuels ainsi qu'une analyse de l'évolution de l'état au niveau du réseau. Dans le prototype, les possibilités d'analyse des données existantes sur l'infrastructure routière ont été testées de manière exemplaire, et les visualisations correspondantes ont été créées. Le pronostic de l'état est basé sur des fonctions de processus a priori prédéfinies, les caractéristiques de la surface de la chaussée et les résultats des essais de matériaux en laboratoire, dans ce cas, les résultats des essais de liants. À l'aide du prototype développé, les fonctions de processus déterminées a priori ont pu être affinées par regroupement et intégrées dans le calibrage du modèle de détérioration lié à la section de route. Ceci fournit une méthodologie qui permet d'affiner la prédiction de l'état de la chaussée en prenant en compte les propriétés des matériaux et des couches d'asphalte.

Conclusions

Dans l'ensemble, sur la base de la recherche et des résultats obtenus, il a été possible de faire différents constats et de tirer les conclusions correspondantes. Il s'agit, d'une part, de la disponibilité des données routières et de la qualité des données sur l'état des caractéristiques de surface des chaussées, d'autre part, des données sur la structure des couches et des résultats des essais de matériaux associés.

Les données disponibles sont en partie hétérogènes et ne sont pas intégrées dans les bases de données routières ou les systèmes d'information existants. Par conséquent, ces données ne peuvent pas être analysées à l'échelle du réseau. Il apparaît également que, d'une part, les données sont incomplètes et insuffisamment validées et que leur plausibilité n'a pas été vérifiée avant leur intégration dans la base de données routière. Cela indique un manque d'évaluation de la qualité dans la gestion des données.

Il est bien connu que chaque type de système de collecte de données à grande vitesse à l'échelle du réseau contient des incertitudes de mesure pour les différentes caractéristiques de la chaussée. Ces incertitudes de mesure peuvent être limitées par une gestion normalisée de la qualité de la collecte des données. Actuellement, il n'y a pas de normalisation en Suisse pour la gestion de la qualité de la collecte des données sur les caractéristiques de surface des chaussées et l'évaluation de leur état.

Pourtant, les données existantes sur l'état des routes constituent la base de la gestion des chaussées (par exemple, pour la modélisation de la détérioration des chaussées). Leur utilisation efficace dans la gestion des chaussées ne peut être obtenue que par des données de haute qualité et la combinaison de différentes sources de données routières.

D'autre part, les corrélations des différentes causes de détérioration au sein du système de couches d'asphalte s'avèrent très complexes. Les analyses statistiques ne sont actuellement pas applicables en raison du manque de données pour une enquête à l'échelle du réseau, l'échantillon étant trop petit pour une analyse significative. Cependant, les résultats des essais sur les liants bitumineux dans le cadre de la recherche peuvent être interprétés assez bien, même si une corrélation directe avec les caractéristiques de surface de la chaussée n'a pas encore pu être établie.

Summary

The increasing need for mobility of people and goods is leading to a continuing growth in traffic volume and heavy goods traffic not only on the Swiss road network. As with all engineering tasks involving complex construction materials, the design, construction and management of asphalt pavements is an optimization process that ultimately can only satisfy all stakeholders through careful consideration of all short- and long-term objectives. A balance must be found between the demands of road authorities, users and public on road infrastructure. In addition to the expected effects on the pavement surface, the constructive solution of the engineer, including concept and application, as well as the behavior and condition of the construction materials and layers, must also be considered. The objective of pavement management is to achieve or maintain a required level of service of the existing road infrastructure by systematically determining necessary and optimal maintenance measures. Models for pavement deterioration are an important component for the estimation of long-term maintenance costs. Currently, deterministic models for short-, medium- and long-term maintenance planning are used sporadically in Switzerland, which in part only allow a very generalized forecast due to the necessary input parameters.

Objectives

The aim of the mapFALKE research project was to improve the estimation of long-term costs in maintenance planning. This is achieved by the further development of methods for modeling pavement surface deterioration using extended calibration procedures for the determination of performance-oriented material properties. The previous approaches, which take into account e.g. condition data, climate data on temperature and precipitation, construction methods and types of surface course, as well as their age structure, represent the starting point. At the same time, possibilities should be shown on how to proceed in the case of limited data quality or quantity. In this context, additional available or easily determined information from material testing from the construction process should increase the accuracy of the deterioration models or if necessary, represent a supplement to improve poor data quality or missing data.

Methodology

The methodology for the development of deterministic or probabilistic models was identical to the procedure for empirical investigations using observations and their influencing factors. The new approach in pavement deterioration models is the use of road data available throughout the network on the one hand, which usually includes only pavement condition data, and on the other hand data from existing or additionally easily collected laboratory results from local material testing for the calibration of the models of individual road sections. Within the model generation and calibration, data from material testing were required. For the research project ISBS from TU-Braunschweig and EMPA could provide two test sections with existing testing results from the past and the possibility of further material testing within the project. Additionally, existing data from accelerating pavement testing projects from EMPA could be again analyzed for the modelling. Correlations were also proofed on available pavement condition data.

Results

In the beginning, the processes of systematic maintenance management were presented. It was shown that deterioration models within maintenance management is an essential core element and how its results are used in decision-making. In addition, it was explained why road damages appear and how a concept of road condition assessment is derived in pavement management. The informative value or accuracy of the condition prediction of deterioration models used so far is limited. On the one hand, this is because the input data show natural scattering. On the other hand, it is a challenge to accurately reflect the complex damage mechanisms by modelling. The variety of influencing factors and their complex interaction further complicate the issue.

Fundamentals

Furthermore, the current minimal quality requirements for the road surface were presented. In Switzerland, there are standards and guidelines that define requirements for the road surface on the one hand and for the mix used and the layers installed on the other hand within the standardized asphalt testing plan. For the requirements over the service life, relevant threshold values are additionally defined for the surface characteristics. These surface characteristics are independent from existing assessment within standardized data collection and condition assessment of pavement management. Furthermore, the current data management in Switzerland was considered. While for most of the road authorities condition data is already available in road data bases from several pavement survey campaigns, most structure data is incomplete or not collected yet. This deficit has been recognized and is already being addressed by several road authorities. An existing break in the information chain is evident for data of acceptance asphalt testing after construction process. Although the pavement laboratories responsible for this acceptance testing largely file testing result data digitally in a standardized form, there is no connection to the standardized Swiss reference system of the existing road data bases. In addition, the results are usually submitted in paper form or exist in digital form only as PDF scans at road authorities. A database link between the network-wide road data of pavement management and asphalt testing data is only possible with high manual effort.

Finally, an overview was given of possible deterioration models that are in use or could be considered in the future for estimating the deterioration of roadways. To address this, the characteristic phases of pavement deterioration and the mathematical principles of deterministic and probabilistic forecasting methods, as well as their advantages and disadvantages, were first presented. Additionally, a clarification of minimal requirements for the input data followed. Furthermore, some application examples were presented regarding the possibilities of integrating pavement testing parameters into the model approaches and procedures for their calibration.

Data Collection and Analysis from two Test Sections

Based on this, two test sections were presented, their data prepared and evaluated within this project. In addition to the existing pavement condition data of previous survey campaigns this also included structure, material testing and traffic data. The available data from these test sections allowed the integration of testing results from material investigations into the condition prognosis. It turned out that historicized pavement condition data is usually available from existing road databases. This means that this data is available in a machine-readable form for road network analyses. Some data quality issues could be identified for pavement condition data. Further deficits were found for structure and layer data. This data, which are necessary for the model development, is currently not available or incomplete for most road authorities. Additionally, applied maintenance measures are often not sufficiently documented in existing road data bases. The existing project data from drill core examinations for acceptance testing and their results for the used material and layer application are not referenced to the road database referencing system and are usually not stored digitally either. An analysis of correlations through network-wide statistical evaluations was therefore only possible to a limited extent.

Data Analysis from Accelerated Pavement Testing

Based on the description of different classical and novel material tests, the data from various previous EMPA projects with accelerated pavement testing in combination with the MLS10 were finally evaluated, and the potential of innovative testing methods for use in modeling pavement deterioration was assessed. Within this context, it could be found that a conventional approach to bitumen testing is reaching its limits. Performance testing, however, shows new perspectives. However, the asphalt testing data has not combined with pavement data in the road data bases. In addition, a historization of construction project testing data compared to condition data is missing so far. Thus, a statistical analysis on road network level is currently impossible. In particular, the evaluations of the MLS10 data from five different projects showed the need for additional data that would allow an

evaluation to identify statistical correlations. While a pattern was found for the deterioration on rutting, no clear behavior could be seen for crack propagation.

Approach design

Finally, methodological approaches were designed to enable the integration of different material testing results into the modelling of pavement deterioration. Different model calibration steps depending on input data were introduced.

The input data can be clustered according to various boundary conditions. The aim of clustering is to minimize the amount of scatter within the fitted deterioration model for each cluster. For this purpose, the potential influence of individual material parameters on deterioration of pavement surface characteristics was investigated within preliminary studies based on correlation analyses. Due to a relatively small data basis and presumed low effect strength, only isolated statistically significant dependencies were found.

First, a cluster-specific master curve is determined and associated function coefficients are calculated. In a further step, the possible approaches for a section-specific calibration with the help of existing pavement condition data were presented. Finally, the existing approaches were extended by integrating new asphalt binder testing into the modeling of pavement deterioration. Initially the determination of a master curve assigned to the respective boundary conditions through a clustering of the input data and the subsequent cluster-specific determination of the function coefficients. The aim of the clustering was to maximize the proportion of explainable scattering within the data with the help of the fitted behavior curve for each cluster. For this purpose, parameter-specific asphalt binder ageing curves were derived from laboratory tests to determine the fatigue, deformation and crack propagation, and it was shown how these could be integrated into the existing approaches, both deterministic and probabilistic, for deterioration modelling.

Proof-of-Concept

The developed approaches were implemented in a prototype application. The prototype enables a probabilistic condition prediction of individual road sections as well as an analysis of the condition development on the network level. In the prototype, the analysis possibilities of the existing road infrastructure data were tested exemplarily, and corresponding visualizations were created. The condition prognosis is based on predefined a priori process functions, pavement surface characteristics and results from laboratory material testing, in this case, from binder testing results. With the help of the developed prototype, the a priori determined process functions could be refined by clustering and integrated into road section-related calibration of deterioration model. This provides a methodology that enables refinement of the pavement condition prediction by taking asphalt material and layer properties into account.

Conclusion

Overall, based on the research and its achieved results it was possible to gain various findings and to draw corresponding conclusions. These include, on the one hand, the availability of road data and condition data quality of pavement surface characteristics, on the other hand, the data on the layer structure and the associated material testing results.

The available data is partly heterogeneous and not integrated into existing road databases or information systems. Hence, this data cannot be analyzed network-wide. It is also apparent that on the one hand data was incomplete and insufficiently validated and not checked for plausibility before their integration into the road database. This indicates a lack of quality assessment in data management.

It is well known that every type of network-wide high-speed data collection systems contains measurement uncertainties for the different pavement characteristics. These measurement uncertainties can be limited by standardized data collection quality

management. Currently, there is no standardization in Switzerland for quality management of pavement surface characteristics data survey and condition assessment.

However, the existing road condition data is the basis for pavement management (e.g. for modelling pavement deterioration). Their effective use in pavement management can only be achieved by high quality data and the combination of different road data sources.

On the other hand, the correlations of different reasons for deterioration within the asphalt layer system prove to be very complex. Statistical analyses are currently not applicable due to the lack of data for network-wide investigation, as the sample is too small for a meaningful analysis. However, the asphalt binder testing results within the research can be interpreted quite well, even if a direct correlation to pavement surface characteristics could not yet be established.

1 Einleitung

Um eine klare Vorstellung der Problemstellung und der Zielsetzung dieses Projekts zu schaffen, werden in diesem Kapitel nach Beschreibung der Ausgangslage und der Problemstellung die verfolgten Ziele erläutert. Anschliessend wird die zur Zielerreichung verfolgte methodische Vorgehensweise beschrieben und die Gliederung des Berichtes vorgestellt.

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Das schweizerische Strassennetz trägt, wie auch das Schienennetz, zur wirtschaftlichen Wertschöpfung und zum gesellschaftlichen Wohlstand bei. Mit der Erhaltung ihrer bestehenden Strasseninfrastruktur gewährleisten die Strassenbetreiber das geforderte Dienstleistungsniveau hinsichtlich der Verkehrssicherheit, der Zuverlässigkeit, der Verfügbarkeit und einen entsprechenden Fahrkomfort auf den Strassen. Die Entscheidungen der Kompetenzträger im Bereich der Erhaltung haben langfristige Konsequenzen nicht nur auf die Entwicklung des Strassenzustandes, sondern damit verbunden auch auf das resultierende Dienstleistungsniveau. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die Entscheidungsfindung auf der Basis einer Abschätzung der langfristigen Konsequenzen im Rahmen eines strategischen Ansatzes zu stellen.

Derzeit sind die Methoden der netzweiten Zustandserfassung und der auf den erhobenen Zustandsdaten basierenden kurz- bis mittelfristigen operativen Erhaltungsplanung weitgehend akzeptiert und werden erfolgreich angewendet (vgl. auch [1, 2]). Diese Praxis sollte durch eine langfristige strategische Erhaltungsplanung geschärft werden, da die Entscheidungen einen grossen Einfluss auf die volkswirtschaftlich bedeutende Strasseninfrastruktur haben, ein erhebliches Investitionsvolumen aufweisen und langfristige Konsequenzen, z. B. zu erwartende langfristige Kosten, verursachen. Zur Unterstützung dieser langfristigen strategischen Erhaltungsplanung bei Fahrbahnen werden meist Pavement-Management-Systeme (PMS) eingesetzt.

Gerade bei der Entscheidungsfindung im Rahmen der Erhaltungsplanung sehen sich die Strassenbetreiber, sei es der Bund, die Kantone oder Städte und Gemeinden, mit folgender Fragestellung in Bezug auf das gesamte Strassennetz konfrontiert:

«Wann sollte wo mit welchen Erhaltungsmassnahmen eingegriffen werden?»

Implizit kann dies auch heissen:

«Kann eine Erhaltungsmassnahme auch aufgeschoben werden? Wenn ja, wie lange?»

Ziel bei der Beantwortung dieser Fragen und damit letztlich bei der Entscheidungsfindung ist die Gewährleistung von Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit für alle Stakeholder (Betreiber, Nutzer, Dritte). Damit dürfen langfristige Konsequenzen – d. h. Ereignisse und Entwicklungen in der Zukunft – nicht ausgeschlossen werden. Da sich diese jedoch nicht exakt bestimmen lassen, müssen sie abgeschätzt werden. Bei dieser Abschätzung kommen Modelle zum Einsatz, welche empirisch abgeleitet oder analytisch hergeleitet werden.

Der Zustand bei Fahrbahnen wird im Rahmen der Überwachung bzw. der Zustandserfassung regelmässig gemäss [3] durch dynamische Messsysteme oder visuelle Begutachtung erhoben (vgl. [4]). Damit stehen den Strassenbetreibern in Bund, Kanton oder Städten/Gemeinden mittlerweile zum Teil mehrere Erfassungskampagnen zur Verfügung. Bei den Daten des Fahrbahnaufbaus bzw. der Schichten des Oberbaus, wenn diese überhaupt vorhanden sind, existieren aktuell noch grosse Lücken. Aus diesem Grund scheidet derzeit analytische Modelle weitgehend aus und es wird auf empirische Modelle der Zustandsentwicklung der Fahrbahnoberfläche zurückgegriffen, welche sich auf die standardisierten Zustandsmerkmale nach [3] begrenzen. Gleichwohl stehen bei den

Strassenbetreibern zum Teil Daten zur Verfügung, welche für einen strategisch netzweiten Einsatz noch nicht aufgearbeitet sind. Dabei handelt es sich um Daten, z. B. aus der operativen Erhaltungsplanung oder direkt aus dem Projektmanagement bzw. der Qualitätssicherung bei der Ausführung (vgl. [5]), von bereits durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen.

In der Schweiz erfolgte im Rahmen von [6] eine erste umfassende Analyse von Zustandsdaten der Fahrbahnoberfläche zur Entwicklung von deterministischen Modellen der Zustandsentwicklung für mehrere Zustandsmerkmale und unterschiedliche Strassenkategorien (vgl. [7]). Die aufgezeigte Methode zur Ableitung der Modelle zeigte jedoch zum Teil Schwächen. Darauf verweist der Autor bereits in einer vorherigen Forschung zur Evaluation des Strassenzustandes (vgl. [8]). Einerseits entspricht die Qualität der verwendeten Zustandsdaten und/oder die Anzahl der vorhandenen Messkampagnen nicht den Anforderungen für Zeitreihenanalysen. Andererseits ist unklar, ob die bisher gewählten Modellformen für eine präzise Zustandsprognose geeignet sind. Zudem sind nicht alle standardisierten Zustandswerte gemäss [3] geeignet, um prognostiziert zu werden.

Gemäss der Ausschreibung stellen sich damit für die Praxis mehrere Fragen:

- Sind die bisherig vorhandenen Modelle der Zustandsentwicklung brauchbar?
- Werden die jeweils relevanten Einflussfaktoren auf die Zustandsentwicklung berücksichtigt?
- Welche Modelle der Zustandsentwicklung sind je nach Strassentyp geeignet?
- Welche Anforderungen müssen an die Qualität der Eingangsdaten gestellt werden?
- Wie erfolgt der Umgang bei fehlenden bzw. ungenügenden Eingangsdaten?

Während in der Praxis der Erhaltungsplanung zum Teil ungenügende Informationen in Bezug auf die Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche vorhanden sind bzw. deren Qualität nicht ausreicht, finden oft vorhandene Informationen vom Strassenoberbau, z. B. aus den Abnahmeprüfungen der Realisierung von Erhaltungsmaßnahmen, für die Bildung von Modellen der Zustandsentwicklung keine Anwendung. Es stellt sich die Frage, inwieweit die vorhandenen Informationen dafür genutzt werden können. Einerseits betrifft dies bestehende Strassenoberbauten und deren weitere Zustandsentwicklung. Andererseits stellt sich die Frage auch bei neu eingebauten Schichten des Strassenoberbaus, für welche Abnahmeprüfungen durchgeführt und somit neue Informationen ermittelt werden. Bisher wird in der Praxis nur der Schichtenverbund für die Abschätzung der zukünftigen Lebensdauer bei der Abnahme im Rahmen eines Gewährleistungsansatzes genutzt. Bei der Erhaltungsplanung im Rahmen von Modellen der Zustandsentwicklung findet auch dies bis jetzt noch keine Berücksichtigung.

1.2 Ziele

Das Ziel des Forschungsprojekts **mapFALKE** ist die Verbesserung der Abschätzung der langfristigen Kosten in der Erhaltungsplanung. Dies wird durch die Erarbeitung von Methoden zur Bildung von Modellen der Zustandsprognose unter Heranziehung erweiterter Kalibrierverfahren zur Bestimmung verhaltensorientierter Materialeigenschaften erreicht. Die bisherigen Ansätze, welche u. a. Zustandsdaten, Klimadaten über Temperatur und Niederschlag, Bauweisen und Deckschichtarten sowie die Altersstruktur berücksichtigen, stellen dabei die Ausgangsbasis dar. Gleichfalls werden Wege aufgezeigt, wie man bei beschränkter Datenqualität bzw. -quantität vorgehen kann. Dabei sollen zusätzlich vorhandene bzw. leicht zu ermittelnde Informationen aus Materialuntersuchungen aus der Realisierung von Baumassnahmen die Genauigkeit der Modelle der Zustandsentwicklung erhöhen oder bei Bedarf eine Ergänzung zur Verbesserung der eventuell schlechten Qualität bzw. bei fehlenden Daten darstellen.

Das heisst, neben den in der Ausschreibung genannten Zielen:

- Aufzeigen von Methoden zur Bildung von geeigneten Modellen der Zustandsentwicklung für die Fahrbahn unter Berücksichtigung unterschiedlicher Qualität der Eingangsdaten
- Konkretisierung der Anforderungen an die Eingangsdaten
- Anwendung der Methoden durch Beispiele

sollen zusätzlich notwendige Aussagen getroffen werden in Bezug auf:

- Kalibrieren von vorhandenen Modellen der Zustandsentwicklung durch neue Informationen aus aktuellen Erhebungskampagnen
- Erhöhen der Genauigkeit der Zustandsprognose unter der Nutzung von zusätzlichen Informationen aus standardisierten Materialuntersuchungen bei der Konzeption des Mischguts (Eignungsprüfung) beim Einbau, der Abnahme sowie von leicht zu ermittelnden Informationen aus zusätzlichen Materialuntersuchungen für die Kalibrierung

Der Fokus dieser Arbeit wird durch die derzeitige Strassenbaupraxis in der Schweiz hauptsächlich auf die Asphaltbauweise gelegt. Eine Übertragbarkeit der Vorgehensweise ist jedoch auch für Betonbauweise ohne weiteres möglich.

1.3 Methodik und Lösungsansatz

Die Methodik beim Vorgehen der Entwicklung von deterministischen bzw. probabilistischen Modellen ist identisch zu dem Vorgehen bei empirischen Untersuchungen unter Heranziehung von Beobachtungen und deren Einflussfaktoren. Die Neuheit im Bereich der Modelle der Zustandsentwicklung sind die Verwendung von einerseits netzweit vorhandenen Strassendaten, hierzu gehören meist ausschliesslich die Zustandsdaten, und andererseits Daten von vorhandenen bzw. zusätzlich leicht zu erhebenden Laborergebnissen aus örtlichen Materialuntersuchungen für die Kalibrierung der Modelle einzelner Strassenabschnitte.

Im Rahmen der Modellentwicklung und -kalibrierung werden Daten aus Materialuntersuchungen benötigt. Im Rahmen der Forschungsarbeit standen durch die TU-Braunschweig (Deutschland) und die EMPA 2 Teststrecken (vgl. Kap. 5) mit bereits vorhandenen Laborergebnissen aus der Vergangenheit zur Verfügung, an welchen weitere Materialuntersuchungen durchgeführt werden konnten. Im Rahmen des Projekts konnten zudem Daten aus unterschiedlichen Belastungsversuchen der EMPA nochmals für die Modellbildung ausgewertet werden. Aufschluss über die aktuelle Datenlage in Bezug auf Prüfdaten von Materialuntersuchungen gaben auch verschiedene Strassendaten von verschiedenen Strassenbetreibern. Es wurden zudem statistische Analysen mit der vorhandenen Datengrundlage durchgeführt.

1.4 Aufbau des Berichts

Im Folgenden ist eine Übersicht zum Aufbau des Berichtes und der damit in Bezug stehenden methodischen Vorgehensweise zum Erreichen der genannten Zielsetzung dargestellt. Der Bericht gliedert sich in insgesamt neun Kapitel, deren Inhalt im Folgenden kurz zusammenfassend erläutert wird.

Um die in diesem Projekt entwickelten Fragestellungen beantworten zu können, bedarf es zunächst einer Darstellung der theoretischen und empirischen Erkenntnisse im Hinblick auf die Analyse und Prognose von Strassenzustandsdaten sowie deren Einordnung in den Gesamtkontext der Strassenerhaltung. Dazu werden in Kapitel 2 die Grundlagen des Erhaltungsmanagements von Strassen in der Schweiz erläutert und die bestehenden Schadensmechanismen an Fahrbahnkonstruktionen beschrieben. In Kapitel 3 werden dann die allgemeinen Qualitätsanforderungen an den Strassenoberbau vorgestellt.

Kapitel 4 beinhaltet eine Übersicht zu deterministischen und probabilistischen Methoden zur Prognose der Zustandsentwicklung von Fahrbahnen. Das Kapitel 5 beinhaltet die Beschreibung der Datengrundlage, die für die vorliegenden Untersuchungen verwendet wurde.

Kapitel 6 gibt einen Überblick über die konventionellen Materialuntersuchungen und die innovativen Performance-Prüfverfahren, die eine verbesserte Abschätzung des Materialverhaltens ermöglichen sollen. In Kapitel 7 wird schliesslich der Zusammenhang zwischen der Zustandsentwicklung und der Materialtechnologie beschrieben und Möglichkeiten zur Nutzung von Materialuntersuchungen bei der Zustandsprognose aufgezeigt.

Die damit verbundene Methodik wird im Anschluss exemplarisch in Kapitel 8 angewendet. Der Bericht schliesst mit einer Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse, einer Zusammenstellung von Empfehlungen für die Anwendbarkeit in der Praxis sowie einem Ausblick auf zukünftige Untersuchungsmöglichkeiten.

Die Struktur des Berichtes ist in Abbildung 1 zusammenfassend skizziert.

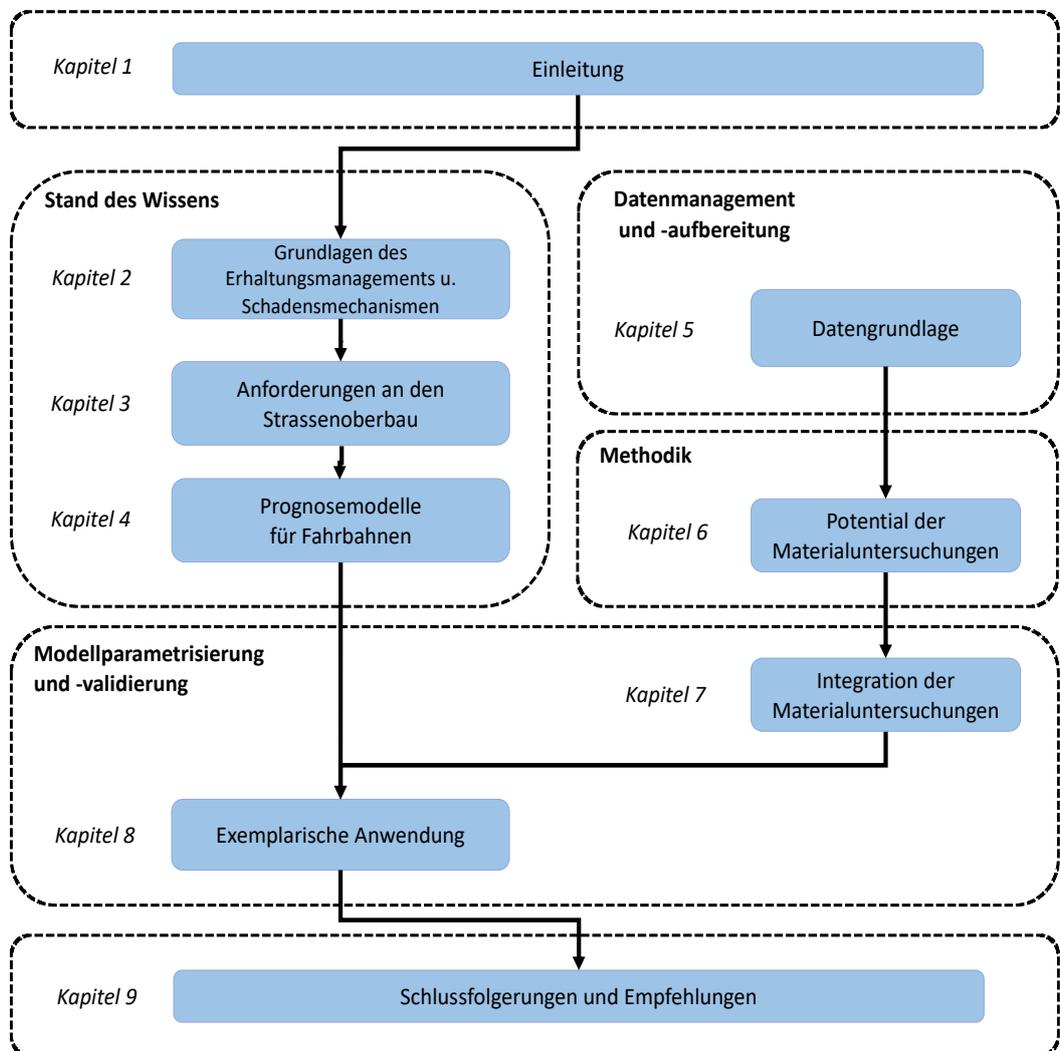


Abbildung 1: Aufbau des Berichtes

2 Grundlagen der Entscheidungsfindung im Erhaltungsmanagement

2.1 Allgemeines

Das steigende Bedürfnis nach Mobilität von Personen und Gütern führt nicht nur im schweizerischen Strassennetz zu einem stetigen Anstieg der Verkehrsbelastung und des Schwerverkehrs. Wie bei allen Ingenieuraufgaben, die mit komplexen Baustoffen zusammenhängen, ist auch die Konzeption, die Erstellung und das Management von Asphaltbelägen ein Optimierungsprozess, der letztlich nur durch sorgfältiges Abwägen sämtlicher kurz- und langfristiger Zielvorgaben alle Anspruchsgruppen zufriedenstellen vermag. Es ist ein Gleichgewicht zu finden zwischen den Anforderungen des Betreibers, der Nutzenden und der Öffentlichkeit an die Strasseninfrastruktur. Dabei sind neben den zu erwartenden Einwirkungen auf den Strassenoberbau auch die konstruktive Lösung des Ingenieurs einschliesslich Konzept und Ausführung sowie das Verhalten und die Beschaffenheit der Baustoffe bzw. der Schichten zu berücksichtigen.

Gemäss [9] ist das Ziel des Erhaltungsmanagements das Erreichen bzw. Aufrechterhalten eines erforderlichen Leistungsniveaus der bestehenden Strasseninfrastruktur durch eine systematische Bestimmung von notwendigen und optimalen Erhaltungsmassnahmen. Modelle zur Zustandsentwicklung von Fahrbahnen sind dabei ein wichtiger Baustein zur Abschätzung langfristiger Erhaltungskosten.

Um die Relevanz der Zustandsprognose innerhalb des Gesamtkontextes aufzuzeigen, erfolgt in Kapitel 2 zunächst eine Darstellung der Grundlagen des Erhaltungsmanagements von Strassen. Der Auslöser zur Durchführung von Erhaltungsmassnahmen ist in der Regel die Feststellung eines Schadensbildes, welches sich anhand von Ausmass und Schadenshöhe beschreiben lässt. Schäden können zu jedem Zeitpunkt während der Lebensdauer eines Belags auftreten oder erkannt werden. Die Art des Schadensbildes wird dabei wesentlich auch durch den verwendeten Baustoff bestimmt, d. h. Strassenbeläge aus Asphalt oder Beton haben verschiedene Schadenmechanismen. Daher erfolgt in Kapitel 2.3 eine Darstellung der Schadensentstehung und die Ableitung des Zustands von Strassen.

2.2 Prozesse des Erhaltungsmanagements

Ein systematisches Erhaltungsmanagement ist Teil des Infrastrukturmanagements und umfasst gemäss [9] strategische und operative Prozesse. Es beinhaltet die Vorbereitung der Entscheidungsfindung zur Projektgenerierung und deren Ausführung. Damit grenzt sich das Erhaltungsmanagement vom Projektmanagement mit Projektierung und Ausführung der Erhaltungsmassnahmen ab. Grundsätzlich existiert damit bereits eine notwendige Schnittstelle, welche die Übergabe des gebauten Werkes nach einer Erhaltungsmassnahme mit allen relevanten Informationen vom Projektmanagement zum Erhaltungsmanagement sicherstellen muss.

Das strategische Erhaltungsmanagement umfasst einerseits die Festlegung der Leistungsziele und Randbedingungen sowie andererseits die Festlegung der Prozesse, Vorgaben und Strategien. Die Leistungsziele werden festgelegt unter Berücksichtigung von Randbedingungen, welche sich aus normativen Quellen und politischen Vorgaben sowie aus dem Betrieb der Infrastruktur ergeben. Zusätzlich müssen für die Organisation die Prozesse, Vorgaben und Strategien definiert, etabliert und in regelmässigen Abständen überprüft und angepasst werden (vgl. [9]).

Das operative Erhaltungsmanagement gliedert sich in die Planungsprozesse für Überwachung, kleinen baulichen Unterhalt, Erhaltungsplanung und Begleitung der Erhaltungsprojekte. Die Planung der Überwachung, des kleinen baulichen Unterhalts und die Erhaltungsplanung erfolgt unter der Berücksichtigung der gegebenen Leistungsziele

und Rahmenbedingungen sowie u. a. der erwarteten Zustandsentwicklung. Modelle der Zustandsentwicklung sind somit eine wesentliche Grundlage für das operative Erhaltungsmanagement (vgl. [9]).

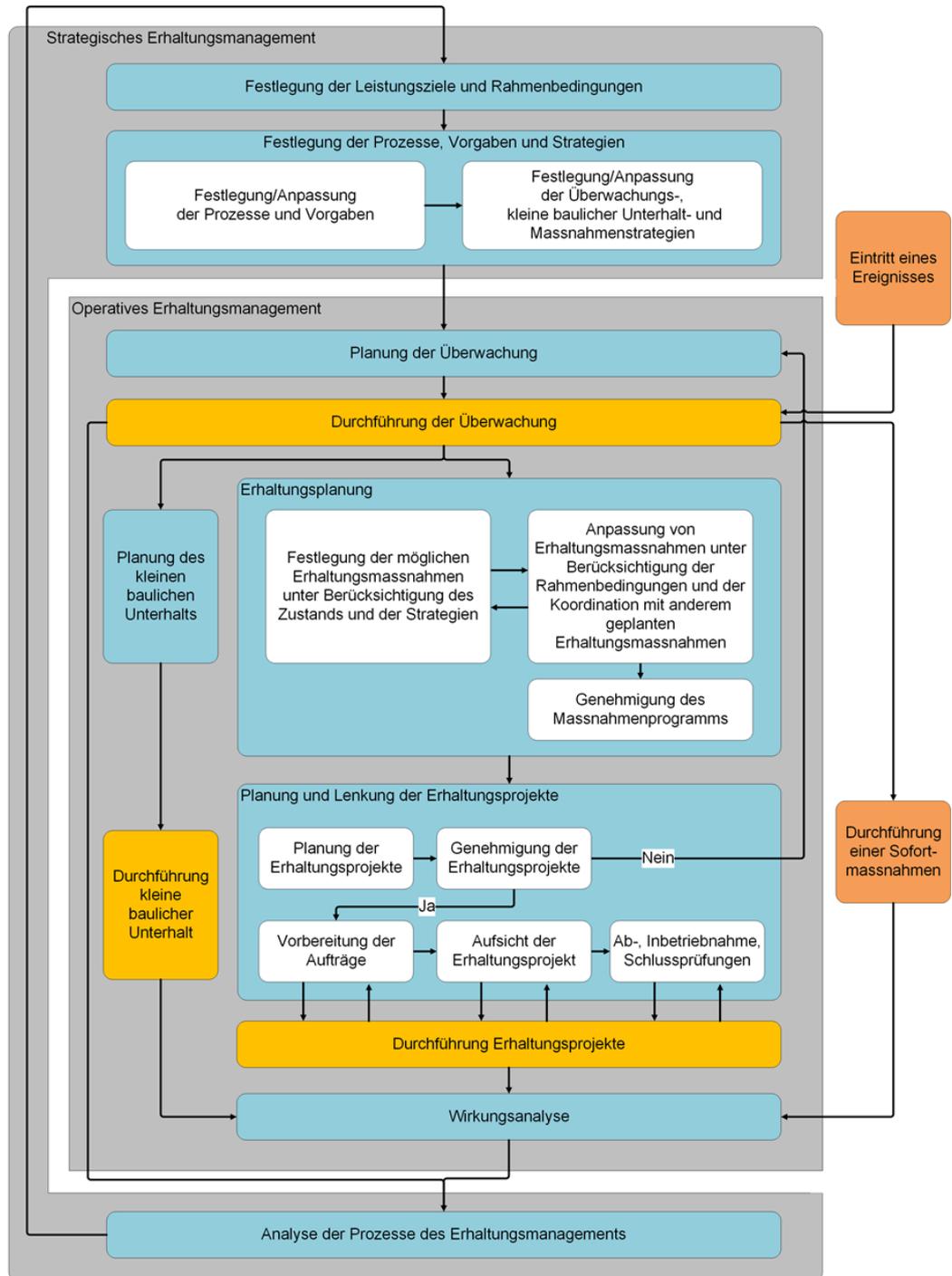


Abbildung 2: Prozesse des Erhaltungsmanagements [9]

Eine wesentliche Grundlage für die Entwicklung von Modellen der Zustandsentwicklung sind die Daten, welche im Rahmen der Überwachungstätigkeiten erfasst, aufbereitet und analysiert werden. Dafür muss das vorhandene Strassennetz gegliedert und unter anderem ein Inventar für die Fahrbahnen erstellt werden. Dieses ist in der Praxis in den jeweilig vorhandenen Strasseninformationssystemen definiert und hinterlegt. Für die Fahrbahnbefestigungen wird hierfür die Lage im Netz (Referenzierung) definiert. Aufgrund der eindeutigen Referenz im Strassennetz durch das definierte Bezugssystem können

dann alle relevante Strassendaten zugeordnet werden. Hierzu zählen neben den Aufbaudaten auch die Zustandsdaten, welche netzweit erhoben und historisiert in den Datenbanken abgespeichert werden. Dem Bezugssystem und der Historisierung kommen somit aufgrund der Notwendigkeit der eindeutigen Zuordenbarkeit und der Verfolgbarkeit der zeitlichen Änderungen eine besondere Bedeutung zu.

Die Strasseninformationssysteme liefern somit wesentliche Eingabedaten für die Analyse und Entwicklung von Modellen der Zustandsentwicklung. Sie sind Teil von Managementsystemen, welche zusätzliche Module zur Analyse, Berechnung und Ausgabe beinhalten. Diese ermöglichen eine Ausgabe von Berechnungsergebnissen und notwendigen Analysevariablen sowie Inputdaten für die Entscheidungsträger in geeigneter Form. Dabei sind für die Entscheidungsfindung folgende Aspekte gemäss [10] von Bedeutung:

- Beurteilung des aktuellen und zukünftigen Fahrbahnzustands
- Abschätzung des langfristigen Finanzbedarfs für unterschiedliche Zielzustände des Strassenoberbaus
- Identifikation der Erhaltungsmassnahmen, die das zur Verfügung stehende Budget möglichst optimal verbrauchen
- Aufzeigen von kurz- und langfristigen Konsequenzen von unterschiedlichen Budgetvorgaben und Erhaltungsstrategien
- Begründung von Budgetanträge für die Strassenerhaltung
- Abschätzung des langfristigen Einflusses auf das Substanzverhalten durch Änderungen der Oberbaukonstruktion
- Transparente und auch für fachfremde Personen verständliche Kommunikation der Gründe für die geplanten Entscheidungen

In Bezug auf die Modelle der Zustandsentwicklung stellt sich dabei die Frage nach den relevanten Parametern, welche im Rahmen der Analyse als Variablen Verwendung finden sollten. Für das Erhaltungsmanagement sind dabei die zu erhebenden Zustandsinformationen im Rahmen der Überwachungstätigkeiten relevant.

2.3 Schadenentstehung und Ableitung des Zustands

Im Folgenden wird ein Überblick zu den Schadensmechanismen im Strassenoberbau gegeben. Da, wie bereits erwähnt in der Schweiz die Betonbauweise eine untergeordnete Rolle spielt, beschränken sich die Ausführungen auf die Asphaltbauweise. Es werden zunächst die an der Fahrbahnoberfläche sichtbaren Schadensbilder eines Asphaltbelags erörtert. Daraufhin erfolgt eine zusammenfassende Darstellung von Einflussgrössen auf die Schadensentwicklung. Um diese sehr komplexen Zusammenhänge untersuchen zu können, werden schliesslich geeignete Untersuchungsmethoden vorgestellt.

2.3.1 Schadensbilder

Strassenbeläge aus Asphalt (sogenannte flexible Oberbauten) haben sich weltweit seit vielen Jahren bewährt und bilden in der Schweiz heute den Regelfall. Sie sind aus Schichten aus Asphaltmischgut aufgebaut, welches aus mineralischen Zuschlagstoffen, Bitumen oder bitumenhaltigen Bindemitteln, allfälligen Zusätzen und Luft zusammengesetzt ist. Die komplexen Verbundwerkstoffe aus Mineralstoffen (Gesteinskörnungen) und Bindemittel weisen zeit- und temperaturabhängige viskoelastische bzw. visko-plastische Eigenschaften auf. Die unterschiedlichen Schichten des Belagsaufbaus üben dabei unterschiedliche Funktionen aus. Beispielsweise hat die oberste Schicht, die sog. Deckschicht, neben der Standfestigkeit als direkt dem Verkehr und dem Klima ausgesetzte Schicht eine wichtige Rolle bezüglich Verschleissfestigkeit, Griffigkeit, aber auch Lärmeigenschaften zu erfüllen. Sie ist auch diejenige Schicht, an der Schäden augenscheinlich werden.

Insgesamt lassen sich Schäden unterteilen in Oberflächenschäden, Verformungen und Risse (siehe auch "Schadenkatalog" in [4]). Oberflächenschäden und Verformungen

beeinträchtigen vor allem Sicherheit und Fahrkomfort, während Risse sich hauptsächlich auf die Lebensdauer und Beständigkeit von Strassenbelägen auswirken. Die Hauptursachen für Schäden sind äusserst vielfältig. Sie können sowohl durch die unzureichende Dimensionierung/Konzipierung und Tragfähigkeit, das Ausmass und die Art der Verkehrs- bzw. Klimabeanspruchung (Hitze, Frost, Schnee etc.) als auch durch ungenügende Eignung und Qualität des Mischguts, des Verbunds einzelner Komponenten im Belag oder einzelner Schichten sowie durch mangelhafte Ausführung sprich Einbau und Verdichtung hervorgerufen werden. Schadensarten von Asphaltbeläge lassen sich in drei Gruppen einteilen:

- **Substanzschäden** an der Oberfläche: Sie beeinflussen vor allem die Fahrsicherheit (vereinzelt auch den Fahrkomfort), aber auch die Standfestigkeit und Dauerhaftigkeit des Strassenbelages, da solche Schäden häufig auch Angriffspunkte für Wasser, Frost, lösende Substanzen und Verwitterung bieten.
- **Verformungen:** Verbleibende Verformungen im Belag sind Schäden, die nicht nur die Oberfläche, sondern auch Struktur und Aufbau der Strasse betreffen. Sie sind meistens auf ungenügende Dimensionierung oder ungeeignetes Mischgut zurückzuführen und beeinflussen vor allem Sicherheit und Fahrkomfort.
- **Risse:** ähnlich wie Verformungen, gehören Risse ebenfalls zu Schäden, die Belagsstruktur und Strassenaufbau betreffen. Ihre Ursachen sind, wie obenstehend beschrieben, vielfältig, häufig treten sie auch als Folge von übermässigen Oberflächenschäden oder starken Belagsverformungen auf. Phänomenologisch liegt die Ursache von Rissen in Zugspannungen bei ungenügender Verformbarkeit und Festigkeit. Sie beeinflussen damit die Beständigkeit, da insbesondere durch Risse neue Angriffspunkte für Wasser, Frost, Tausalz, lösende Substanzen und Verwitterung geschaffen werden.

2.3.2 Einflussgrössen auf die Schadensentwicklung

Während die Ursachen für die zuvor aufgezählten Schadensphänomene sehr vielfältig sind, gilt dies ebenfalls für die Einflussgrössen. Für ein besseres Materialverständnis und zur Bewertung der Dauerhaftigkeit empfiehlt es sich, die jeweiligen Einflussfaktoren getrennt voneinander zu betrachten. Insbesondere für die Prognose bzw. Modellierung des Materialverhaltens und zur Ermittlung der Restnutzungsdauer von Asphaltbefestigungen sollten die Einflussfaktoren Verkehrsbelastung, Alterung, Klima (Temperatur) und Materialeigenschaften berücksichtigt werden (vgl. [11]).

In den folgenden Unterkapiteln wird ein Überblick zu den Einflussfaktoren und deren Einflussstärke auf die Zustandsentwicklung einer Asphaltbefestigung gegeben. Es sei jedoch an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass hierbei nicht sämtliche Einflussfaktoren und deren Wirkungsweise umfassend beschrieben werden können. Daher ist der folgende Abschnitt als grobe Übersicht von Faktoren zu sehen, die bei der Entwicklung eines Modells zur Formulierung von Zustandsprognosen berücksichtigt werden können.

Einfluss der Verkehrsbelastung

Die Belastungen auf die Asphaltbefestigung in Folge von Verkehr bestimmen sich im Wesentlichen aus der Achslast, der Anzahl an Achsen, der geometrischen Anordnung der Achsen und Art der Bereifung eines Fahrzeugs und dem Reifeninnendruck (vgl. [12]). Insbesondere der Schwerverkehr (SV) hat durch die deutliche höhere Belastung im Vergleich zu dem PW-Verkehr einen bedeutsamen Einfluss auf die Zustandsentwicklung der Oberflächenmerkmale (vgl. z. B. [13, 14]). Eine höhere Beanspruchung ergibt sich auch aus höheren Reifeninnendrüken, weil diese in einer kleineren Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn resultieren. Zusätzlich kann auch die Geschwindigkeit des Verkehrs einen Einfluss auf den Fahrbahnzustand haben. So führt langsam fahrender oder fast stehender Verkehr zu einer längeren Belastungszeit und somit zu einer höheren Beanspruchung der Fahrbahnbefestigung (vgl. [15]). Je höher die Beanspruchung durch die Verkehrsbelastung ist, umso stärker ausgeprägt können die entsprechenden Schadensbilder sein bzw. umso schneller können Schäden auftreten. Dabei hat die

Verkehrsbelastung vor allem einen Einfluss auf Ermüdungserscheinungen und Verformungen im Querprofil.

Einfluss der Alterung

Zusätzlich zur Einwirkung des Verkehrs beeinträchtigt die Alterung die Substanz von Befestigungen (vgl. [16]). Die Alterung bezeichnet in diesem Zusammenhang die Änderung der chemischen und physikalischen Eigenschaften des Bindemittels mit der Zeit, d. h. während der Lagerung, durch die Verarbeitung und den Einbau sowie im eingebauten Zustand. Durch oxidative Alterung, destillative Alterung und Strukturalterung verhärtet das Bindemittel, wird spröder und verliert einen Teil seiner Klebkraft (vgl. [17]). Die Alterung wird hauptsächlich durch die äusseren Umgebungsbedingungen (Sauerstoff, Temperatur, Ultraviolettstrahlung) sowie die Produktionsbedingungen (insbesondere Temperatur) beeinflusst.

Die Alterung des Bindemittels hat einen wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von Asphalt. Es kommt zu einer erhöhten Steifigkeit und dementsprechend erhöhtem Ermüdungs- und Verformungswiderstand bei gleichzeitiger Abnahme des Relaxationsvermögens (vgl. [18]). Die Alterung gilt also als eine zeitliche Veränderung der Materialeigenschaften, welche die Art der Schadenbildung wesentlich beeinflussen (vgl. [19]). Dementsprechend ist die Asphaltkonstruktion vor allem in den ersten Jahren nach Herstellung, wenn das Bindemittel noch nicht so stark verhärtet ist, anfälliger gegen plastische Verformungen (vgl. [20]). Im späteren Verlauf der Lebensdauer sind durch die Versprödung des Bindemittels vor allem Risse und Oberflächenschäden die vorherrschenden Schadensmechanismen.

Der Alterungsfortschritt in einer Asphaltbefestigung ist in den einzelnen Schichten, aufgrund der variierenden äusseren Einflüsse, sehr unterschiedlich ausgeprägt und nimmt dabei in der Regel von oben nach unten ab (vgl. [18]). Zudem ist die Alterung des Bindemittels von systembedingten Einflüssen, wie der Art des Bindemittels, der Dicke des Bindemittelfilms und dem Hohlraumgehalt des verwendeten Belags abhängig (vgl. [17]).

Einfluss der Temperatur

Die Eigenschaften eines Asphalts sind aufgrund des im Mischgut enthaltenen Bindemittels mit seinen temperaturabhängigen visko-elastischen Eigenschaften ebenfalls stark temperaturabhängig. Bei niedrigen Temperaturen wird der Asphalt dadurch sehr hart und spröde und somit rissanfällig, bei hohen Temperaturen sehr weich und verformungsanfällig. Bei derselben Verkehrsbelastung können daher unterschiedliche Temperaturen bzw. Temperaturverteilungen zu sehr unterschiedlichen Beanspruchungen in einer Asphaltbefestigung führen (vgl. [21]). Insbesondere bei extremen Temperaturbedingungen kommt es dadurch vermehrt zu einer Schadensentstehung bzw. -entwicklung.

Bei sehr niedrigen Temperaturen kann es durch die hohe Sprödigkeit des Bindemittels, durch abkühlungsbedingte innere Spannungen, zu sogenannten Kälterissen kommen. Bei sehr hohen Temperaturen steigt hingegen das Potenzial plastischer Verformungen in Form von Spurrinnen an (vgl. [15, 20]).

Sowohl in der U.S.-amerikanischen als auch in der deutschsprachigen Literatur wird oftmals die Anzahl an heissen Tagen als relevante Kennzahl genannt. Im Gegensatz dazu ist die Häufigkeit von Kälteereignissen in Bezug auf die Rissbildung weniger relevant. Hier wirken sich oftmals bereits einmalige Temperaturereignisse auf die Schadensentwicklung aus – mit dem Unterschreiten einer kritischen Temperaturgrenze beginnt unmittelbar die Entwicklung eines Schadens (vgl. [17]).

Einfluss der Materialeigenschaften

Als weitere wesentliche Einflussgrösse auf die Dauerhaftigkeit einer Strassenbefestigung sind die kompositionellen und volumetrischen Materialeigenschaften zu nennen. So wird

in der Regel ein für den Anwendungszweck, je nach erwarteter Temperatur- und Verkehrsbelastung, geeigneter Schichtenaufbau mit entsprechenden Mischgutrezepturen gewählt. Eine falsche Dimensionierung oder unzureichende Materialqualität kann damit bereits zu Schäden führen. Vor allem der Hohlraumgehalt hat einen entscheidenden Einfluss auf die Lebensdauer einer Strasse (vgl. [22]). Dabei gilt es auch zu berücksichtigen, dass die Materialeigenschaften einen direkten Einfluss auf das Alterungsverhalten und damit ebenfalls auf die Lebensdauer haben. Die grundsätzliche Annahme, dass in der Schweiz von einer strukturell ausreichenden Dimensionierung ausgegangen werden kann (vgl. [19]), sollte deshalb überprüft werden.

Auch die bei der Herstellung und dem Einbau von Asphaltmischgut zulässigen und unvermeidlichen Schwankungen der Mischgutzusammensetzung und Mischgutqualität beeinflussen die Dauerhaftigkeit (vgl. [23 bis 25]). Auch innerhalb der bauvertraglich vorgegebenen Grenzen gibt es signifikante Unterschiede bei der Zustandsentwicklung einer Strasse (vgl. [26]).

2.3.3 Untersuchungsmethoden zur Analyse und Prognose des Strassenoberbauzustands

Bei Planung und Bau von Asphaltbefestigungen ist aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen eine möglichst lange Lebensdauer anzustreben. Es ist daher naheliegend, dass Analysen von Belägen unter realen Verkehrsbedingungen der verlässlichste Weg sind, um Aussagen über deren Praxistauglichkeit machen zu können. Allerdings müssten solche Datenerhebungen aufgrund der veranschlagten Lebensdauer über lange Zeiträume (etwa 20 Jahre) durchgeführt werden.

Stattdessen werden häufig auch Labor-Prüfungen oder In-Situ Tests durchgeführt, mit denen entweder die Verkehrsbeanspruchung, die Temperaturbeanspruchung oder das Alterungsverhalten oder eine Kombination der vorgenannten simuliert wird. So existieren Grossversuchsanlagen (z. B. MLS10), welche abseits von befahrenen Verkehrsflächen oder auf gesicherten Abschnitten von befahrenen Strassen betrieben werden können. Dabei handelt es sich um Maschinen, welche in der Lage sind, die zeitlich geraffte, dynamische Überrollbeanspruchung von real auftretendem Verkehr zu simulieren. Die dynamische Beanspruchung aus dem Verkehr oder die Temperaturbeanspruchung wird auch in Performance-Prüfungen an Asphaltprobekörpern im Labor simuliert. Hierfür existiert eine Vielzahl an Prüfmethoden, von denen einige bereits in der Normungsserie EN 12697 europäisch standardisiert sind. Zu erwähnen sind hier beispielsweise Zug- und Abkühlversuche (EN 12697-46), Ermüdungsprüfungen (EN 12697-24) und Verformungsprüfungen (EN 12697-22 / EN 12697-25). Gleichzeitig stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, mit denen die Alterung von Asphalt im Labor simuliert werden kann (vgl. [27, 28]).

Labor und In-situ Tests geben zwar nützliche Information über die Qualität der verwendeten Materialien, aufgrund der komplexen Struktur und der Wechselwirkung der unterschiedlichen Einflussfaktoren ist die Prognose von Schäden und Performance jedoch sehr herausfordernd. Die Praxistauglichkeit von Belägen und das Zusammenwirken der Belagsschichten unter realen Bedingungen kann daher nur bedingt beurteilt werden. Allenfalls liefern die Prüfungen auf Basis von physikalischen Messwerten jedoch Indikatoren zur Bewertung des Materialverhalten und damit für die Lebensdauerprognose.

Relevante Daten aus Materialuntersuchungen liegen aktuell für gesamte Netze noch nicht vor, um statistisch abgestützte Modelle zu entwickeln. Für Strassennetze werden jedoch netzweite Erfassungen der Fahrbahnoberfläche erhoben, weshalb sich bisher diese zur Ableitung des Zustands im Erhaltungsmanagement durchgesetzt haben.

2.4 Zustand der Fahrbahnoberfläche und dessen Bewertung

Im Rahmen der Überwachungstätigkeiten im Erhaltungsmanagement bei Fahrbahnen werden regelmässig netzweite Zustandserfassungen und -bewertungen ZEB durchgeführt.

Im Jahr 1990 wurden die Anforderungen an die Zustandserfassung und -bewertung von Strassen zum ersten Mal in einer Schweizer Norm definiert (vgl. [29]). Dabei wurde das Vorgehen für die visuelle sowie für die messtechnische Erfassung und Bewertung des Zustands der Fahrbahnoberfläche für die Schweiz standardisiert. In der Zwischenzeit erfolgte bereits eine zweimalige Revision. Aktuell steht eine weitere Revision der aktuell gültigen Norm [3] aus; sie wird in den nächsten 2-3 Jahren erfolgen.

Von zentraler Bedeutung war und ist der Bedarf an sachgerechten Daten zum Zustand der Fahrbahnen, um daraus Aussagen zum Erhaltungsbedarf und geeignete Massnahmen daraus ableiten zu können. Daneben sollten die mit der Nutzung der Strassen verknüpften Anforderungen, Fahrkomfort und Sicherheit, mit entsprechenden Datengrundlagen messbar gemacht werden.

2.4.1 Erhobene Zustandsmerkmale

Grundsätzlich wird im Rahmen der Überwachungstätigkeiten bei Fahrbahnen der Zustand durch folgende Merkmale der Fahrbahnoberfläche definiert. Diese sind auch weitgehend im deutschsprachigen Raum (D-A-CH) einheitlich festgelegt.

- Substanzmerkmale der Fahrbahnoberfläche (Risse, andere Oberflächenschäden)
- Längsebenheit (Ebenheit in Fahrtrichtung)
- Querebenheit (Ebenheit quer zur Fahrtrichtung)
- Griffigkeit (bei Nässe)

In der Schweiz wird zum Teil auch das Merkmal Tragfähigkeit messtechnisch erfasst. Diese Ergebnisse werden aktuell jedoch meist nicht in eine netzweite Betrachtung mit einbezogen, da eine netzweite Erhebung sehr aufwendig ist. Bisher existierte noch kein standardisiertes schnelfahrendes Messsystem, welches eine netzweite Erhebung analog zu den anderen Zustandsmerkmalen ermöglicht. Die Ermittlung der Tragfähigkeit mit dem Traffic Speed Deflectometer (TSD) ist derzeit Gegenstand der Forschung. Hierbei steht vor allem die Interpretation der TSD-Ergebnisse in Bezug auf die Tragfähigkeit des Strassenoberbaus und somit die Auswertung und Bewertung der Verformungsmessungen im Fokus.

Substanzmerkmale der Fahrbahnoberfläche

Substanzmerkmale der Fahrbahnoberfläche sind am Strassenoberbau erkennbare Oberflächenschäden in Form von unterschiedlichen Rissen (Einzelrisse, Netzrisse, offene Nähte, etc.) oder anderen Beschädigungen (Ausbrüchen, Schlaglöchern, Ablösungen, Flicker, etc.). Diese werden hauptsächlich erhoben, um den aktuellen Zustand der Substanz zu bewerten und die zukünftige Zustandsentwicklung abzuschätzen.

Für den Nutzer wirken sich diese Oberflächenschäden erst ab einem bestimmten Ausmass in einem verringerten Fahrkomfort aus. Sie beeinträchtigen jedoch die Tragfähigkeit und reduzieren die angestrebten Nutzungsdauern, sodass diese Merkmale vor allem aus der Sicht der Strassenbetreiber einen wesentlichen Einfluss auf die Erhaltungsplanung aufweisen. Bei einem zu grossen Ausmass kann es zusätzlich auch noch zu einer Verlängerung der Reisezeit kommen, da die Fahrgeschwindigkeit reduziert werden muss.

Längsebenheit

Die Längsebenheit ist ein für den Fahrkomfort und die Sicherheit entscheidendes Merkmal der Fahrbahnoberfläche. Wenn die Wellenlänge des Belags in einem ungünstigen Verhältnis zu der Eigenfrequenz des Fahrzeugs steht, können Kräfte entstehen, die sowohl das Fahrgefühl bzw. die Beladung (Personen und Güter) als auch im schlimmeren Fall die Fähigkeit, das Fahrzeug zu kontrollieren, negativ beeinflussen.

Querebenheit

Die Querebenheit in Form von Spurrinnen ist vor allem ein verkehrssicherheitsrelevantes Merkmal. Bei Niederschlag kann sich in den Querunebenheiten Wasser sammeln, das zu Aquaplaning führen kann. Des Weiteren können Spurrinnen ab einer gewissen Tiefe die Steuerung eines Fahrzeuges erheblich erschweren. Bei der Querebenheit spielen daher die Tiefe der Spurrinne, aber auch die mögliche Wassertiefe in der Spurrinne eine wesentliche Rolle.

Griffigkeit

Auch die Griffigkeit ist ein sicherheitsrelevantes Merkmal. Eine hohe Griffigkeit bedeutet, dass eine gute Kraftübertragung vom Fahrzeug (Reifen) auf die Fahrbahn möglich ist. Mit abnehmender Griffigkeit erhöht sich somit die Schwierigkeit der Führung von Fahrzeugen. Dies bezieht sich sowohl auf die Steuerung (Kurvenfahrt) als auch auf die Beschleunigung und den Bremsvorgang. Im Vergleich zu den anderen Merkmalen ist zu beachten, dass die Griffigkeit nicht nur von der Oberflächenbeschaffenheit der Fahrbahn, sondern auch von der gefahrenen Geschwindigkeit sowie dem aktuellen Zustand der Fahrbahn (nass oder trocken) und der Art der Bereifung abhängt.

Tragfähigkeit

Die Tragfähigkeit ist aufgrund der in den betrachteten Ländern vorliegenden Strassenaufbauten zunächst kein Merkmal, das direkte Auswirkungen auf den Nutzer hat. Wenn aber die Belastung der Fahrbahn deren Tragfähigkeit dauerhaft übersteigt, schädigt dies die Struktur und wird damit zu weiteren Schäden führen. Diese Schäden beeinflussen die aufgeführten Zustandsmerkmale und haben dadurch wieder negativen Auswirkungen auf den Nutzer. Die Nutzungsdauer ist daher proportional zur Tragfähigkeit des Oberbaus.

2.4.2 Zustandserfassung

Für die unterschiedlichen Zustandsmerkmale existieren verschiedene technische Kennwerte, welche messtechnisch oder visuell mit unterschiedlichen Erfassungsmethoden erhoben werden. Es gibt keine einheitliche länderübergreifende Methode, wie die verschiedenen Zustandsmerkmale erhoben und welche Kennwerte gemessen, ausgewertet bzw. aufgenommen werden. In der Schweiz sind sie in der die Grundnorm SN 640510 Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche (vgl. [30]) und den dazugehörigen nachgeordneten Normen beschrieben (Normennummern?).

Es kann festgehalten werden, dass die Werte zur Längsebenheit, Querebenheit und Griffigkeit üblicherweise anhand von schnellfahrenden, d. h. sich im normalen Verkehr bewegenden, Mess- und Erfassungsfahrzeugen aufgenommen werden. Von der Fahrbahnoberfläche können ebenfalls von schnellfahrenden Fahrzeugen Bilder und/oder Videos aufgenommen werden, die dann entweder von Menschen oder mit Hilfe künstlicher Intelligenz auf Schäden untersucht werden. In der Vergangenheit wurden diese Werte durch Begehungen vor Ort aufgenommen. Dies geschieht heute zum Teil immer noch auf Strassen mit geringerer Verkehrsbelastung. Bei der visuellen Zustandserfassung werden die Schäden meistens weniger genau erfasst. Die Bewertung durch Begehung bzw. Videoauswertung beruht dabei auf der gleichen Grundlage.

Die etablierten Methoden zur Erfassung der Tragfähigkeit sind dagegen aufwändiger und werden in der Regel bis jetzt statisch bzw. mit langsamer Geschwindigkeit des Messfahrzeugs aufgenommen. Die Überprüfung erfolgt daher meist nur stichprobenweise auf ausgewählten Strassenabschnitten. Schnellfahrende Messsysteme sind derzeit in Erprobung.

In der Schweiz werden Fahrbahnen in definierten Abständen regelmässig inspiziert. Dabei werden nach [3] fünf Zustandsmerkmale durch definierte Zustandsgrössen erfasst und in sechs dimensionslose Zustandsindizes transformiert. Tabelle 1 liefert hierzu einen Überblick.

Tabelle 1: Zustandsmerkmale, Zustandsgrössen und Zustandswerte

Zustandsmerkmal	Zustandsgrösse	Zustandswert
Oberflächenschäden (ohne/inkl. visueller Bewertung der Spurrinnen)	Ausmass A, Schwere S [-]	I_0, I_1
Längsebenheit	Standardabweichung der Winkelwerte s_w [-]	I_2
Querebenheit	Spurrinntiefe SPT [mm]	I_3
	fiktive Wassertiefe SPH [mm]	wird nicht bewertet
Griffigkeit	Reibungskoeffizient aus SKM [-]	I_4
Tragfähigkeit	Deflektion Benkelmann, FWD [mm/100]	I_5 (wird meist nicht netzweit erhoben.)

2.4.3 Zustandsbewertung

Die Zustandsbewertung basiert auf international einheitlichen Grundsätzen (vgl. [31]). In der Schweiz erfolgt für jedes Zustandsmerkmal die Erfassung einer oder mehrerer physikalischer Zustandsgrössen. Diese Zustandsgrössen werden in einen Indexwert überführt. Abschliessend sind weitere Verknüpfungen unterschiedlicher Indexwerte möglich (vgl. Abbildung 3). Diese Verknüpfung ist in der Schweiz jedoch nicht standardisiert bzw. nicht einheitlich geregelt.

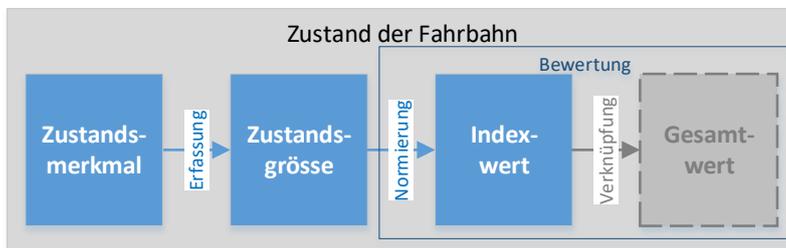


Abbildung 3: Zustandsbewertung der Fahrbahnen in der Schweiz (aus [32])

Tabelle 2: Bewertungsmassstab in der Schweiz für Fahrbahnen

Zustandsnote	Zustandsklasse
[0..1)	Gut
[1..2)	Mittel
[2..3)	Ausreichend
[3..4)	Kritisch
[4..5]	Schlecht

Für die Zustandsbewertung ist nach [3] für die Zustandsindizes ein einheitlicher Bewertungsmaassstab definiert. Die jeweils definierten physikalische Zustandsgrössen werden durch Normierungsfunktionen in diesen Bewertungsmaassstab transformiert. Dadurch können alle Merkmale einheitlich auf einer Notenskala von 0 «gut» bis 5 «schlecht» bewertet und in 5 unterschiedliche Zustandsklassen unterteilt werden (vgl. Tabelle 2).

Aktuell ist die Ausweitung der Wertsynthese über die Indexierung hinaus zu Teilwerten und Gesamtwerten (vgl. Kap. 2.4.4) in der Schweiz nicht standardisiert. Im Rahmen der Veröffentlichung des Netzzustandsberichts wird durch das ASTRA eine vereinfachte Verknüpfung zu einem Gesamtwert durchgeführt (vgl. [33]). Zur Abbildung des Gesamtzustandes wird aus den Zustandswerten I_0 (Oberflächenschäden), I_2 (Längsebenheit), I_3 (Querebenheit) und I_4 (Griffigkeit) mit jeweiliger Gewichtung ein Gesamtwert gebildet.

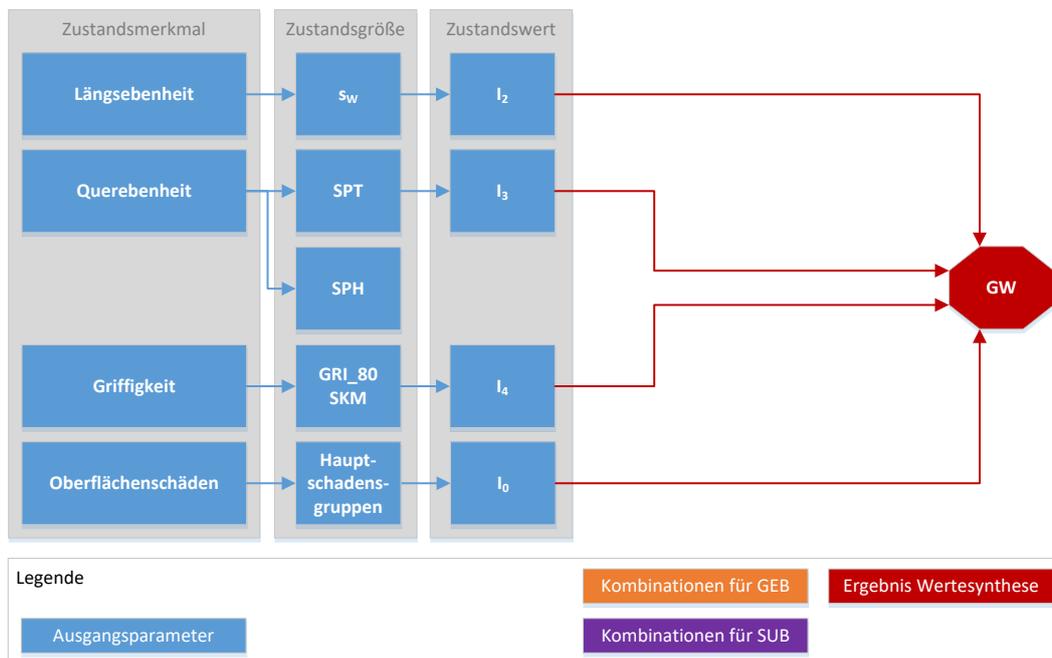


Abbildung 4: Wertsynthese des Bundesamts für Strassen ASTRA (aus [32])

Die Wertsynthese zum Gesamtwert (GW) erfolgt mit folgender Verknüpfungsformel:

$$GW = 0.1 * I_0 + 0.3 * I_2 + 0.3 * I_3 + 0.3 * I_4$$

In diesem Gesamtwert wird die Tragfähigkeit nicht berücksichtigt.

2.4.4 ZEB im D-A-CH-Vergleich

Die Entwicklung der ZEB im deutschsprachigen Raum (D-A-CH) ist durch den vorhandenen intensiven Erfahrungsaustausch ähnlich und zeitlich weitgehend parallel abgelaufen. Ende der 1980er Jahren wurden in den drei Ländern im Zusammenhang mit den Überlegungen zu einer systematischen Strassenerhaltung die Anforderungen an die (messtechnische) Zustandserfassung definiert.

Man einigte sich darauf, die Zustandsbewertung auf Merkmalen aufzubauen, die sich aus der Beschaffenheit der Oberfläche und damit ohne zerstörende Prüfungen ableiten liessen. Die zu erfassenden Merkmale beschreiben im Wesentlichen die vorhandene und an der Fahrbahnoberseite erkennbare Schädigung als Abweichung zu einem Sollzustand. Der Sollzustand ist als planeben, ohne Flickstellen, ohne Risse bzw. griffig definiert. Der Strassenzustand wurde D-A-CH übergreifend neben weiteren in folgende Merkmalsgruppen gegliedert:

- Substanzmerkmale (sichtbar an der Oberfläche)
- Ebenheit im Längsprofil
- Ebenheit im Querprofil
- Griffigkeit

Bei der Zustandserfassung werden analog zur Schweiz bei den verschiedenen Strassenbetreibern wie Bund, Länder, Städte und Gemeinden nicht immer alle Merkmale erfasst. Nur für das Fernstrassennetz werden einheitlich alle 4 Merkmale in gleicher Periodizität von 4 Jahren erfasst. Die folgende Tabelle 3 gibt eine Übersicht für die D-A-CH-Länder.

Tabelle 3: Zustandsgrößen der Zustandserfassung für Fernstrassen in den D-A-CH-Ländern (aus [34])

	Deutschland	Österreich	Schweiz
<i>Erfassungsperiode</i>	4 Jahre	4 Jahre	4 Jahre
<i>Oberflächenschäden</i>	Anteil geschädigter Fläche mit Rissen [%], Ausprägung [m], Häufigkeit [%]	Anteil geschädigter Fläche [%], Ausprägung [m], Häufigkeit [%]	Erfassung von Ausmass und Schwere [-] der Einzelschäden und Zusammenführung zu Hauptgruppen
	Übriger Anteil geschädigter Fläche durch Oberflächenschäden [%]	Übriger Anteil geschädigter Fläche durch Oberflächenschäden [%]	
<i>Längsebenheit</i>	Allgemeine Unebenheit [cm ³]	International Roughness Index [m/km]	Standardabweichung der Winkelwerte [-]
<i>Querebenheit</i>	Spurrinntiefe [mm]	Spurrinntiefe [mm]	Spurrinntiefe [mm]
	Fiktive Wassertiefe [mm]	Fiktive Wassertiefe [mm]	Fiktive Wassertiefe [mm]
<i>Griffigkeit</i>	Reibungskoeffizient (SKM) [-]	Reibungskoeffizient (RoadStar/SRM) [-]	Reibungskoeffizient (SKM) [-]

Die Zustandsbewertung der Zustandsmerkmale erfolgt in allen drei D-A-CH Ländern standardisiert durch eine Normalisierung der gemessenen oder berechneten Zustandsgrößen in dimensionslose Zustandswerte. Diese werden dann weiter in Teilwerte oder einen Gesamtwert für die Bewertung zusammengeführt. Die grundlegende Vorgehensweise ist in Abbildung 5 dargestellt. Dabei können folgende Teilwerte generell unterschieden werden:

- Gebrauchswerte zur Beschreibung der Verkehrssicherheit und des Fahrkomforts
- Substanz- bzw. Strukturwerte zur Beschreibung des strukturellen Zustandes
- Gesamtwerte als Kombination der Teilwerte als Rechengrößen oder für generelle Darstellung eines Gesamtzustandes eines Strassenabschnitts

Die Methoden zur Berechnung der Teil- bzw. Gesamtwerte sind in den einzelnen Ländern sehr unterschiedlich, können aber unter dem Begriff Wertesynthese methodisch zusammengefasst werden. Dabei wird zunächst über die Normierung der physikalischen Zustandsgrößen in einen dimensionslosen Zustandswert und die darauf aufbauende Verknüpfung der Einzelmerkmale zu Teilwerten und ggf. zu einem Gesamtwert ein systematisches Bewertungsverfahren angewendet, welches auch die unterschiedlichen

Anforderungen (Sicherheit, Komfort, Substanz etc.) in den Prozess integriert und somit auch strategische Aufgaben erfüllt. Für einen ausführlichen Vergleich der Wertsynthesen wird auf [32] verwiesen.

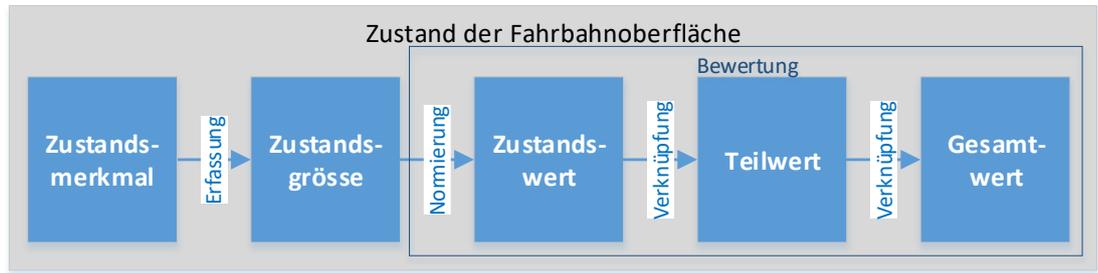


Abbildung 5: Grundsatz der Zustandsbewertung in den D-A-CH Ländern (aus [32])

Die Bewertung wird abweichend zur Schweiz in Deutschland und Österreich nicht anhand einer Notenskala von 1 bis 5 durchgeführt. Tabelle 4 zeigt einen Vergleich der Bewertungsskalen zwischen den Ländern Deutschland, Österreich und der Schweiz.

Tabelle 4: Vergleich der Kategorisierung zur Zustandsbewertung in Deutschland, Österreich und der Schweiz (vgl. [34])

Zustandsnote	Deutschland	Österreich	Schweiz
[0.0,0.5)			Gut
[0.5,1.0)			
[1.0,1.5)	1	Sehr gut	Mittel
[1.5,2.0)	2	Gut	
[2.0,2.5)	3		Ausreichend
[2.5,3.0)	4	Mittel	
[3.0,3.5)	5		Kritisch
[3.5,4.0)	6	Schlecht	
[4.0,4.5)	7		Schlecht
[4.5,5.0]	8	Sehr schlecht	

2.5 Kapitelzusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die grundlegenden Prozesse eines systematischen Erhaltungsmanagements vorgestellt. Es wurde aufgezeigt, dass die Prognose der Zustandsentwicklung innerhalb eines Erhaltungsmanagements ein wesentliches Kernelement ist und wie deren Ergebnisse bei der Entscheidungsfindung verwendet werden. Zudem wurde verdeutlicht, wie Schäden am Strassenoberbau entstehen und die Ableitung eines Zustandsbegriffs beim Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen stattfindet.

Die Aussagefähigkeit, bzw. -genauigkeit der Zustandsprognosen von bisherig eingesetzten Modellen ist beschränkt. Dies liegt zum einen daran, dass die Eingangsdaten natürliche Streuungen aufweisen. Zum anderen besteht eine Herausforderung darin, die komplexen Schadensmechanismen mit Hilfe von Modellen treffend abzubilden. Die Vielzahl an Einflussfaktoren und deren komplexes Zusammenwirken erschweren die Fragestellung zusätzlich. Die Parametrisierung von (Prognose-)Modellen erfolgt stets auf Basis von Beobachtungen bzw. erhobenen Daten. Die Genauigkeit dieser Modelle ist daher massgeblich durch die Qualität der Eingangsdaten bestimmt. Im folgenden Kapitel 3 wird daher ein Überblick zu den Qualitätsanforderungen an den Strassenoberbau gegeben und aufgezeigt wie diese Eigenschaften erhoben werden. Hierzu wird auch die Datenqualität der verschiedenen Datenquellen bewertet.

3 Qualitätsanforderungen an den Strassenoberbau

3.1 Allgemeines

Der Zustand eines Strassenoberbaus hängt wesentlich von der Qualität der einzelnen Schichten, aber auch von einem guten Zusammenwirken der Schichten miteinander ab. Zur Ermittlung des Zustands des Strassenoberbaus im Erhaltungsmanagement werden dabei, wie in Kapitel 2 dargestellt, meist die Eigenschaften und Merkmale der Fahrbahnoberfläche beurteilt. Die Qualität der Fahrbahnoberfläche, aber auch des gesamten Oberbaus wird wesentlich durch die Qualität und Dauerhaftigkeit der verwendeten Baustoffe einerseits und durch deren fach- und sachgerechten Einbau andererseits bedingt. Eine Überprüfung und Überwachung der verwendeten Baustoffe und des sachgerechten Einbaus erfolgen dabei vor allem während der Erstellung.

Hierzu dienen Qualitäts- und Normanforderung an Baumaterialien und deren Zusammensetzung. Neben den Anforderungen an das zu verwendende Mischgut werden auch Anforderungen an die eingebauten Schichten im Einzelnen und deren Zusammenwirken (Schichtenverbund) gestellt. Bei den genannten Anforderungen handelt es sich in der Schweiz hauptsächlich um volumetrische Mischgut- und Belagskennwerte, die weitgehend empirisch sind und nicht wirklich auf mechanischen oder physikalischen Kennwerten beruhen. Erst in jüngster Zeit kommt es, auch im Zusammenhang mit der europäischen Normung, zur Festlegung sogenannter performanceorientierter Prüfungen zur Bestimmung der Qualität.

3.2 Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche

Die Anforderungen an die Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche sind in der Schweiz in der Norm VSS 40525 [35] definiert. Dies betrifft einerseits Einzelunebenheiten und die Zustandsmerkmale Längs- und Querebenheit sowie Griffigkeit (vgl. Abschnitt 2.4.1). Grundsätzlich können diese Eigenschaften durch unterschiedliche Messmethoden resp. Auswertemethoden und Zustandsgrössen bestimmt werden, weshalb in der Norm Anforderungen für verschiedene Methoden definiert werden.

Tabelle 5: Übersicht über die Anforderungsdefinitionen an Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche nach [35]

Zustandsmerkmal	Unterteilung für	Definition Abnahbewert	Definition Schwellenwert	Definition Richtwert
Einzelunebenheiten	-Schichtenart	✓	-	-
	-Geschwindigkeitsniveau			
Längsebenheit	-sW, W_{max} / NBO	✓	-	-
	-Massnahmentyp			
	-Geschwindigkeitsniveau			
Querebenheit	-T (Spurrinnen)	-	-	-
	- t_{max} (theoretische Wassertiefe)	-	✓	-
Griffigkeit	-Skiddometer BV8 / SKM (SCRIM)	✓	✓	-
	-Geschwindigkeitsniveau			
	-SRT / Ausflussmesser			✓

Mit den in [35] definierten Anforderungen soll einerseits die geforderte Qualität bei der Abnahme des gebauten Werkes (durch einen Abnahmewerte) definiert und andererseits ein minimales Qualitäts- und Sicherheitsniveau über die gesamte Nutzungsdauer der Strasseninfrastruktur (durch einen Schwellenwert) sichergestellt werden. Tabelle 5 zeigt eine Übersicht, wo für die einzelnen Zustandsmerkmale der Fahrbahnoberfläche Abnahme-, Schwellen- oder Richtwerte definiert sind. Je nach Zustandsmerkmal wird nochmals zwischen verschiedenen Mess- bzw. Auswertemethoden, Schichttypen, Massnahmenarten und Geschwindigkeitsniveaus unterschieden.

3.3 Eigenschaften des Strassenoberbaus

In der Schweiz gibt es grundsätzlich sowohl Anforderungen an das zu verwendende Mischgut als auch Anforderungen an die eingebauten Schichten.

Die Mischgutanforderungen für die einzelnen Belagssorten werden analog der europäischen Normung (SN EN 13108-20) in entsprechenden nationalen Vorworten und Anhängen für die Schweiz geregelt. Diese basieren derzeit grösstenteils noch auf empirischen volumetrischen Kennwerten nach der Marshallmethode. Hier werden in der Regel Anforderungen an Korngrössenverteilung, Bindemittelsorte und -gehalt, Hohlraumgehalt Marshall und gegebenenfalls Marshall Stabilität und Fliessen gestellt. Für bestimmte Mischgutsorten gibt es daneben auch performanceorientierte Anforderungen wie Widerstand gegen bleibende Verformung und Ermüdung.

Die Anforderungen an die eingebauten Schichten des Strassenoberbaus aus Walzasphalt sind in der Schweiz in der VSS Norm 40430 "Walzasphalt Konzeption, Ausführung und Anforderungen an die eingebauten Schichten" [36] definiert. Je nach Verkehrs- und Klimabelastung werden für die in der Schweiz verwendeten Mischgutgruppen und -sorten für jede Schicht Dicke, Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad festgelegt. Weiterhin gibt es, je nach dem, um welche Schicht es sich handelt, weitere Anforderungen, wie z. B. die Wasserdurchlässigkeit im Fall von offenporigen Schichten oder die Zugfestigkeit (Rissbeständigkeit bzw. Widerstand gegen bleibende Verformung) im Fall von Hochmodulasphalt Schichten. Die Dimensionierung der Schichtdicken und des Schichtenaufbaus beruht dabei in der Schweiz auf der Festlegung von sogenannten a-Werten (Tragfähigkeitswerten), wie sie in der VSS 40324 "Dimensionierung des Strassenaufbaus, Unter- und Oberbau" [37] festgelegt sind.

Weiterhin enthält die VSS 40430 [36] Angaben zur Erreichung des optimalen Zusammenwirkens der Schichten mit Anforderungen an den Unterbau, die Unterlage und den Schichtenverbund sowie Anweisungen zur Sicherstellung einer guten Einbauqualität mit Angabe optimaler Transport- und Einbaubedingungen (z. B. Temperatur der Luft und des Mischguts).

3.4 Schweizerische Qualitätsüberwachung im Rahmen eines Prüfplanablaufs

Bauen ist ein ganzheitlicher Prozess, der folglich den gesamten Qualitätskreislauf umfasst. Entsprechend können Schäden an jedem Punkt des Qualitätskreises auftreten oder erkannt werden. Entsprechend ist Qualitätsmanagement indirekt immer auch gleichzeitig Schadensmanagement.

Einen wesentlichen Einfluss hat dabei die führende bzw. begleitende Rolle von Bauherrn/ Bauleitung und eines Prüflabors während aller Qualitätsschritte und damit die frühzeitig enge Verzahnung zwischen Bauherrn (Kunden) und Unternehmer (Hersteller). Für das Gelingen des Bauwerks ist es unumgänglich, dass eine Vertrauensbasis zwischen den Beteiligten geschaffen wird, damit sich alle gleichermaßen aktiv und aus Überzeugung am Qualitätssicherungsvorgang beteiligen. Allerdings kann in der Baubranche und ganz speziell auf der Baustelle selbst der diesbezügliche Lern-, Umdenk- und Umsetzungsprozess sicher noch nicht überall als abgeschlossen bezeichnet werden.

Materialprüfung allein darf nicht mit Qualitätsmanagement verwechselt werden. Sie bildet aber ein unverzichtbares Hilfsmittel zur Vermeidung und Beurteilung von Schäden bzw. zur Optimierung von Massnahmen der Schadensbehebung. Wesentlich bei der Beurteilung und Behebung von Schäden ist die durch gutes Qualitätsmanagement sicherzustellende Nachvollziehbarkeit des verwendeten Materials. Dies namentlich durch Entnahme von repräsentativen Rückstellproben in genügender Menge und speziell auch mit Blick auf die spätere Bewertung des Zustandes des Strassenbelages während der Nutzungsphase. Bezüglich Zustandsüberwachung ist im Überwachungsplan vermehrt auch eine kontinuierliche Objektverfolgung mittels Materialprüfung vorzusehen, wobei längerfristig, soweit möglich, die punktuellen traditionellen Prüfungen möglichst durch Entwicklung flächendeckender zerstörungsfreier Prüfungen abgelöst sind. Auch, wenn dies objektspezifisch eine gewisse Verteuerung bedeutet, ist die kontinuierliche Objektverfolgung mittels Materialprüfung im grösseren Rahmen des Gesamt-Strassenmanagements anzustreben, kann doch damit der Wiederholung von Fehlern frühzeitig entgegengewirkt und das Kosten/Nutzen-Verhältnis auf dem Gebiet der Strassenbeläge allgemein verbessert werden.

Aus den bisherigen Ausführungen folgt, dass zur Vermeidung von Schäden vor allem folgende Punkte zu beachten und sorgfältig abzuklären bzw. zu überprüfen sind:

Dimensionierung, Projektierung

- Beschaffenheit von Untergrund oder Unterbau
- Konzeption Fundations- oder Tragschicht
- Konzeption des Oberbaus (ungenügender Oberbau, z. B. zu dünne Schichten)
- auf starrer Unterlage ohne geeignete Rissüberbrückung)
- Festlegung der Gesamtdicke der bituminösen Beläge
- Tatsächliche Verkehrsbelastung = Prognose
- Entwässerung der Foundationsschichten, des Unter- oder Oberbaus

Konzeption der Beläge

- Festlegen der Schichtdicken
- Anzahl der bituminösen Schichten
- Auswahl der Sorten und Typen

Eignungsprüfungen

- Bindemittel
- Mineralstoffe
- Mischgutsorten und -typen
- Festlegen des Bindemittelgehaltes
- Auswahl der Mineralstoffmischungen (Korngrößenverteilungen)
- Probeeinbau

Bindemittel und Mineralstoffe

- Bindemittel, Art und Sorte
- Mineralstoffe
 - Petrografie
 - Kornrundung (rund, teilweise gebrochen, gebrochen),
 - Kornform (kubisch, plattig, stängelig),
 - Polierbarkeit (Griffigkeit der Deckschicht)
 - Haftung des Bindemittels am Gestein
 - Auswahl der einzelnen Komponenten

Mischgut

- Bindemittel, Menge
- Mineralstoffmischung
- Volumetrische Kennwerte wie Hohlraumgehalt, Hohlraumfüllungsgrad
- Mechanische Eigenschaften, wie Widerstand gegen bleibende Verformungen (Grösstkorn), Ermüdung (Bindemittelgehalt)
- Aufbereitung (Herstellungstoleranzen eingrenzen: Einfluss auf die verschiedenen Kennwerte beachten!)

Eingebaute Schichten

- Gebrauchsdauer
- Volumetrische Kennwerte, insbesondere Hohlraumgehalt (Alterung des Bindemittels)
- Verdichtungsgrad
- Mechanische Eigenschaften
- Schichtenverbund

Ausführung

- Aufbereitung, Herstellung des Mischgutes
 - Bindemitteltemperatur (thermische Schädigung)
 - Mineralstoffe (Temperatur, Trocknungsgrad)
 - Mischgut (Temperatur, Mischzeit)
 - Aufbereitungstoleranzen (zulässige Abweichungen des Bindemittelgehaltes und der Korngrössenverteilung)
- Einbau
 - Jahreszeit, Witterung (Regen, Nässe, Wind)
 - Dicken der eingebauten Schichten
 - Unterlage (Ebenheit, Schichtenverbund, Haftvermittler)
 - Geräte (→ Ebenheit, Griffigkeit, Hohlraumgehalt)
- Verdichtung
 - Dicke der Schicht
 - Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad (Temperaturen, Nässe, Wind, Einbaugeräte, Walzarbeit)
 - Verdichtungsart (Glattmantel-, Pneu-, Vibrationswalzen)
- Ebenheit
- Griffigkeit
- Arbeitsnähte und Anschlüsse
- Alterung

In der Schweiz werden gemäss VSS Norm 40430 "Walzasphalt Konzeption, Ausführung und Anforderungen an die eingebauten Schichten" die folgenden Prüfungen zur Sicherstellung der Qualität des eingebauten Belags gefordert:

- Ebenheit
- Griffigkeit
- Schichtenverbund

Auch hat der Unternehmer durch Eigenkontrollen während des Einbaus sicherzustellen, dass die Anforderungen an die eingebauten Schichten erfüllt sind. Dabei sollten Bohrkerne möglichst dort entnommen werden, wo auch während des Einbaus Mischgutproben für Kontrollprüfungen entnommen wurden.

Der Bauherr ist verpflichtet entsprechend der Bedeutung des Bauwerks angemessene Kontrollprüfungen durchführen. Diese Kontrollprüfungen erfolgen gemäss der VSS Norm 40 434 «Prüfplan für Walzasphalt; Festlegung der durchzuführenden Prüfungen». In dieser Norm ist die prozessorientierte Qualitätsüberwachung für Walzasphalt auf Hochleistungsstrassen HLS, Hauptverkehrsstrassen HVS und stark belasteten Verbindungsstrassen VS, sofern die Einbaumenge der Baumassnahme mehr als 1000 t oder deren Einbaufläche mehr als 5000 m² beträgt, geregelt.

Die Qualitätsüberwachung gliedert sich dabei in 3 Phasen:

Phase 1: Die Erstprüfungsberichte sind gemäss SN EN 13108-20 aller für den Einbau vorgesehenen Mischgutsorten und -typen dem Bauherrn vorzulegen, wobei der Zweck der Erstprüfungsberichte darin besteht, den Nachweis der Eignung der einzusetzenden Bestandteile, Walzasphaltsorten und -typen zu erbringen und die Grundlage für die Bewertung der durchzuführenden Prüfungen zu bilden.

Phase 2: Bei anspruchsvollen Objekten kann ein Probeeinbau vereinbart werden, wobei Ort und Umfang des Probeeinbaus zwischen dem Bauherrn und dem Unternehmer im Voraus festzulegen sind.

Phase 3: Während des Einbaus hat der Unternehmer neben geeigneten Eigenüberwachungsmassnahmen, eine Eingangsprüfung des Mischguts gemäss untenstehender Tabelle durchzuführen und zu dokumentieren.

Der Unternehmer führt ein Einbauprotokoll, welches Auskunft gibt über:

- Datum
- Baustelle, Etappe
- Mischgutherkunft
- Mischgutsorte und -typ
- Eingesetzte Maschinen und Personal
- Witterungsverhältnisse
- Einbauzeit, Einbaumenge
- Mischguttemperatur unmittelbar vor dem Walzen
- Entnahme von Mischgutproben für Laborversuche (Ort, Datum, Zeit und Name Probenehmer)
- Spezielle Anmerkungen, z. B. Unterbrüche beim Einbau oder bei der Aufbereitung, Resultate von Verdichtungsmessungen (Ort, Zeit), Anordnungen der Bauherrschaft, Änderungen beim Maschineneinsatz

Durch eine laufende Auswertung der Untersuchungsergebnisse soll verhindert werden, dass ein erkannter Mangel bei mehreren Einbauetappen auftritt. Zudem soll sichergestellt werden, dass auf ungenügende Schichten keine weiteren Schichten eingebaut werden.

Auch der Bauherr führt Kontrollprüfungen des angelieferten Mischguts und der eingebauten Schichten entsprechend der erwähnten Tabelle durch.

Bauherr und Unternehmer lassen die von ihnen vorzunehmenden Prüfungen durch akkreditierte Labors durchführen, wobei das ausführende Labor für jede durchzuführende Prüfung akkreditiert sein muss.

Der Bauherr ist für eine zweckmässige Dokumentation der eingebauten Schichten und der dafür verwendeten Mischgüter verantwortlich.

Tabelle 6 fasst die gemäss VSS 40343 durchzuführenden Prüfungen zusammen.

Tabelle 6: Einbau, Anzahl Prüfungen und Rückstellproben (aus VSS 40343)

Einbau, Anzahl Prüfungen und Entnahme von Rückstellproben							
Gegenstand	Prüfungen	Anforderungen gemäss	Prüfplan				Bemerkungen
			Stufe 1		Stufe 2		
			Bauherr	Unternnehmer	Bauherr	Unternnehmer	
Mischgut Deck-, Binder- und Tragschicht	Hohlraumgehalt Marshall [19, 21]	SN 640 431-1-NA [3] SN 640 431-5-NA [4] SN 640 431-7-NA [5] SN 640 431-20-NA [6] SN 640 431-21-NA [7] VSS 40 436 [8]	A	A	B ⁴⁾	B	Für jede Mischgutsorte und jeden Mischguttyp
	Korngrössenverteilung [16]						
	Löslicher Bindemittelgehalt [15]						
Bindemittel aus Rückgewinnung	Erweichungspunkt R und K [23]	Keine Anforderungen ³⁾	C	C	D ⁴⁾	D	Für jede Mischgutsorte und jeden Mischguttyp
	Penetration [22]						
	Elastische Rückstellung ¹⁾ [24]						
	Kraft-Duktilitätsprüfung ²⁾ [25]						
Bohrkeme Deck-, Binder- und Tragschicht	Schichtdicke [20]	VSS 40 430 [2] VSS 40 436 [8]	E	-	F	-	
	Hohlraumgehalt [17]						
	Verdichtungsgrad [17]						
	Schichtenverbund nach Leutner [21]						
Griffigkeit Deckschicht	Dynamisches Messsystem [9]	VSS 40 520 [11]	1	-	f ¹⁾	-	Pro Baumassnahme Pro Fahrspur in der rechten Radspur
Ebenheit Deckschicht	Ebenheit in Längsrichtung [10]	VSS 40 520 [11]	1	-	f ¹⁾	-	Pro Baumassnahme Pro Fahrspur in der rechten Radspur
Einbauprotokoll Deck-, Binder- und Tragschicht		VSS 40 430 [2]	-	1	-	1	Pro Einbauetappe

A 1 pro 500 t oder 2500 m² und mindestens 2 pro Einbauetappe; zusätzlich 1 Rückstellprobe pro 500 t und mindestens 2 pro Einbauetappe

B Mindestens 1 pro Baumassnahme; zusätzlich 1 Rückstellprobe pro 500 t und mindestens 3 Rückstellproben pro Baumassnahme

C 1 pro Einbauetappe

D 1 pro Baumassnahme

E 4 pro 2500 m² und mindestens 4 pro Einbauetappe

F 4 pro 5000 m² und mindestens 4 pro Baumassnahme

¹⁾ Nur für elastomemodifizierte PmB (gemäss Angaben des Herstellers)

²⁾ Nur für plastomemodifizierte PmB (gemäss Angaben des Herstellers)

³⁾ Anforderungen können vereinbart werden

⁴⁾ Fakultativ

Alle Prüfungen und Untersuchungsmethoden sind jedoch wertlos, wenn sie nicht durch Systemprüfungen (z. B. Rundlaufversuche) oder, noch besser, durch systematische In-situ-Objektbeobachtungen begleitet und validiert werden. In diesem Rahmen kommt der zerstörungsfreien, flächendeckenden Zustandserfassung wachsende Bedeutung zu. Unerlässlich ist aber auch, dass im Rahmen eines lückenlosen Qualitätsmanagements (das den ganzen Lebenszyklus einer Strasse umfasst), jede Beobachtung und jeder Schaden nachvollziehbar festgehalten, dokumentiert und ausgewertet wird und dass auf der Baustelle entsprechende Rückstellproben genommen und fachgerecht aufbewahrt werden, damit aus den Fehlern – die sich nie vollständig vermeiden lassen – allgemein zugängliche Lehren gezogen werden können.

3.5 Datenqualität in der Praxis

Die zuvor beschriebenen Anforderungen und Eigenschaften einer Strasse und deren zugehörige Indikatoren sollten weitestgehend anhand verfügbarer Daten beurteilt werden. Hierfür sind geeignete Datenquellen vorzuhalten und auszuwerten. Die sich daraus ableitbaren Informationen sind hierbei massgeblich von der Datenqualität abhängig. Daher wird im Folgenden die Qualität der einzelnen Datenquellen beurteilt. Dies betrifft die folgenden Datenquellen:

- Zustandsdaten
- Verkehrsdaten
- Aufbaudaten
- Klimadaten
- Daten zur Einbauqualität (materialtechnische Untersuchungen)
- Daten zu durchgeführten Baumassnahmen

3.5.1 Schweiz

In der Schweiz wird je nach Zuständigkeit von ASTRA und den Kantonen meist ein separates Datenmanagement betrieben. Der Datenaustausch mit Externen (z. B. Bauunternehmen und Prüflabors) erfolgt oftmals noch in analoger Papierform, was eine Digitalisierung und einen späteren Austausch der Daten erschwert. In Hinblick auf den ganzheitlichen Ansatz eines Qualitätsmanagements besteht derzeit noch Verbesserungspotential in Bezug auf die Aktualität und Vollständigkeit von Daten. Im Folgenden werden die einzelnen Datenquellen im Einzelnen behandelt.

Zustandsdaten

Die im Rahmen der in regelmässigen Abständen durchgeführten Zustandserfassung gesammelten Daten zum Zustand der Fahrbahnoberfläche zählen seit einigen Jahren zu den etablierten Prozessen innerhalb des Erhaltungsmanagements. Diese Daten sind äusserst relevant, da sie derzeit als wesentliche Entscheidungsgrundlage für zukünftige Erhaltungsmassnahmen dienen. Die Daten werden zustandsmerkmalsspezifisch erfasst und in einheitlichen Datenformaten in das jeweilige Strasseninformationssystem abgespeichert, sodass deren Verfügbarkeit hoch ist.

Verkehrsdaten

Der Verkehr auf einer Strasse spiegelt zum einen die primäre Funktion einer Strassenbefestigung wider. Zum anderen stellt die Verkehrsbelastung einen der bedeutendsten exogenen Einflussfaktoren zur Vorhersage der Zustandsentwicklung einer Strassenbefestigung dar. Verkehrsdaten bzw. insbesondere Daten zur Schwerverkehrsbelastung (DTV_{sv}) sind daher eine weitere bedeutende Datengruppe für Kennzahlensysteme. Innerhalb der Strasseninformationssysteme sind bisher meist nur Querschnittszählungen vorhanden. Eine fahrstreifenscharfe Aufteilung der Verkehrsbelastungen ist daher nur über automatisierte Dauerzählstellen möglich.

Zusätzlich stehen über die vorhandenen Gesamtverkehrsmodelle Simulationsdaten zur Verfügung. Die Modelle werden in regelmässigen Abständen kalibriert. Dazu dienen unter anderem die Daten der Dauerzählstellen. Simulationen von Netzsituationen liefern relevante Verkehrsdaten, z. B. Verkehrsbelastung, Reisezeit u.a., für jeden vorhandenen Streckenabschnitt im modulierten Netz. Voraussetzung für die Nutzung dieser Daten ist eine Referenzierung des Gesamtverkehrsmodells auf das Ortungssystem des Strasseninformationssystems.

Aufbaudaten

Aufbaudaten stellen die zweite wichtige Datengruppe zur Bewertung der Strasseninfrastruktur im Erhaltungsmanagement dar, sodass deren Relevanz als sehr

hoch zu bewerten ist. Informationen zu Schichtarten, verwendeten Materialien und Schichtdicken bilden die Grundinformationen zur Beschreibung des Oberbaus. Für Autobahnen sind Informationen zur obersten Schicht in der Regel netzweit verfügbar. Die Aufbaudaten der weiteren darunterliegenden Schichten sind meist in ihrer Datenqualität beschränkt, bzw. nicht vorhanden.

Angaben zum aktuellen Alter der Schichten spielen insbesondere bei der Abschätzung des zukünftigen Erhaltungsbedarfs eine wichtige Rolle. Diese Informationen sind jedoch oftmals nicht verfügbar. Des Weiteren können Informationen über den strukturellen Zustand des Oberbaus anhand von Tragfähigkeitsmessungen wichtige Informationen zum zukünftigen Verhalten einer Strassenbefestigung liefern.

Die Daten des Schweizerischen Bundesamts für Strassen (ASTRA) werden in der Strasseninformationsbank TRASSEE abgelegt. Die Datenbank enthält für jede Zustandserfassung und Zustandsindex/-grösse eine separate Tabelle mit georeferenzierten Objekten. Weiterhin enthält sie Tabellen mit Informationen zu den Achsen und dem Fahrbahnaufbau.



Abbildung 6: Visualisierung von Strassenflächen (Bildschirmaufnahme Trasse)

Ähnlich verhält es sich bei einer Vielzahl von Kantonen. Auch hier wurden oft nur Daten für die Deckschichten erfasst, wogegen die darunterliegenden Schichten nicht berücksichtigt wurden. In Städten und Gemeinden sind Aufbaudaten datenbanktechnisch oftmals nicht erfasst und fehlen im Strasseninformationssystem. Deshalb lässt sich festhalten, dass in Bezug auf das untergeordnete Netz (Überland- und Innerortsstrassen) die Aufbaudaten in der Regel zur Zeit noch nicht netzweit systematisch und datenbanktechnisch verfügbar sind.

Klimadaten

Klima- bzw. im weiteren Sinne Umweltdaten stellen eine weitere Datengruppe dar. Zum einen bilden Klima und Wetter eine wesentliche Einflussgrösse auf das Verhalten von Strassenbefestigungen. Zum anderen ergeben sich aufgrund der Durchführung von Bau- bzw. Erhaltungsmaßnahmen Emissionen in Form von Schall und Luftschadstoffen, die auf die umliegende Umwelt einwirken. Bei den meisten Umweltdaten ist ein direkter Zusammenhang mit Massnahmen im Rahmen der baulichen Erhaltung sehr schwer nachweisbar.

Daten zur Einbauqualität (materialtechnische Untersuchungen)

In der Schweiz ist der Bauherr nach der VSS Norm 40 434 «Prüfplan für Walzasphalt; Festlegung der durchzuführenden Prüfungen» für eine zweckmässige Dokumentation der eingebauten Schichten und der dafür verwendeten Mischgüter verantwortlich. Grundsätzlich müssten also die Daten sowohl beim ASTRA als auch bei den Kantonen und Städten vorliegen.

Daten zur Einbauqualität sind als essentielle Datenquelle anzusehen, da sich anhand dieser Informationen wichtige Informationen zum Zustandsverhalten der Strasse ableiten liessen.

Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass die Daten aus der Qualitätsüberwachung zum Grossteil in Papierform vorgehalten werden und somit nicht maschinenlesbar sind. Dies erschwert eine systematische Datenverwaltung und insbesondere ihre Auswertung.

Eine flächendeckende Datenverwaltung wird zwar seitens der Bauherren bereits seit einigen Jahren praktiziert, jedoch besteht hier ein Medienbruch, wenn es darum geht, neue Daten in die Datenverwaltungssysteme einzupflegen.

Daten zu durchgeführten Baumassnahmen

In Bezug auf konkrete Baumassnahmen liefert die Art der Massnahme wichtige Informationen zur Zustandsentwicklung einer Strasse. Je nach Art der durchgeführten Instandsetzungsmassnahme ergeben sich unterschiedlich progressiv verlaufende Zustandsverschlechterungen einzelner Zustandsmerkmale. Zudem gilt es, die Historie bereits durchgeführter Massnahmen zu berücksichtigen.

Oftmals liegen jedoch keine Daten zu Baumassnahmen vor, sodass davon ausgegangen werden muss, dass das Baujahr der obersten Schicht als Indikator dazu genutzt wird, wann auf einem Streckenabschnitt eine bauliche Massnahme erfolgt ist.

Zusammenfassend bestehen derzeit noch Weiterentwicklungspotentiale hinsichtlich eines zentralen Datenmanagements in der Schweiz. Ein nicht unerheblicher Anteil der Daten liegt derzeit oftmals nur in Papierform vor, sodass diese Datensätze nicht maschinenlesbar oder automatisch auswertbar sind. Hierin befindet sich jedoch ein grosses Potential, das mit Hilfe eines Datenmanagements mit zugehörigen Schnittstellen erschlossen werden könnte.

In Hinblick auf die Daten zum Schichtaufbau und zur Einbauqualität könnten bspw. sämtliche Ergebnisse aus Laborprüfungen über einen zentralen Server ausgetauscht und verwaltet werden. Hierzu werden vor allem auch benutzerfreundliche Schnittstellen benötigt, die ein einfaches Einfügen oder Aktualisieren von Daten ermöglichen. Eine exakte Lokalisierung der Daten mit Hilfe einer eindeutigen Referenzierung ist hierbei unabdingbar, um zukünftig belastbare, objektspezifische Auswertungen durchführen zu können.

3.5.2 Deutschsprachiges Ausland

Zustandsdaten in Deutschland

In Deutschland wird der Objektkatalog für das Strassen- und Verkehrswesen (OKSTRA) zum Austausch von Daten als Standard für das Strassen- und Verkehrswesen verwendet, Weiterhin regelt die ASB [38] das Bezugssystem für die Bundes- sowie Landesstrassen, welches auf einem Knoten-Kanten-Modell aufbaut. Die Inventardaten werden in den Bundesländern von den Landesstrassenbauverwaltungen gepflegt.

Die Fahrbahnoberflächen werden im Rahmen der Zustandserfassung und -bewertung von Strassen regelmässig mithilfe von standardisierten Verfahren untersucht. Die dabei berücksichtigen Zustandsmerkmale, die von im Verkehr mitschwimmenden schnell

fahrenden Messfahrzeugen erfasst werden, sind in Tabelle 7 dargestellt. Von Bundesautobahnen werden alle vier Jahre sämtliche Fahrstreifen der Betriebsstrecken lückenlos kontrolliert. Auf einbahnigen Bundesstrassen wird lückenlos alle vier Jahre der Hauptfahrstreifen in Stationierungsrichtung betrachtet. Der Hauptfahrstreifen in Gegenrichtung wird zusätzlich lückenlos auf zweibahnigen Bundesstrassen untersucht. Auf Strassen des nachgeordneten Netzes erfolgt die Zustandserfassung und -bewertung im Allgemeinen ähnlich der Systematik der Bundesstrassen, allerdings sind bisher keine verbindlichen und einheitlichen Festlegungen in Bezug auf den zeitlichen Turnus und den Umfang der Erfassungen festgelegt [39].

Tabelle 7: Merkmalsgruppen, Zustandsmerkmale, -indikatoren und -größen der messtechnischen Zustandserfassung in Deutschland, nach [39].

Merkmalsgruppe	Zustandsmerkmal	Zustandsindikator	Zustandsgröße	
Ebenheit	Längsunebenheit (regellos)	Unebenheitsmaß als spektrale Dichte $\Phi_n(\Omega_0)$ der Unebenheitshöhen bei der Wegkreisfrequenz 1 (Wellenlänge 2π m)	AUN [cm ³]	
	Längsunebenheit	Längsebenheitswirkindex	LWI [-]	
	Längsunebenheit	Bewertetes Längsprofil: Standardabweichung SBL	SBL [mm]	
	Längsunebenheit	Bewertetes Längsprofil: Spannweite DBL	DBL [mm]	
	Querunebenheit (einzel)		Maximum der Mittelwerte der rechten und linken Spurrinntiefe	MSPT [mm]
Maximum der Mittelwerte der rechten und linken fiktiven Wassertiefe			MSPH [mm]	
Rauheit	Griffigkeit	Seitenkraftbeiwert als temperatur- und auf 40, 60 oder 80 km/h geschwindigkeitskorrigierter Mittelwert	GRI_40 [-] GRI_60 [-] GRI_80 [-]	
Substanzmerkmale (Oberfläche), Asphalt	Risse	prozentualer Anteil der von Rissen betroffenen Fläche	RISS [%]	
	Offene Nähte und Fugen	Gesamtlänge der offenen Nähte/Fugen	ONA [m]	
	Restschadensfläche (Asphalt)	prozentualer Anteil der Schadensflächen (Flickstellen und/oder Ausbrüche), jedoch ohne Risse	RSFA [%]	
	Flickstellen		prozentualer Flächenanteil der Flickstellen	FLI [%]
			prozentualer Flächenanteil der eingelegten Flickstellen	EFLI [%]
			prozentualer Flächenanteil der aufgelegten Flickstellen	AFLI [%]
	Ausbrüche	prozentualer Anteil der von Ausbrüchen betroffenen Fläche	AUS [%]	
Bindemittelanreicherungen	prozentualer Flächenanteil mit Bindemittelanreicherungen	BIN [%]		
Substanzmerkmale (Oberfläche), Beton	Längs- und Querrisse	mittlere Länge der Längs- und Querrisse	LQRL [m]	
		prozentualer Anteil von Platten mit Längs- und Querrissen	LQRP [%]	
	Restschadensfläche (Beton)	prozentualer Anteil der schadhafte Platten ohne Risse	RSFB [%]	
	Eckabbrüche	mittlere Anzahl der Eckabbrüche	EABF [-]	
		prozentualer Anteil von Platten mit Eckabbrüchen	EABP [%]	
	Kantenschäden	mittlere Länge der Kantenschäden	KASL [m]	
		prozentualer Anteil von Platten mit Kantenschäden	KASP [%]	
	Abplatzungen und Nester	prozentualer Anteil von Platten mit Abplatzungen und Nestern	NTR [%]	
Flickstellen/Teilersatz	prozentualer Anteil von Platten mit Flickstellen und Teilersatz in Asphalt	BTE [%]		

Zustandsdaten in Österreich

In Österreich werden seit dem Jahr 1998 systematische Zustandsdaten für die Strassenoberfläche erhoben und gem. RVS 13.01.15 [40] sowie RVS 13.01.16 [41] einer Bewertung unterzogen. Diese Bewertung gilt jedoch ausschliesslich für die Autobahnen und Schnellstrassen, also für das Bundesstrassennetz, welches von der ASFINAG (Autobahnen- und Schnellstrassen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft) verwaltet und betrieben wird.

Tabelle 8: Zustandsmerkmale und Zustandsbewertung Bundesstrassen in Österreich nach [40, 41]

Tabelle 1: Zustandsklasseneinteilung der maßgebenden RoadSTAR-Messergebnisse (50 m-Werte) für Autobahnen und Schnellstraßen

Griffigkeit μ [-]				
	Zielwert		Warnwert	Schwellenwert
	0,75		0,45	0,38
Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5
$\mu > 0,75$	$0,75 \geq \mu > 0,59$	$0,59 \geq \mu > 0,45$	$0,45 \geq \mu > 0,38$	$\mu \leq 0,38$
Querebenheit (Spurrinntiefe t_s [mm])				
	Zielwert		Warnwert	Schwellenwert
	5,0		15,0	20,0
Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5
$0,0 \leq t_s < 5,0$	$5,0 \leq t_s < 10,0$	$10,0 \leq t_s < 15,0$	$15,0 \leq t_s < 20,0$	$t_s \geq 20,0$
Querebenheit (theor. Wassertiefe t_w [mm])				
	Zielwert		Warnwert	Schwellenwert
	1,0		4,0	6,0
Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5
$0,0 \leq t_w < 1,0$	$1,0 \leq t_w < 2,5$	$2,5 \leq t_w < 4,0$	$4,0 \leq t_w < 6,0$	$t_w \geq 6,0$
Längsebenheit IRI [m/km]				
Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5
$0,0 \leq \text{IRI} < 1,0$	$1,0 \leq \text{IRI} < 1,8$	$1,8 \leq \text{IRI} < 3,0$	$3,0 \leq \text{IRI} < 4,5$	$\text{IRI} \geq 4,5$
Textur MPD [mm]				
Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5
$\text{MPD} > 0,8$	$0,8 \geq \text{MPD} > 0,7$	$0,7 \geq \text{MPD} > 0,6$	$0,6 \geq \text{MPD} > 0,3$	$\text{MPD} \leq 0,3$

Zustandsgröße Oberflächenschäden für Asphalt- und Betondecken OS [%]				
Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5
sehr gut	gut	mittel	schlecht	sehr schlecht
$0,0 \leq \text{OS} < 5,7$	$5,7 \leq \text{OS} < 17,1$	$17,1 \leq \text{OS} < 28,6$	$28,6 \leq \text{OS} < 40,0$	$40,0 \leq \text{OS} \leq 100,0$
Normierungsfunktion				
$ZW_{OS} = 1,0 + 0,0875 \cdot ZG_{OS} \quad [1,0 \leq ZW_{OS} \leq 5,0]$				
Zustandsgröße Risse für Asphalt- und Betondecken RI [%]				
Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5
sehr gut	gut	mittel	schlecht	sehr schlecht
$0,0 \leq \text{RI} < 1,4$	$1,4 \leq \text{RI} < 4,3$	$4,3 \leq \text{RI} < 7,1$	$7,1 \leq \text{RI} < 10,0$	$10,0 \leq \text{RI} \leq 100,0$
Normierungsfunktion				
$ZW_{RI} = 1,0 + 0,35 \cdot ZG_{RI} \quad [1,0 \leq ZW_{RI} \leq 5,0]$				

Die massgebenden Zustandsmerkmale sind in diesem Zusammenhang:

- Spurrinnen (maximale Spurrinntiefe unter der 2m-Latte sowie maximale Wassertiefe)
- Längsebenheit (International Roughness Index, ab dem Jahr 2021 ist die Einführung des Bewerteten Längsprofils (BLP) im Netz der ASFINAG geplant)
- Griffigkeit (Reibungsbeiwert in Längsrichtung, gemessen mit dem modifiziertem Stuttgarter Reibungsmesser)
- Risse (Anteil geschädigte Fläche in Abhängigkeit von Schadensausmass und Schadensschwere für unterschiedliche Arten von Rissen)
- Oberflächenschäden (Anteil geschädigte Fläche in Abhängigkeit von Schadensausmass und Schadensschwere für unterschiedliche Arten von Oberflächenschäden, wie Ausmagerungen, Kornausbrüche, Bindemittelanreicherungen, etc.)

Neben den massgebenden, für das Pavement Management bewertungsrelevanten Zustandsmerkmalen werden auch die folgenden Indikatoren erhoben:

- Makrotextur
- Rollgeräuschpegel (aus Abnahmeprüfungen)

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die in Österreich erhobenen Zustandsmerkmale und deren Bewertung nach [40, 41]. Die Basislänge für die Bewertung bilden 50m-Strassenabschnitte.

Auf den Autobahnen und Schnellstrassen (Bundesstrassen) erfolgt die Erfassung in einem Intervall von vier Jahren auf allen Fahrstreifen sowie im Bereich von Anschlussstellen und Knoten auch auf den Rampenfahrbahnen. Neben der Darstellung des jeweils aktuellen Strassenzustandes sind diese Daten die massgebende Eingangsgrösse für die systematische Erhaltungsplanung im PMS der ASFINAG unter Heranziehung der Software dTIMS (Deighton Total Infrastructure Management System). Sämtliche Daten werden seit 1998 in diesem System historisch verwaltet und stehen entweder als 50-m-Zustandsabschnitte oder als homogene Zustandsabschnitte der ASFINAG zur Verfügung.

Weitere Datengruppen (Verkehrsdaten, Aufbaudaten, Einbauqualität)

Neben den zuvor beschriebenen Zustandsmerkmalen spielen vor allem bei der Ermittlung der Teilwerte (Gebrauchswert und Substanzwert) sowie bei der Anwendung der Prognosemodelle im PMS weitere Informationen eine wesentliche Rolle, die hier im Überblick aufgelistet sind:

- Aufbaudaten (Bauweise, Material und Alter der gebundenen Schichten des Oberbaus)
- Verkehrsdaten in Form der Schwerverkehrsbelastung (ausgedrückt über die zulässigen bzw. erforderlichen Normlastwechsel mit Bezug zur 10 t – Standardachslast)
- Klimadaten (Frostindex)

Die Qualität des Einbaus im Rahmen von Konformitäts- und Abnahmeprüfungen spielt bei der systematischen Anwendung der Zustandsbewertung sowie der Zustandsprognose bis dato keine Rolle. Es wurden jedoch im Rahmen des VIF-Forschungsprojektes PROMAT [42] die hierfür notwendigen Grundlagen definiert und im Detail beschrieben. Dabei hat es sich gezeigt, dass vor allem der Transfer der Daten in das Asset Management (koordinierter Datenfluss) derzeit das grösste Problem darstellt, da die Kennwerte aus Konformitäts- und Abnahmeprüfungen nicht systematisch in die Abteilungen, die für das Erhaltungsmanagement und für den Betrieb zuständig sind, übertragen werden.

Die Nordrhein-Westfälische Strassenbauverwaltung (Strassen.NRW) hat damit begonnen, ein eigenes internes Kontrollsystem (IKS-System) zu entwickeln, das eine georeferenzierte elektronische Ablage von Kontrollprüfungsergebnissen ermöglicht (vgl. [22]). Dies schafft die Grundlage für netzweite Untersuchungen zur erzielten Einbauqualität.

Um die Qualitätssicherung beim Bau und der Erhaltung der Strasseninfrastruktur zu verstärken, wurde in Deutschland zu Beginn 2020 ein Pilotprojekt des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) gestartet, das als Ziel die Digitalisierung von Prüfdaten im Strassenbau hat. Mit Hilfe einer Prüfdatenbank (EQUBAR) soll die Erzeugung und Weiterverarbeitung von Ergebnissen aus Kontrollprüfungen und Eignungsnachweisen auf Grundlage eines bundesweit standardisierten Datenformats erfolgen. Durch eine Erleichterung des Datenaustauschs soll die Nutzung und Weiterverarbeitung dieser Daten vorangetrieben werden.

3.6 Kapitelzusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Qualitätsanforderungen an den Strassenoberbau dargestellt. In der Schweiz bestehen hierbei Normen und Richtlinien, welche einerseits Anforderungen an die Fahrbahnoberfläche und andererseits an den Strassenoberbau für das verwendete Mischgut und die eingebauten Schichten im Rahmen eines Prüfplans definieren. Für die Anforderungen über die Lebensdauer sind zusätzlich für die Oberflächenmerkmale relevante Schwellenwerte definiert. Diese oberflächenbezogenen Zustandsmerkmale sind unabhängig von der vorhandenen Bewertung im Rahmen der ZEB des Erhaltungsmanagements.

Zusätzlich wurde die aktuelle Datenhaltung in der Schweiz betrachtet. Während Zustandsdaten bei den schweizerischen Strassenbetreibern überwiegend bereits in mehreren Kampagnen aus der Zustandserfassung und -bewertung ZEB im Strasseninformationssystem vorliegen, sind Aufbaudaten mehrheitlich unvollständig oder zum Teil nicht erfasst. Dieses Defizit ist erkannt und wird bereits in mehreren Bereichen bearbeitet.

Ein vorhandener Bruch in der Informationskette zeigt sich auch bei den projektbezogenen Daten der Kontrollprüfungen. Obwohl die für diese Prüfungen zuständigen Baulabore die Prüfungsergebnisse weitestgehend digital in standardisierter Form ablegen, fehlt eine Referenzierung auf das standardisierte Referenzsystem der vorhandenen Strasseninformationssysteme. Zusätzlich werden die Ergebnisse meist in Papierform weitergegeben oder existieren in digitaler Form nur als PDF-Scan bei den Strassenbetreibern. Eine datenbanktechnische Verknüpfung der netzweit vorhandenen Strassendaten im Erhaltungsmanagement mit den Daten aus Materialprüfungen ist nur mit erheblichem manuellem Aufwand möglich.

4 Prognosemodelle für Fahrbahnen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen zu deterministischen und probabilistischen Zustandsprognosemodellen für Fahrbahnen beschrieben. Der Stand der Technik dient als Basis für die Integration der Materialtechnologie in die Prognosemodelle.

Neben einer Verwendung von Zustandsdaten sollen weiterhin zusätzliche Materialkenngrößen auf Eignung für die Kalibrierung von bestehenden Modellen verwendet und ein Verfahren unter Berücksichtigung der Streuung der Eingangsgrößen (probabilistischer Ansatz der Kalibrierung) hierfür erarbeitet werden.

Es werden die mathematischen Grundlagen der Prognosemethoden aufgearbeitet, die Anforderungen an die Eingangsdaten (Datenqualität) definiert und das Vorgehen zur Implementierung von Materialuntersuchungen sowie der Kalibrierung im Detail aufgezeigt.

4.1 Grundlagen

4.1.1 Allgemeines

Die Lebenszyklusanalyse oder genauer gesagt die Lebenszykluskostenanalyse ist ein weltweit verbreitetes Verfahren zur Beurteilung von Erhaltungsaktivitäten technischer Einrichtungen. Die Auswahl einer optimalen Erhaltungsstrategie unter vorgegebenen Randbedingungen ist das oberste Ziel einer solchen Untersuchung, wobei als Randbedingungen entweder monetäre (budgetäre) Restriktionen oder Anforderungen an den Zustand definiert werden. Im Zusammenhang mit der Erhaltung des Strassenzustandes hat sich die Lebenszyklusanalyse (englisch: LCC-analysis) als geeignetes Verfahren zur Beurteilung der Erhaltungsnotwendigkeiten erwiesen. Sie liefert die Grundlage für eine effiziente und nachvollziehbare Erhaltungsplanung. Heute kann die Lebenszyklusanalyse als „Stand der Technik“ für die Planung von baulichen Erhaltungsmaßnahmen auf sensiblen Strassennetzen angesehen werden (vgl. [7, 10, 43])

Nach [10] ist die zeitabhängige Änderung des Strassenzustandes ein entscheidender Faktor bei der Beurteilung von Erhaltungsmaßnahmen und -strategien im Rahmen der Lebenszyklusanalyse. Das Ziel der Zustandsprognose des Strassenoberbaus besteht darin, jenen Zeitpunkt abzuschätzen, zu welchem ein zu definierender kritischer Zustand erreicht wird und daher Erhaltungsmaßnahmen notwendig werden. Leider ist die Strassenzustandsprognose – wie jede andere Prognose auch – von den zur Verfügung stehenden Eingangsinformationen signifikant abhängig. Dies bedeutet, dass die Genauigkeit der Aussage von der Qualität und Quantität dieser Eingangsdaten wesentlich beeinflusst wird. Darüber hinaus sind in vielen Fällen die Eingangsgrößen selbst zeitlich veränderliche Variablen, die entsprechend hochgerechnet oder prognostiziert werden müssen, sodass es sich hier um eine komplexe Fragestellung handelt, die über mathematische Modelle gelöst bzw. geschätzt werden kann.

Theoretisch kann nach [43] die zeitliche Änderung des Strassenzustandes als physikalisches Phänomen interpretiert werden, wobei auch chemische und thermische Einflüsse vorhanden sind und daher die Entwicklung beeinflussen. Der Grad der Schädigung einer Strasse kann mit dem Grad der Unordnung in einem System beschrieben werden. Die im Rahmen des „Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik“ definierte „Entropie“ drückt den Grad der Unordnung in einem System aus. Ein neu errichteter bzw. erneuerter Oberbau besitzt ein grösstmögliches Mass an Ordnung oder umgekehrt ausgedrückt, ein geringstmögliches Mass an Unordnung. Mit der Zeit nimmt die Unordnung – durch Beanspruchungen – zu, sodass die Unordnung nur dann reduziert werden kann, wenn Energie dem System – in unserem Fall z. B. eine Erhaltungsmaßnahme – zugeführt wird. D. h. die Entwicklung des Strassenzustandes ist vom Energiehaushalt abhängig, wobei auch Energiezufuhr zu einer Verschlechterung der Situation führen kann (z. B. Temperatur und Spurrinnen). Dies bedeutet, dass auch im Hinblick auf den Energiehaushalt zwischen positiv und negativ wirkender Energie unterschieden werden muss. Für einen Physiker ist diese Betrachtungsweise natürlich der

richtige Ansatz einer Zustandsprognose, für einen Bauingenieur führt dies jedoch zu einer nicht notwendigen „Verkomplizierung“ der Problematik. Es empfiehlt sich daher, den physikalischen Ansatz in einen generellen strassenbau- bzw. erhaltungstechnischen Ansatz umzuwandeln, wobei der Zustand einer Strasse nicht durch ein Einzelmerkmal repräsentiert wird, sondern durch die Gesamtheit der Eigenschaften des Strassenoberbaus.

4.1.2 Phasen der Zustandsveränderung

In der einschlägigen Literatur (z. B. [44]) wird die Änderung des Strassenzustandes in mehrere Phasen unterteilt, die durch bestimmte Eigenschaften gekennzeichnet sind. In Anlehnung an diese Vorgehensweise lässt sich auch für eine mitteleuropäische Strasse die Entwicklung des Strassenzustandes nach [43] in mehrere Phasen „generell“ definieren (siehe Abbildung 7):

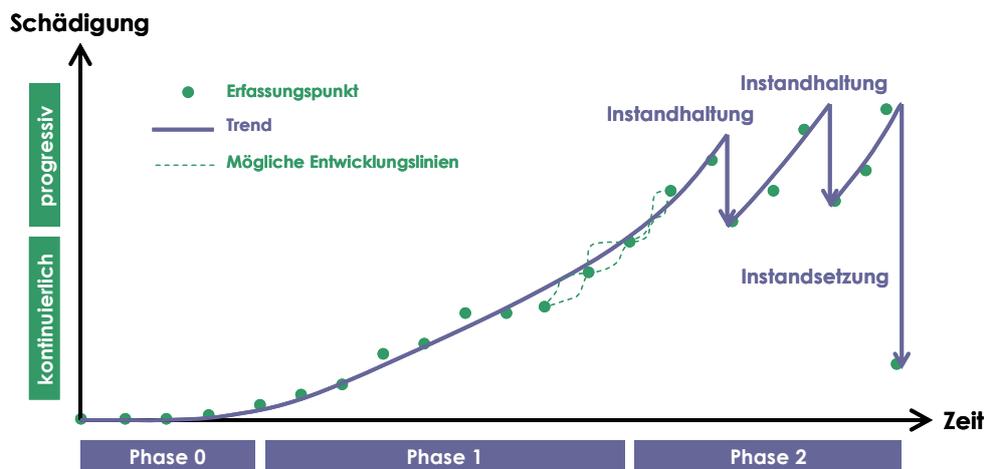


Abbildung 7: Generelle Betrachtung der Strassenzustandsentwicklung [43]

Die in Abbildung 7 schematisch dargestellten Phasen können nach [43] wie folgt beschrieben werden:

- Phase 0 – schadensfreie Phase**

Wie der Name schon besagt, können in dieser ersten Phase keine Schäden festgestellt werden bzw. die einzelnen Eigenschaften des Oberbaus befinden sich innerhalb der Bautoleranzen (z. B. festgelegt über Abnahmewerte). Das Ende der Phase ist dann erreicht, wenn eine bestimmte Eigenschaft der Strasse ausserhalb der Toleranz liegt bzw. ein Schaden festgestellt wurde.
- Phase 1 – kontinuierliche Schadensentwicklungsphase**

Die Zunahme der Schäden erfolgt über eine längere Phase (längere Trendbetrachtung) kontinuierlich, wobei die iterative Änderung des Grades der Schädigung (z. B. innerhalb eines Jahres oder zwischen zwei Messungen) deutlich variieren kann. Diese Variationen sind einerseits auf erste einfache Instandhaltungsmassnahmen zurückzuführen und andererseits auf die Streuungen in den Beanspruchungen. Das Ende der Phase ist dann erreicht, wenn die kontinuierliche Schadenszunahme in eine progressive Entwicklung übergeht. Die genaue Festlegung des Übergangzeitpunkts ist oft nicht möglich und drückt sich in vielen Fällen durch eine deutliche Zunahme von Instandhaltungsaktivitäten aus. Bei ausreichenden budgetären Mitteln wird in dieser Übergangsphase eine erste Instandsetzungsmassnahme vorgenommen. Bei nicht ausreichenden Geldmitteln erfolgt der Übergang in die Phase 2.
- Phase 2 – progressive Schadensentwicklungsphase (kritischer Zustand)**

Die Phase ist durch eine progressive Zunahme des Grades der Schädigung gekennzeichnet. Der Nutzer wird durch den schlechten Strassenzustand beeinträchtigt. Charakterisierend für diese Phase sind auch umfangreichere

Instandhaltungsmassnahmen, die den Zustand immer wieder aus dem kritischen Bereich führen. Dies kann jedoch in der Regel nur kurzfristig erreicht werden, sodass auch die progressive Schadensentwicklung nach der Instandhaltungsmassnahme wieder auftritt. Das Ende der Phase ist dann erreicht, wenn eine Instandsetzungsmassnahme den Strassenzustand aus dem kritischen, progressiven Bereich führt oder wenn die Strasse dem Nutzenden nicht mehr oder nur eingeschränkt zur Verfügung steht.

4.1.3 Möglichkeiten der Zustandsprognose

Mit Bezug zu die im vorigen Kapitel beschriebenen Phasen der Zustandsentwicklung müssen geeignete Methoden und Verfahren und damit verbundene Modelle ausgewählt werden, um die Entwicklung des Strassenzustandes auch mathematisch beschreiben zu können. Ein Vergleich der drei unterschiedlichen Phasen der Zustandsentwicklung zeigt, dass mit grösster Wahrscheinlichkeit kein einziges Modell sämtliche Eigenschaften abbilden kann. Es empfiehlt es sich daher, die Zustandsprognose auf der Grundlage einer Prognose der Zustandseinzelmerkmale vorzunehmen, was zu einer deutlichen Vereinfachung des Problems führt und wofür die entsprechenden Grundlagen zur Verfügung stehen. Die Erfahrungen aus der praktischen PMS-Anwendung haben gezeigt, dass die eingesetzten Verfahren und die damit verbundenen Modelle folgende Anforderungen nach [43] erfüllen sollten:

- Möglichst gute Annäherung an die tatsächlichen, im Rahmen von Messungen oder Erfassungen erhobenen Strassenzustände;
- Flächendeckende Verfügbarkeit der Eingangsdaten (erklärenden Variablen);
- Einfache Kalibrierung der Modelle an die örtlichen Gegebenheiten und Randbedingungen;
- Mathematische Modellierbarkeit;
- Nachvollziehbarkeit der Modellrechnungen und einfache Darstellung der Ergebnisse.

Unter Bezugnahme auf die aktuelle Literatur sowie einer Vielzahl von praktischen Anwendungen von Zustandsprognosemodellen in Pavement Management Systemen (kurz PMS) können Zustandsprognosemodelle in unterschiedliche Kategorien gruppiert werden. Nach [45] und [46] aber auch [10] ist in Abhängigkeit von der Entwicklung bzw. Herleitung des Modells folgende Kategorisierung möglich:

- **Mechanistische (analytische) Modelle** basieren auf der theoretischen Ermittlung der Primärwirkungen (Dehnungen und Spannungen) unter äusseren Einwirkungen (Lasten, Temperatur, etc.) und deren Anwendung auf – meist in Laborversuchen ermittelten – Verhaltensgesetze;
- **Empirische Modelle** hingegen basieren auf der Beobachtung des tatsächlichen Verhaltens der Strassenbefestigungen und versuchen einen kausalen Zusammenhang zwischen verschiedenen Einflussgrössen und der zeitlichen Veränderung des Strassenzustandes zu finden.

Aufgrund der Komplexität und der Vielzahl von notwendigen Eingangsgrössen ist die direkte Anwendung von mechanistischen/analytischen Prognosemodellen in einem PMS auf Netzebene aus heutiger Sicht zwar möglich, aber in vielen Fällen sehr komplex und mit einem hohen Aufwand für die Erhebung der Eingangsgrössen (erklärenden Variablen) verbunden. Sie können jedoch für die Beurteilung verschiedener Eingangsgrössen eine wesentliche Hilfestellung bieten und auch für Untersuchungen auf einzelnen Abschnitten auf Projektebene eine Lösung darstellen. Dies bedeutet jedoch, dass für die Abschätzung von Langzeiteffekten in erster Linie empirische Modelle in Frage kommen.

Empirische Strassenzustandsprognosemodelle können in Abhängigkeit vom gewählten statistischen Auswerteverfahren zusätzlich wie folgt unterschieden werden [46]:

- **Deterministische Modelle:** Diese versuchen die exakte Zustandsgrösse bzw. den exakten Zustandswert (abhängige Variable) in Abhängigkeit von gewissen Einflussgrössen (unabhängige bzw. erklärende Variablen) zu jedem zukünftigen Zeitpunkt vorauszusagen. Der funktionelle Zusammenhang zwischen den abhängigen und unabhängigen Variablen wird dabei auch häufig als „Verhaltensfunktion“ bezeichnet.
- **Probabilistische Modelle:** Diese sagen die Wahrscheinlichkeitsverteilung des zukünftigen Strassenzustandes voraus und nehmen somit auf Unsicherheiten und die Unschärfe von Daten Rücksicht;

Die nachfolgenden Kapitel geben einen Überblick über diese beiden Gruppen von Zustandsprognosemodellen.

4.2 Deterministische Prognosemodelle

Die mathematische Formulierung von deterministischen Zustandsprognosemodellen erfolgt über einen funktionalen Zusammenhang zwischen ein- oder mehr zeitabhängigen erklärenden (unabhängigen) Variablen (Einflussparameter) evtl. zeitunabhängigen (konstanten) unabhängigen Variablen (Einflussparametern) und der abhängigen Variablen in Form eines Technischen Zustandsparameters (Zustandsgrösse) oder eines normierten (dimensionslosen) Zustandsindizes (Zustandswert). Die nachfolgende mathematische Darstellung definiert diese grundlegende Definition für ein Zustandsmerkmal Z_i zum Zeitpunkt t :

$$Z_{i,t} = f(EP_{1,t}(t), \dots, EP_{n,t}(t), EP_1, \dots, EP_m)$$

mit $Z_{i,t}$ Zustandsmerkmal i zum Zeitpunkt t
 $EP_{n(t)}$ Einflussparameter EP_n zum Zeitpunkt t als Funktion der Zeit t
 EP_m Einflussparameter EP_m (konstante Grösse)

In vielen Fällen wird auch der Zustand des Zustandsmerkmals Z_i zum Zeitpunkt t über eine inkrementelle (z. B. jährliche) Veränderung der Eigenschaft Z_i definiert, sodass folgende mathematische Formulierung gewählt werden kann:

$$Z_{i,t} = f(Z_{i,t-1}, \Delta Z_{i,t})$$

$$\Delta Z_{i,t} = f(EP_{1,t}(t), \dots, EP_{n,t}(t), EP_1, \dots, EP_m)$$

mit $Z_{i,t}$ Zustandsmerkmal i zum Zeitpunkt t
 $Z_{i,t-1}$ Zustandsmerkmal i zum Zeitpunkt $t-1$
 $\Delta Z_{i,t}$ inkrementelle Änderung des Zustandsmerkmal i zum Zeitpunkt t (im Vergleich zum Zeitpunkt $t-1$)
 $EP_{n(t)}$ Einflussparameter EP_n zum Zeitpunkt t als Funktion der Zeit t
 EP_m Einflussparameter EP_m (konstante Grösse)

Die nachfolgende Liste gibt einige Hinweise zur Auswahl von unterschiedlichen zeitabhängiger und konstanter Einflussparametern für die Gestaltung von deterministischen Zustandsprognosemodellen

- Zeitabhängige Einflussparameter
 - Altersinformationen Oberbau (Alter Decke, Alter gebundener Oberbau, etc.)
 - Verkehrsbelastung (Schwerverkehr, Gesamtverkehr, Normlastwechsel jährlich oder kumuliert, etc.)
 - Klimadaten (Anzahl Frostwechsel kumuliert, Temperaturentwicklungen, etc.)
 - etc.

- Konstante Einflussparameter
 - Materialkennwerte
 - Klimadaten (Frostindex, Temperaturmittelwerte Winter und Sommer, Klimazone, etc.)
 - Bemessungsindex (Verhältnis zwischen zulässigen und vorhandenen Normlastwechsel zum Zeitpunkt der Dimensionierung)
 - Topographische Einflussparameter (z. B. Höhenlage)
 - etc.

4.2.1 Multivariate deterministische Zustandsprognosemodelle am Beispiel Österreich

Im Vergleich zu den derzeit in der Schweiz und in Deutschland zur Verfügung stehenden deterministischen Zustandsprognosemodelle zeichnen sich die in Österreich Ende der 1990er Jahre und Anfang der 2000er Jahre im Rahmen von Forschungsprojekten entwickelten Modelle dadurch aus, dass deterministische Verhaltensfunktionen mit einer grösseren Anzahl von erklärenden Variablen im Rahmen von nichtlinearen Regressionsanalysen für das österreichische PMS entwickelt wurden.

Die Entwicklung dieser multivariaten deterministischen Zustandsprognosemodelle erfolgte unter Heranziehung der erstmals in den 1990er Jahren systematisch erfassten Strassenzustands- und Oberbauinformationen im Rahmen des österreichischen Strassenforschungsprojektes „Statistische Methoden zur Auswertung von Strassenzustandsdaten“ [45], welches vom Institut für Strassenbau und Strassenerhaltung der TU Wien gemeinsam mit dem Institut für Statistik und Wahrscheinlichkeitstheorie der TU-Wien durchgeführt wurde. Diese Modelle wurden unter Heranziehung weiterer Zustandsdaten der bundesweiten Zustandserfassungen 1999 bis 2002 im Auftrag des BMVIT und der ASFINAG im Jahr 2002 nochmals aktualisiert und stellen somit die Basis für die Zustandsprognose im PMS dar.

Da es sich bei diesen Modellen ausschliesslich um Verhaltensfunktionen handelt, die auf empirischen Daten basieren, kann hier nach [43] von empirischen Zustandsprognosemodellen gesprochen werden, die in ihrer Formulierung die österreichische Situation (Art und Eigenschaft der erklärenden Variablen bzw. Eingangsparemeter) abbilden. Die Entwicklung der Modelle erfolgte auf der Basis eines semi-probabilistischen Ansatzes (Bayes-Verfahren), wobei die Modelle im PMS in Österreich (Bundes- und Landesstrassennetz) als deterministische Funktionen zur Anwendung gelangen. Das Ergebnis der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Österreich sind generelle Zustandsprognosemodelle, die natürlich eine entsprechende Kalibrierung für eine abschnittsbezogene Anwendung auf einzelne Strassenabschnitte erfordern.

Die Modelle nach [43] beinhalten auch Faktoren oder Vektoren für die abschnittsbezogene Kalibrierung. Das Ziel der abschnittsbezogenen Kalibrierung liegt in der Definition einer abschnittsbezogenen Verhaltensfunktion. Aus diesem Grund muss das deterministische Zustandsprognosemodell mit abschnittsbezogenen Informationen verknüpft werden. Dies geschieht einerseits durch die Eingabe der Werte der erklärenden Variablen und Modellparameter in das Modell und andererseits durch eine Anpassung des Verlaufs der Funktion unter Verwendung von auf diesem Abschnitt gemessenen evtl. gemittelten Zustandsgrössen.

Nach [46] kann die „Adjustierung“ der Verhaltensfunktion an die abschnittsbezogene Zustandsgrösse durch eine

- Änderung des Funktionsverlaufs mit Hilfe eines „Kalibrierfaktors KF_{ZG} “ (Änderung der Krümmung) oder durch eine
- Verschiebung der Verhaltensfunktion mit Hilfe eines „Kalibriervektors KV_{ZG} “

durchgeführt werden. Welche Methode verwendet wird, hängt von den zu beachtenden Randbedingungen des Zustandsmerkmals sowie von der Verhaltensfunktion selbst ab [43].

Das nachfolgende Beispiel zeigt die multivariate deterministische Verhaltensfunktion am Beispiel der Risse nach [43]. Die Verhaltensfunktion Risse wird über das Alter der Decke und den Verkehrsbelastungskoeffizienten definiert und setzt sich aus 2 Modellen zusammen, die die unterschiedlichen Phasen der Rissentwicklung charakterisieren. Das Modell kann der nachfolgenden Funktion bzw. Abbildung entnommen werden nach [43].

$$ZG_{RI,t} = K_{F_{RI}} \cdot \exp\left[-3,60517 + a \cdot \text{Alter}_{\text{Decke},t} + \ln(\text{Alter}_{\text{Decke},t} + 0,01) - 0,5 \cdot \ln\left(\text{VBI} \cdot \frac{n}{20} + 0,01\right)\right]$$

für $ZG_{RI,t} \leq 8$ und Bauweise = Asphalt

$$ZG_{RI,t} = K_{F_{RI}} \cdot \exp\left[-3,60517 + a \cdot \text{Alter}_{\text{Decke},t} + \ln(\text{Alter}_{\text{Decke},t} + 0,01) - 0,5 \cdot \ln(\text{VBI} + 0,01)\right]$$

für $ZG_{RI,t} \leq 8$ und Bauweise = Beton

$$ZG_{RI,t} = ZG_{RI,t-1} + \max\left(0; 2 - \frac{ZG_{RI,t-1}}{20}\right) \text{ für } ZG_{RI,t} > 8$$

- mit $ZG_{RI,t}$ Zustandsgrösse Risse zum Zeitpunkt t [%]
 $\text{Alter}_{\text{Decke},t}$ Alter der Decke zum Zeitpunkt t
 $K_{F_{Risse}}$ Kalibrierfaktor Risse
 VBI Verkehrsbelastungskoeffizient
 a Modellparameter
 n Bemessungsperiode des Oberbaus

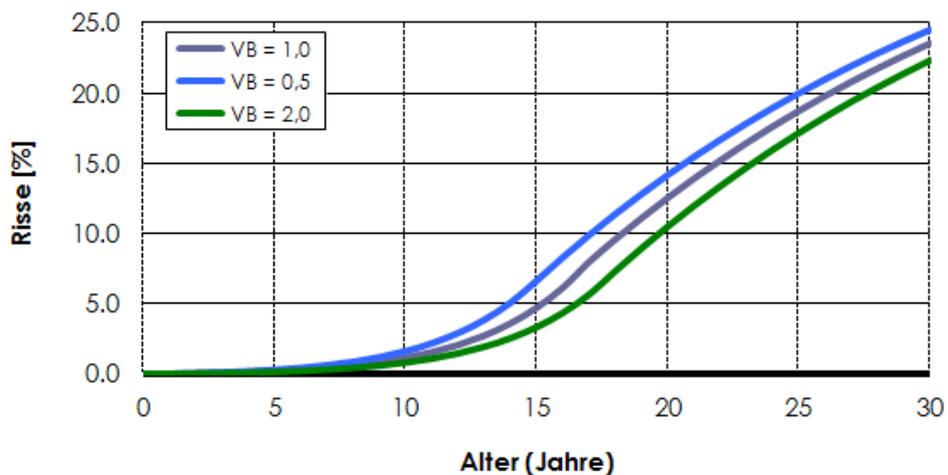


Abbildung 8: Verhaltensfunktion Risse Bautyp Asphalt Neubau (AS_N) mit AC deck [42]

4.2.2 Anwendung von deterministischen Zustandsprognosemodellen im PMS und Stufen der Kalibrierung

Wie bereits erwähnt, spielen deterministische Strassenzustandsprognosemodelle in einem Pavement Management System eine wesentliche Rolle. Auf der Grundlage der Prognosen der unterschiedlichen Einzelmerkmale sowie der darauf basierenden Teilwerte und ggf. eines Gesamtwertes können unterschiedlichen Lebenszyklusvarianten für einen bestimmten Strassenabschnitt untersucht und miteinander verglichen werden. Die daraus ableitbaren Erhaltungsmassnahmenstrategien liefern die Grundlage für die Auswahl einer optimalen Lösung, entweder vor dem Hintergrund von budgetären Restriktionen oder durch die Vorgabe eines zu erreichenden Strassenzustandes innerhalb der jeweiligen Betrachtungsperiode. Die Randbedingungen können natürlich über die Zeit variieren.

Die nachfolgende Abbildung 9 zeigt schematisch die Anwendung von deterministischen Verhaltensfunktionen (mit entsprechenden Streuungen) im Rahmen einer

Lebenszyklusbetrachtung für einen Strassenoberbau in Asphaltbauweise. Eine solche Lebenszyklusbetrachtung ermöglicht auch die Darstellung der Wirkungen der angesetzten Erhaltungsmaßnahmen und der nachfolgenden, verbesserten Zustandsverläufe.

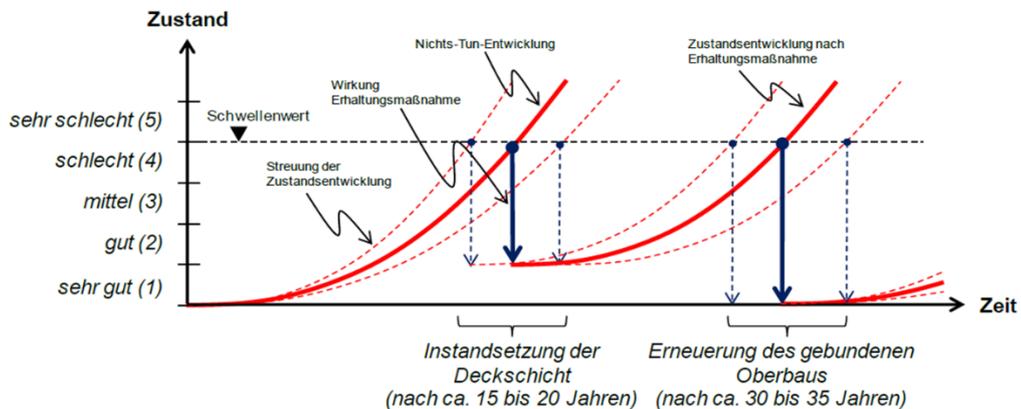


Abbildung 9: Schematische Darstellung eines Lebenszyklus für einen Strassenoberbau in Asphaltbauweise als Grundlage für das PMS in Österreich

Da jeder Strassenabschnitt seine eigenen „Gesetze“ aufweist, muss natürlich eine entsprechende Kalibrierung vorgenommen werden. Die Kalibrierung der empirischen deterministischen Strassenzustandsprognosemodelle ist eine schrittweise Prozedur, die in einzelne Teilschritte bzw. Stufen unterteilt werden kann (siehe hierzu auch [47]). Die in Österreich verwendete Prozedur lässt sich auf der Grundlage des Forschungsprojektes PROMAT dabei wie folgt beschreiben [42]:

- **Stufe 0 – Auswahl des deterministischen Zustandsprognosemodells**

Den Ausgangspunkt für die Kalibrierung stellt zunächst die Auswahl eines geeigneten Strassenzustandsprognosemodells dar. In den letzten Jahrzehnten wurde sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene eine Vielzahl von merkmalsbezogenen Verhaltensfunktionen auf der Grundlage empirischer Daten entwickelt. Da die Entwicklung dieser Modelle nicht das Thema des gegenständlichen Forschungsprojektes ist, werden an dieser Stelle nur die wichtigsten Punkte bei der Auswahl aufgelistet. Das gewählte Modell sollte dabei für die geplante Anwendung folgende Anforderungen erfüllen:

- die notwendigen Eingangsdaten sind vorhanden
- das Modell bezieht sich auf die erhobenen Zustandsmerkmale
- das Modell passt topografisch und klimatisch in den Anwendungsbereich
- das Modell bezieht sich auf Materialien, die im Anwendungsbereich verwendet werden
- das Modell bezieht sich auf aktuelle Oberbaukonstruktionen

Können diese Anforderungen erfüllt werden, ist die Auswahl des Prognosemodells abgeschlossen.

- **Stufe 1 – Abschnittsbezogene Kalibrierung**

Unter Heranziehung der örtlichen Informationen (Belastung, Materialart, etc.) sowie des aktuellen Zustandes wird das Modell an die örtlichen Anforderungen angepasst. Dies geschieht dabei durch

- die Eingabe der lokalen Eingangsdaten in das Modell und
- die Berechnung von möglichen Kalibrierfaktoren (-vektoren) zur Berücksichtigung des aktuellen Strassenzustandes (= Hineindreuen oder Verschieben der Verhaltensfunktion in die Punkte der Ergebnisse der abschnittsrelevanten Strassenzustandserfassung).

Handelt es sich um eine geplante Strasse bzw. Oberbaukonstruktion, für die noch keine Zustandsdaten vorhanden sind, können für die Kalibrierfaktoren (oder -vektoren) die Standardwerte oder statistische Grössen der Verteilung der Kalibrierwerte als erste Näherung herangezogen werden. Es empfiehlt sich daher, die Kalibrierwerte laufend einer Aktualisierung zu unterziehen.

Das Ergebnis dieser Kalibrierstufe ist die abschnittsbezogene, kalibrierte empirische deterministische Verhaltensfunktion, welche auch die Ausgangsstufe für die nächste Stufe der Kalibrierung darstellt, auf der Informationen aus detaillierten Materialuntersuchungen berücksichtigt werden können.

Beide Kalibrierstufen stellen derzeit den häufigsten Anwendungsfall für die Verwendung von deterministischen Zustandsprognosemodellen in einem PMS dar. In welchem Umfang bzw. unter Verwendung welcher Methode eine weiterführende Kalibrierung unter Heranziehung von detaillierten Untersuchungen der Materialeigenschaften erfolgt, hängt wesentlich vom Zustandsmerkmal sowie von Laborversuchen ab, die die zu beurteilenden Eigenschaften auch weiterführend beurteilen und bewerten können. Weder in der Schweiz noch in Deutschland gibt es hierfür technische Ansätze für eine praktische Implementierung. Im Rahmen des Forschungsprojektes PROMAT [42] wurden in Österreich die Methoden hierfür entwickelt, jedoch nur im Rahmen von einigen Anwendungsfällen praktisch getestet.

4.3 Probabilistische Prognosemodelle

4.3.1 Grundlagen

In Hinblick auf die Problematik einer schlechten Datenqualität der Eingangsdaten bzw. dem Umgang mit fehlenden Daten bieten deterministische Modelle bei Verwendung von Zustandsdaten, Klimadaten zu Temperatur und Niederschlag, Bauweise und Deckschichtart sowie der Altersstruktur oftmals keinen zufriedenstellenden Ansatz. Hierbei erweisen sich probabilistische Modelle als zielführender, da sie die naturgemässen Unsicherheiten der Eingangsparameter, die Unschärfen innerhalb der Modelle und statistische Streuungen abbilden [48, 49]. Probabilistische Modelle beziehen den Aspekt der Unsicherheit in die Prognose mit ein und ermöglichen eine differenziertere Betrachtung von Zustandsentwicklungen [50, 43, 51].

In der Schweiz werden probabilistische Modelle hauptsächlich für die Modellierung der Zustandsentwicklung von Brücken und deren Bauwerksteilen verwendet [52]. Die Anwendung dieser Modelle erfolgt seit Jahren erfolgreich in der MISTRA-Applikation KUBA [53]. Für die Kalibrierung der Modelle wird in [54] ein entwickelter Algorithmus beschrieben. Abgeleitet davon werden im Kanton Basel-Stadt seit Jahren erfolgreich Lebenszyklusanalysen für unterschiedliche Teilsysteme unter der Verwendung kalibrierter probabilistischer Modelle der Zustandsentwicklung unterschiedlicher Objekttypen, eingesetzt [55]. Unter anderen werden in [56] Entwicklungen im Bereich der Verwendung von probabilistischen Modellen aufgezeigt.

Dieses Kapitel gibt eine Übersicht zu probabilistischen Auswertemethoden, die für eine Modellierung der Zustandsentwicklung von Fahrbahnoberflächen in Betracht kommen. Das Ziel dieser Methoden ist die Beschreibung des Alterungsverhaltens von Objekten in Abhängigkeit von exogenen Einflussfaktoren mit Hilfe der Probabilistik. Bei den probabilistischen Modellen ist, neben der Anwendung der Survival-Analyse und den Bayes'schen Modellen, insbesondere die Abbildung eines Markov-Entscheidungsproblems (engl. Markov Decision Process MDP) der populärste Ansatz.

4.3.2 Survival Analyse

Die Methodik der Survival-Analyse stammt ursprünglich aus dem Bereich der industriellen Fertigung von Bauteilen und wurde später in der medizinischen Forschung angewendet. Ein wesentliches Merkmal besteht darin, dass die Überschreitung eines definierten Qualitätsniveaus einer Fahrbahnoberfläche als „Ausfall“ bezeichnet wird (vgl. [57]). Es

erfolgt hierbei eine Differenzierung, ob ein zu definierendes Qualitätsniveau innerhalb eines Zeitraumes überschritten wurde. Die grundlegende Anwendbarkeit dieser Methode auf Strassenzustandsdaten wurde durch [57] bestätigt.

Die Survival-Analyse basiert auf der Annahme, dass der Zeitpunkt des Ausfalls eines Objektes einer kontinuierlichen Verteilung folgt, die anhand der Statistik aller Objektausfälle berechnet wird. Für die Beschreibung der Verteilung der Ausfalldichte $f(t)$ wird zumeist eine Weibull-Verteilung verwendet. Demnach wird die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls mit zunehmender Liegezeit eines Objektes ansteigen. Die wichtigsten Eingangsparameter der Survival-Analyse sind:

- Zuverlässigkeitsfunktion («survival function»)
- kumulierte Ausfallwahrscheinlichkeit («probability of failure»)
- Ausfallrate («hazard function»)
- Ausfalldichte («failure density function»)
- Zeit

Mit Hilfe der Survival-Analyse kann die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls nach einer definierten Zeit t abgeschätzt werden. Man kann auch anders vorgehen, indem die Zeit bis eine im Voraus definierte «kritische» Wahrscheinlichkeit erreicht wird, als Ausfallzeitpunkt geschätzt abgeschätzt wird.

Die Form einer Weibull-Verteilung ist nur von der Zeit und Skalierungsparametern β und λ abhängig. Es können andere Verteilungen angewendet werden, aber die Weibull-Verteilung ist besonders gut, da die Verteilung nur für positive Werte der Zeit gilt und ist mit den Skalierungsparameter an vorhandenen Daten einfach kalibrierbar ist:

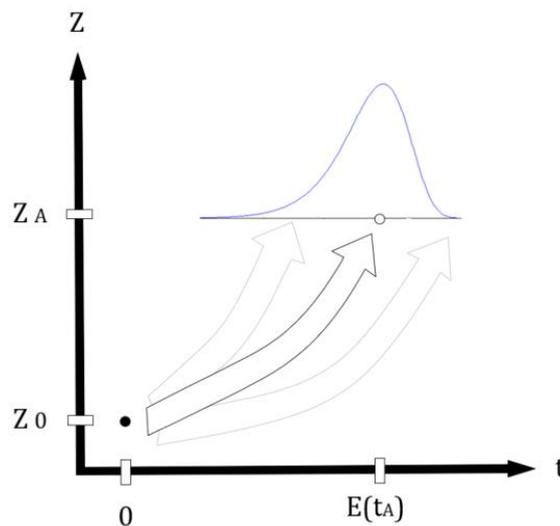


Abbildung 10: Survival Analyse

Um ein Modell zu entwickeln, benötigt man Zustandsdaten und entsprechende Liegezeiten von Strassenabschnitten. Zusätzliche Parameter können berücksichtigt werden, indem mehrere Modelle für verschiedenste diskrete Klassifizierungen erstellt werden. So kann ein Datensatz z. B. nach der vorhandenen Bauweise differenziert werden. D.h. die Ausfallverteilung für die Bauweise Asphalt kann andere Parameterwerte annehmen als die Ausfallverteilung für die Bauweise Beton. Diese Aufteilung kann weiter verfeinert werden, je nachdem welche Erkenntnisse aus Materialuntersuchungen vorliegen. Demnach kann ein bereits erstelltes Modell nur bedingt ergänzt werden. Mit einem

Zustandsentwicklungsmodell kann die Verteilung der Ausfälle schliesslich genutzt werden, um den Erhaltungsbedarf zu ermitteln und die langfristigen Kosten abzuschätzen.

4.3.3 Markov-Prozess

Als einer der bekanntesten wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansätze ist die Anwendung des Markov-Prozesses zu nennen, die sowohl in der Strassenerhaltung (vgl. [45, 43] als auch im Brückenmanagement (vgl. [58]) als geeignetes Mittel für zustandsbasierte Prognosen gesehen wird.

Markov-Prozesse stellen einen zeit-diskreten probabilistischen Prozess mit abzählbarem Zustandsraum dar, wenn für alle diskreten Zeitpunkte und alle diskreten Zustände die sogenannte Markov-Eigenschaft erfüllt ist. Diese beinhaltet die Annahme, dass der zukünftige Zustand eines Objektes nur vom aktuellen Zustand abhängig ist und die bisherige Zustandsentwicklung keinen Einfluss auf das zukünftige Zustandsverhalten hat. Anstelle einer kontinuierlichen Funktion werden beim Markov-Ansatz die Übergangswahrscheinlichkeiten in eine finite diskrete $n \times n$ Übergangsmatrix unterteilt. Hiermit kann die Zustandsentwicklung in Abhängigkeit des aktuellen Zustands geschätzt werden.

Je nach Methodik zur Konzipierung von Übergangsmatrizen kann zwischen verschiedenen Variationen des Markov-Prozesses differenziert werden [59]. Demnach lassen sich Markov-Prozesse nach homogenen, inhomogenen, Semi-Markov-Prozessen und Hidden Markov-Prozessen kategorisieren.

Homogener Markov-Ansatz

Bei homogenen Markov-Prozessen sind die Übergangswahrscheinlichkeiten konstant und unabhängig vom Zeitpunkt des Übergangs. Die damit verbundene Markov-Eigenschaft beinhaltet den wesentlichen Nachteil, dass sie keine Rücksicht auf die Historie eines Objekts nimmt.

Homogene Markov-Ketten lassen sich schnell über ein lineares Optimierungsverfahren simulieren. Durch die Chapman-Kolmogorov Gleichungen erhält man eine Steady-State-Lösung des Systems und kann somit den Erhaltungsbedarf eines Netzes über die Zeit ermitteln. Die nachfolgende Abbildung 11 zeigt die Diskretisierung der Zustände und Zeitpunkte zur Anwendung des Markov-Ansatzes.

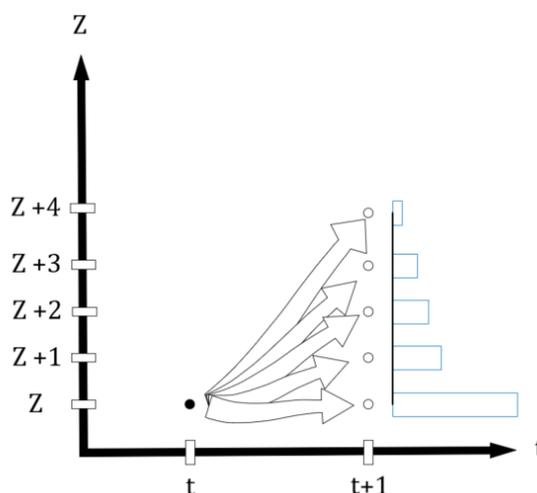


Abbildung 11: Diskretisierung von Zuständen und der Zeit beim Markov-Ansatz

Eine Ergänzung des Modelles mit weiteren Parametern ist, wie für die Survival-Analyse, beschränkt. Die Annahme der Homogenität der Zustandsschritte, der Zeitschritte und der

Objekte ist eine wichtige Annahme dieses Ansatzes. Zur Kalibrierung des Modells werden die Übergangswahrscheinlichkeiten innerhalb der Übergangsmatrix angepasst.

Im Bereich der probabilistischen Modelle wurde im deutschsprachigen Raum bereits in [60] der Markov'sche Ansatz zur Modellierung der Zustandsentwicklung von Fahrbahnen in Abhängigkeit verschiedener Bauklassen angewendet.

Zeit-inhomogener Markov-Ansatz (Semi-Markov)

Anstatt des diskret-diskret Markov'schen Ansatzes kann ein Markov'sches Modell mit diskreten Zuständen, jedoch mit einer kontinuierlichen Verteilung der Übergangszeit modelliert werden. Als erstes wird ausgehend vom aktuellen Zustand der nächste Zustand bestimmt. Der nächste Zustand kann dabei derselbe wie der aktuelle Zustand sein. Nun wird der Übergang von einem Zustand bis zum bestimmten nächsten Zustand eine Zeit dauern. Dafür erreicht man ein «realistischeres» Verhalten des Systems. Die dadurch höhere Komplexität der Lösungsberechnung, die nur numerisch möglich ist, führt zu langsamen Annäherungszeiten eines Semi-Markov'sches Modelles [61].

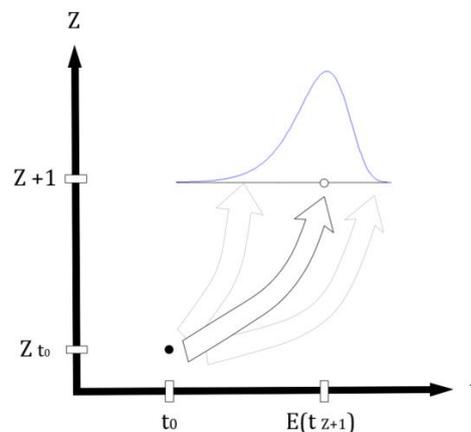


Abbildung 12: Zeitinhomogenität im Markov-Modell

Eine zeitabhängige Zustandsentwicklungsmatrix wurde im Rahmen der Arbeit von [62] exemplarisch entwickelt. Da die Lösung von inhomogenen Markov-Modellen nicht einfach berechenbar ist und die Kosten nicht konsistent geschätzt werden können (vgl. [61, 62]), wird das homogene Markov-Modell vorwiegend in der Praxis bevorzugt.

4.3.4 Bayes'scher Ansatz

Die Bayes'sche Statistik gründet auf dem Bayes'schen Theorem zur Berechnung von bedingten Wahrscheinlichkeiten von unbekanntem Ereignissen B oder einer Hypothese A . Es beschreibt den Zusammenhang zwischen zwei bedingten Ereignismengen B und A (vgl. [63]) und lässt sich anhand folgender Formel beschreiben als:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)}$$

- mit $p(A|B)$ a posteriori Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Ereignisses A unter der Bedingung, dass B eingetreten ist
- $p(A)$ a priori Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für das Eintreten des Ereignisses A
- $p(B|A)$ Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Ereignisses B unter der Bedingung, dass A eingetreten ist
- $p(B)$ a priori Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für das Eintreten des Ereignisses B

Abhängigkeiten innerhalb eines komplexen Systems unter Unsicherheit können mit Hilfe von Bayes'schen Netzen sehr gut abgebildet werden. Bayes'sche Netze zählen daher zu den wichtigsten probabilistischen Ansätzen innerhalb des Forschungsbereichs künstlicher Intelligenz und bilden die wesentlichen Modelltypen von grafischen Modellen. Je nach Anwendungsfall können Bayes'sche Netze sowohl zur Glättung von Zeitreihen, zur Filterung von aktuellen Daten als auch zur Prognose verwendet werden. Das Grundprinzip dynamischer Bayes'scher Netze beruht auf der Kombination zwischen einem inneren nicht direkt beobachtbaren Systemverhalten und der Berücksichtigung von Beobachtungen des Systems zu diskreten Zeitpunkten [51].

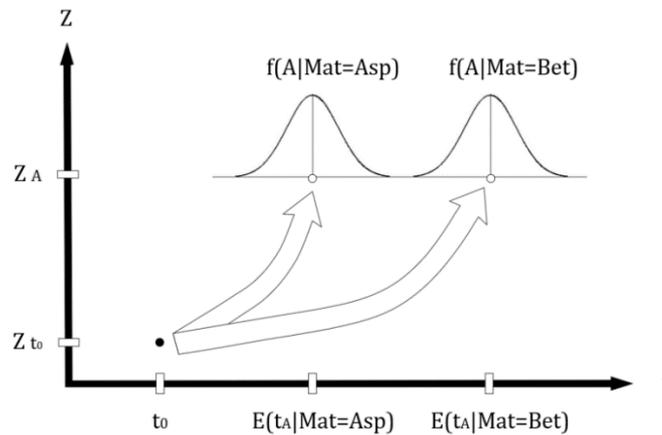


Abbildung 13: Bayes'scher Ansatz

Zu den bekanntesten Varianten dynamischer Bayes'scher Netze zählen Hidden Markov Modelle (HMM) und das Kalman-Filter (KF). Die Grundlagen des Kalman-Filters werden im Folgenden erläutert.

Kalman-Filter

Das Kalman-Filter (KF) ist ein statistisches Verfahren, welches die vergangenen, aktuellen und zukünftigen Zustandsausprägungen eines Systems anhand von Beobachtungen und eines angenommenen Systemverhaltens abschätzen kann (vgl. [64]).

Das KF basiert im Wesentlichen auf zwei Berechnungsschritten. Der erste Berechnungsschritt beinhaltet die Prognose des zukünftigen Systemzustandes vom aktuellen in den nächsten Zeitschritt (Systemgleichung). Die Systemgleichung beschreibt die Änderung eines Zustandes zwischen zwei Messzeitpunkten [51].

Der aktuelle Zustand x_t eines Systems ergibt sich in Abhängigkeit des vorherigen Zustandes x_{t-1} , einer Transitionsmatrix T und äusseren Fehlereinflüssen w_t .

Formel 1: Systemgleichung

$$x_t = Tx_{t-1} + w_t$$

mit x_t	Systemzustand zum aktuellen Zeitpunkt t
T	Transitionsmatrix
x_{t-1}	Systemzustand zum vorherigen Zeitpunkt t – 1
w_t	Prozessrauschen zum aktuellen Zeitpunkt t

Der Transfer zwischen der nicht direkt beobachtbaren Variablen und dem Messergebnis wird als Sensormodell bezeichnet. Während des zweiten Berechnungsschrittes erfolgt der Abgleich des prognostizierten Zustandes mit dem Messergebnis zum aktuellen Zeitpunkt

(Messgleichung). Die zugehörige Messgleichung beschreibt den Zusammenhang zwischen der Beobachtung m_t und des wahren Systemzustandes x_t :

Formel 2: Messgleichung

$$m_t = Cx_t + v_t$$

mit m_t	Messergebnis zum aktuellen Zeitpunkt t
x_t	Systemzustand zum aktuellen Zeitpunkt t
C	Messmatrix
v_t	Messrauschen

Nach einer Überprüfung der Übereinstimmung zwischen Prädiktion (Systemgleichung) und Beobachtung (Messgleichung) wird die optimale Schätzung für den aktuellen Zustand mit Hilfe einer Verstärkungsmatrix (Kalman-Gain) berechnet. Die System- und Messgleichungen können sowohl anhand von stetigen als auch anhand von numerisch beschriebenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen modelliert werden.

Erste exemplarische Anwendungen des Bayes'schen Ansatzes auf Strassenzustandsdaten erfolgten in Untersuchungen an Versuchsstrecken in Kanada [65], Texas [66] und Deutschland [51] sowie zur Rückrechnung von Verformungsmoduln aus Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling-Weight-Deflectometer [67].

4.4 Vor- und Nachteile der Prognoseverfahren

Unabhängig von der gewählten Methode ist das Ziel einer Modellierung eine realitätsnahe Abbildung der «Wirklichkeit». Das gegenständliche Kapitel soll einen Überblick über die aus der praktischen Erfahrung gesammelten Vor- und Nachteile sowie die damit verbundenen Schwächen und Stärken zum Erreichen dieses Ziels geben.

Sowohl in den DACH-Ländern als auch weltweit zählen deterministische Verfahren zu den verbreitetsten Ansätzen zur Zustandsprognose innerhalb von Pavement Management Systemen. Zu den Vorteilen dieser Methode zählen sowohl die einfache Handhabbarkeit als auch ihre einfache Verständlichkeit. Aufgrund ihrer mathematisch geringen Komplexität und deren regelmässiger Kalibrierung, besteht mittlerweile ein grosser Erfahrungshintergrund bzgl. der praktischen Anwendung solcher Modelle. Dies spiegelt sich zu dem in der Aufnahme dieser Methodik in die nationalen Regelwerke wider.

Zu den wesentlichen Nachteilen der deterministischen Modelle ist jedoch zu zählen, dass sie nur eine unvollständige Abbildung von Streuungen und damit Unsicherheiten in der Zustandsprognose ermöglichen. Der Einfluss einzelner Ursachen auf die Entwicklung und das Ausmass der Streuungen in der Zustandsprognose sind daher nur mit Hilfe eines probabilistischen Ansatzes möglich. So kann beispielsweise der Einfluss der Qualität von Strassenzustandsdaten (z. B. Messfehler und -toleranzen) auf die Genauigkeit der Zustandsprognose mit probabilistischen Methoden abgebildet werden. Dies ermöglicht die Grundlage für eine zukünftige risikobasierte Entscheidungsfindung innerhalb des Erhaltungsmanagements. Für die Erstellung von probabilistischen Modellen wird in der Regel eine deutlich grössere Datenbasis benötigt, da neben der mittleren Zustandsentwicklung auch die vorhandenen Streuungen mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen ermittelt werden.

Die in den vergangenen Jahren erzielten Fortschritte in der maschinellen Datenverarbeitung ermöglichen mittlerweile eine effektive Umsetzung rechenintensiver probabilistischer Prognosemodelle mit kurzen Rechenzeiten. Die praktische Anwendung dieser Modelle setzt bei den Anwendern jedoch ein grösseres mathematisches Grundverständnis voraus, um die (Zwischen-) Ergebnisse bewerten zu können und diese in ihren Entscheidungsprozess mit einzubeziehen.

Die nachfolgende Tabelle 9 fasst die skizzierten Vor- und Nachteile der beiden methodischen Ansätze zusammen.

Tabelle 9: Vor- und Nachteile deterministischer und probabilistischer Prognosemethoden

Eigenschaft	deterministisch	probabilistisch
Abbildung von Unsicherheiten	–	+
Berücksichtigung von Messfehlern	–	+
Einfache Handhabbarkeit	+	0
Einfache Verständlichkeit	+	0
Aufwand der Modellierung	+	0
Erfahrungshintergrund	+	0
Mathematische Komplexität	+	–
Regelwerk vorhanden	+	–
Risikobasierte Entscheidungsfindung	–	+

Legende: + gut / trifft zu 0 mittel – schlecht / trifft nicht zu

4.5 Kapitelzusammenfassung

In diesem Kapitel wurde eine Übersicht zu möglichen Prognosemethoden gegeben, die für eine Abschätzung der Zustandsentwicklung von Fahrbahnen im Einsatz sind oder zukünftig in Frage kommen. Dazu wurden zunächst die charakteristischen Phasen der Zustandsveränderung einer Strasse sowie die mathematischen Grundlagen zu deterministischen und probabilistischen Prognosemodellen aufgezeigt. Damit einhergehend wurden die jeweiligen Anforderungen an die Eingangsdaten erläutert. Weiterhin erfolgte die Darstellung von einigen Anwendungsbeispielen in Hinblick auf die Möglichkeiten zur Integration von Materialparametern in die Modellansätze und Verfahren zu deren Kalibrierung. Das Kapitel schliesst mit einer Gegenüberstellung von deterministischen und probabilistischen Prognosemethoden.

5 Datengrundlage

5.1 Allgemeines

In diesem Kapitel wird die empirische Datengrundlage vorgestellt, die für die Entwicklung und Validierung der in dieser Untersuchung enthaltenen deterministischen und probabilistischen Prognosemodelle verwendet wird. Die Datengrundlage umfasst Zustands-, Verkehrs- und Aufbaudaten sowie Informationen, die im Rahmen von Materialuntersuchungen von Versuchsstrecken in Thüringen (Deutschland) und im Kanton Aargau (Schweiz) erhoben wurden.

Dank der finanziellen Unterstützung der Abteilung Tiefbau des Departement Bau, Verkehr und Umwelt im Kanton Aargau konnten in einem Abschnitt der Versuchsstrecke Staffeleggstrasse erneut umfassende Bohrkernentnahmen durchgeführt werden. Zusätzlich wurden die Zustands- und Verkehrsdaten zur Verfügung gestellt. Für die Zurverfügungstellung der Zustandsdaten der L3080 (Versuchsstrecke in Thüringen) soll hier ausdrücklich auch dem Thüringer Landesamt für Bau und Verkehr gedankt werden.

5.2 Versuchsstrecke Thüringen

Die Probestrecke in Thüringen war in den vergangenen Jahren bereits Teil verschiedener Forschungsprojekte [11, 27, 42, 68]. Es handelt sich dabei um die südlich vom Harz liegende Landesstrasse L3080 zwischen Nordhausen und Sangerhausen (vgl. Abbildung 14).

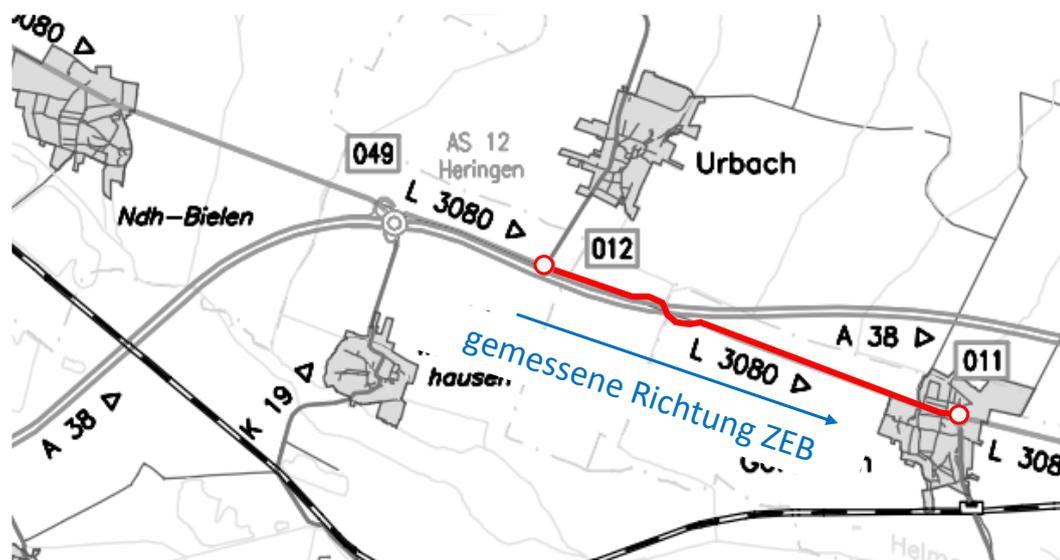


Abbildung 14: Lageplan des Streckenabschnittes der Landesstrasse L3080

Während des Asphalteinbaus im Jahr 1999 wurde das Bitumen der Deckschicht und der Binderschicht gezielt variiert (Abbildung 16, links).

5.2.1 Aufbaudaten

Aufgrund der Strassenkategorie und den Untersuchungen im Rahmen vorangegangener Forschungsprojekte ist davon auszugehen, dass der Schichtenaufbau dem der Bauklasse II nach RStO entspricht [11]. Über den Unterbau und die Tragschicht sind keine Informationen bekannt. Die Asphaltbinderschicht entspricht einem Asphaltbeton AC 0/22 S mit einer Schichtdicke von 8 cm. Darüber liegt eine 4 cm dicke Deckschicht aus Splittmastixasphalt SMA 0/11 S.

5.2.2 Materialkennwerte

Aus der Probestrecke werden im Rahmen des Projekts *mapFALKE* zwei Deckschicht-Varianten, jeweils ein SMA 11 S mit einem 45/80-50 A gemäss Abbildung 16 (links), berücksichtigt. Die relevanten Angaben der Eignungsprüfung sind nachfolgend aufgeführt:

- Gesamtbindemittelgehalt: 6,5 M.-%
- Mineralstoffart: Grauwacke, Dolomitsteinmehl
- Art der stabilisierenden Zusätze: Faserstoffe
- Brechsand-Natursand-Verhältnis: 1:0
- Rohdichte der Mineralstoffe: 2,706 g/cm³
- Rohdichte: 2,454 g/cm³

Die Korngrössenverteilung ist in Abbildung 15 neben den aktuell gültigen Grenzwerten für einen SMA 11 S nach TL Asphalt-StB dargestellt.

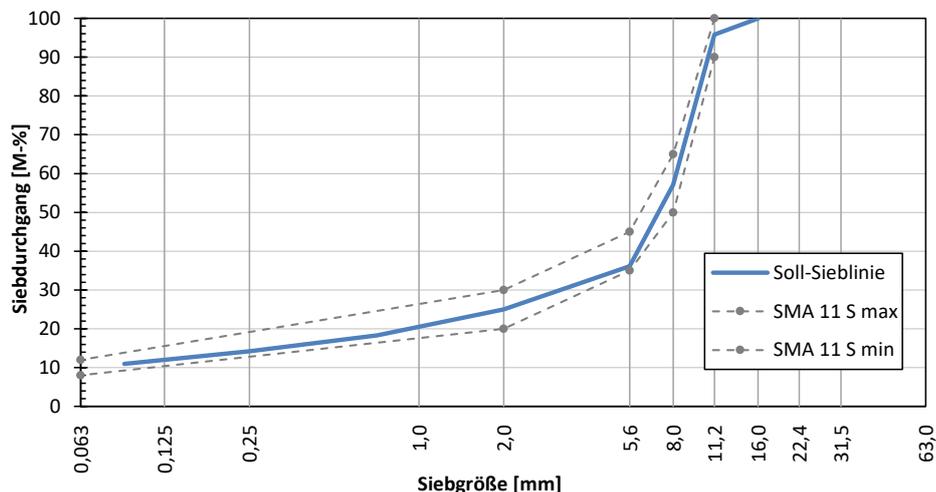


Abbildung 15: Sieblinie des SMA 11 S.

Im Rahmen der zuvor erwähnten Forschungsprojekte [11, 27, 42, 68] wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten vor, während und nach dem Einbau sowie nach gewisser Nutzungsdauer die Eigenschaften der Bindemittelvarianten untersucht. Die beiden hier berücksichtigten Bindemittel werden im weiteren Verlauf als Variante O (45/80-50 A von Hersteller Shell, Fahrtrichtung Nordhausen von Kilometer 12/1+137 bis 12/2+424) und als Variante P (45/80-50 A von Hersteller BP, Fahrtrichtung Sangerhausen von Kilometer 12/2+560 bis 12/2+698) bezeichnet.

Die verwendeten Bindemittel wurden im Rahmen der vorangegangenen Forschungsprojekte eingehend untersucht. Der Erweichungspunkt der beiden Bindemittel wurde 1999 sowohl im Anlieferungszustand als auch nach Einbau und Verdichtung bestimmt. Zusätzlich wurde der Kennwert 2007 nach ca. 8 Jahren, 2016 nach ca. 17 Jahren und 2018 nach ca. 19 Jahren Liegedauer bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10: Erweichungspunkt Probestrecke Thüringen

Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]					
Materialvariante	Im Anlieferungszustand	Nach Einbau und Verdichtung	Nach 8 Jahren Liegedauer	Nach 17 Jahren Liegedauer	Nach 19 Jahren Liegedauer
Variante O	51,0	60,5	64,1	62,9	66,0
Variante P	52,0	56,5	72,3	66,9	57,4

Die Nadelpenetration der beiden Bindemittel wurde 1999 sowohl im Anlieferungszustand als auch nach Einbau und Verdichtung bestimmt. Zusätzlich wurde der Kennwert 2007 nach ca. 8 Jahren und 2018 nach ca. 19 Jahren Liegedauer bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11: Nadelpenetration Probestrecke Thüringen

Nadelpenetration [1/10 mm]				
Materialvariante	Im Anlieferungszustand	Nach Einbau und Verdichtung	Nach 8 Jahren Liegedauer	Nach 19 Jahren Liegedauer
Variante O	67	46	33	27,7
Variante P	72	57	24	-

Der Brechpunkt nach Fraass der beiden Bindemittel wurde 1999 sowohl im Anlieferungszustand als auch nach Einbau und Verdichtung bestimmt. Zusätzlich wurde der Kennwert 2007 nach ca. 8 Jahren Liegedauer bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: Brechpunkt nach Fraass Probestrecke Thüringen

Brechpunkt nach Fraass [°C]			
Materialvariante	Im Anlieferungszustand	Nach Einbau und Verdichtung	Nach 8 Jahren Liegedauer
Variante O	-16	-16	-11,1
Variante P	-19	-19	-9,1

Im Jahr 2007 wurde nach ca. 8 Jahren Liegedauer der Hohlraumgehalt bestimmt, er ist in Tabelle 13 zusammengefasst.

Tabelle 13: Hohlraumgehalt Probestrecke Thüringen

Hohlraumgehalt [M.-%]		
Materialvariante	Zwischen den Fahrspuren	In der rechten Fahrspur
Variante O	1,43	1,03
Variante P	5,13	3,88

Im Jahr 2007 wurde nach ca. 8 Jahren Liegedauer der Schichtenverbund nach Leutner durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 zusammengefasst.

Tabelle 14: Schichtenverbund Probestrecke Thüringen

Schichtenverbund nach Leutner [kN]		
Materialvariante	Zwischen den Rollspuren	In der rechten Rollspur
Variante O	31,21	35,67
Variante P	33,91	45,41

Aus den vorgestellten Untersuchungen standen verschiedene Rückstellproben zur Verfügung, welche im Projekt *mapFALKE* herangezogen wurden. Unter anderem standen Rückstellproben der Frischbitumen (jeweils ca. 4 kg) und des Bitumens nach Einbau und Verdichtung (jeweils ca. 30 g) aus dem Jahr 1999 zur Verfügung.

Um den aktuellen Zustand der Materialeigenschaften zu erfassen, wurden im Jahr 2018 jeweils 30 Bohrkernproben (Ø150 mm) der beiden ausgewählten Varianten (als Variante O und Variante P bezeichnet) gezogen. Aufgrund der beschränkten Ausdehnung der jeweiligen Probefelder wurden die Bohrkernproben in 5er-Clustern in einem Abstand von ca. 100 m für Variante O und ca. 20 m für Variante P gezogen. Eine detaillierte Darstellung der Bohrkernentnahme ist in Abbildung 16, rechts dargestellt. Die Bohrkernproben wurden von BK1 bis BK70 durchnummeriert (10 zusätzliche Bohrkernproben wurden für ein anderes Projekt entnommen).

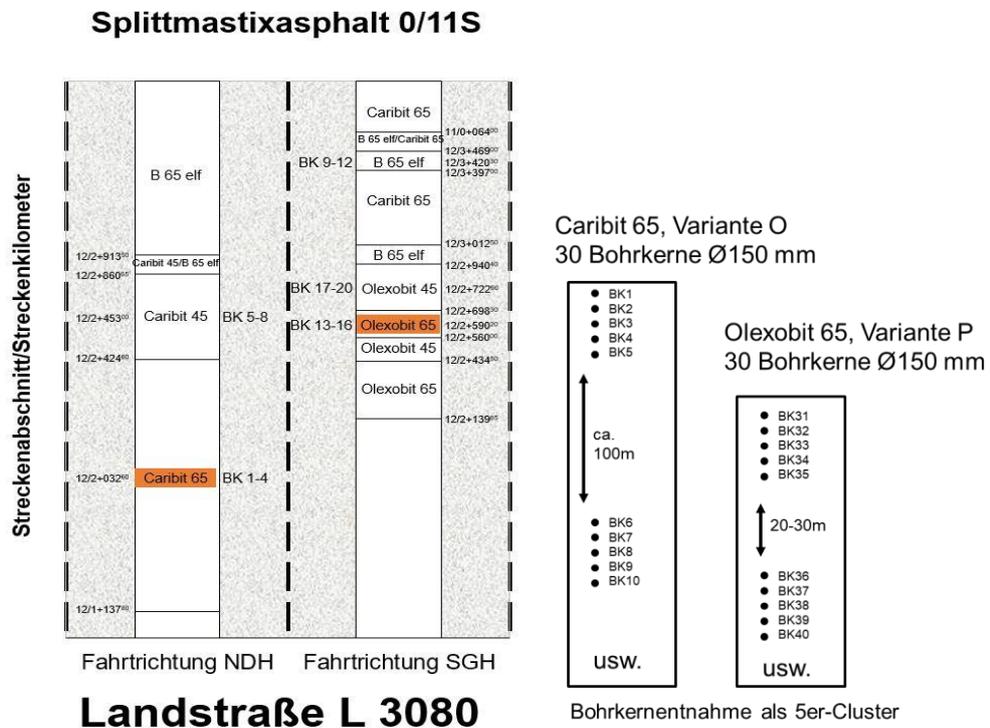


Abbildung 16: Übersicht der Probestrecke L 3080 mit Markierung der für das Projekt *mapFALKE* verwendeten Materialvarianten (links) und detaillierte Darstellung der Bohrkernentnahme im Jahr 2018 (rechts).

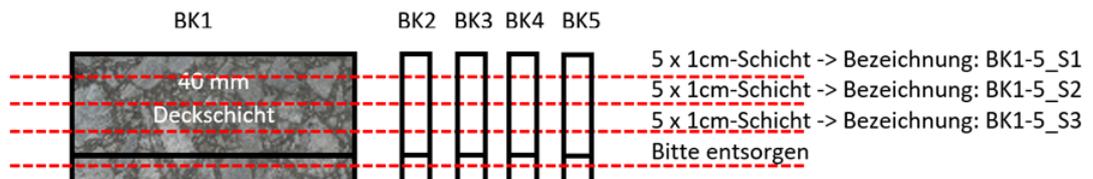


Abbildung 17: Aufteilung der Bohrkernproben in einzelne Schichten.

Die Deckschichten der Bohrkernproben wurden in 1cm starke Schichten geschnitten, getrennt nach den Schichten am ISBS extrahiert und als 5-er Gruppen zusammengefasst.

Abbildung 17 zeigt das beschriebene Vorgehen für die Bohrkern 1 bis 5, bei denen die oberste Schicht als BK1-5_S1 zusammengefasst wird. Dieses Trennschema wurde für alle 60 Bohrkern angewendet, sodass am Ende jeweils 12 Bitumenproben aus jeder der drei getrennten Schichten für die weitere Untersuchung zur Verfügung standen.



Abbildung 18: Probestrecke L3080 am Tag der Bohrkernentnahme von Variante P im Jahr 2018, die 5er-Cluster sind deutlich zu erkennen.

5.2.3 Verkehrsdaten

Zur vorhandenen Verkehrsbelastung der Versuchsstrecke liegen Daten aus den Strassenverkehrszählungen 1999, 2005, 2010 und 2015 vor. Während in den ersten zehn Jahren der Nutzungsdauer eine Verkehrsbelastung von etwa 12.000 Fz/24h vorlag, sank die durchschnittliche Anzahl an Fahrzeugen pro Tag aufgrund der Umwidmung von einer Bundes- zu einer Landesstrasse auf ca. 3.500 Fz/24h (vgl. Abbildung 19).

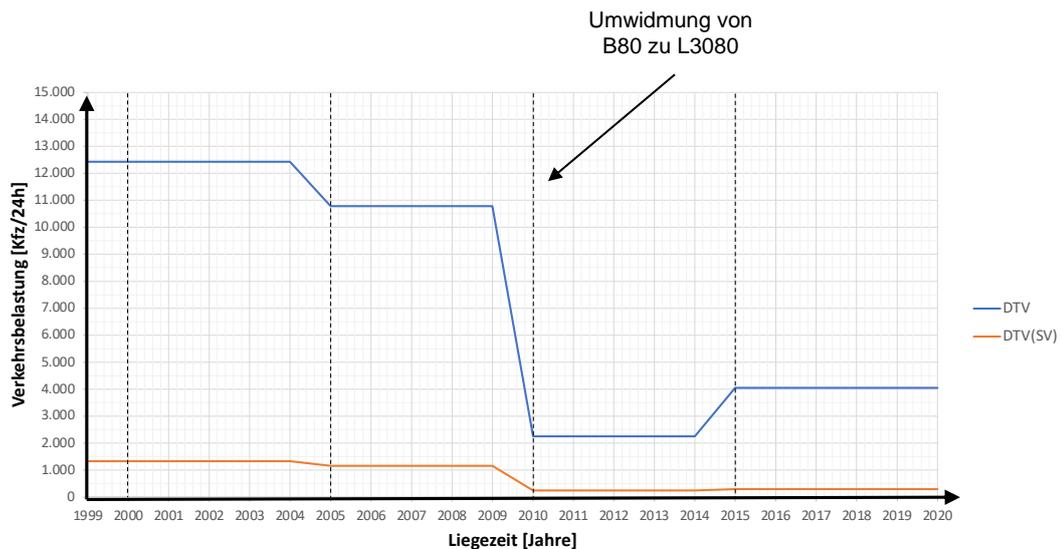


Abbildung 19: Entwicklung der Verkehrsbelastung vor und nach Umwidmung des Streckenabschnittes

5.2.4 Zustandsdaten

Der Oberflächenzustand der Thüringer Versuchsstrecke wurde in den Jahren 2008, 2012, 2016 und 2019 im Rahmen von Zustandserfassungen und -bewertungen aufgenommen. Im Folgenden sind die zeitlichen Entwicklungen der Oberflächenmerkmale am Beispiel der Längs- und Querebenheit sowie dem Rissbild dargestellt.

Längsebenheit

In Bezug auf die Längsebenheit ist zwischen den Jahren 2012 und 2019 eine leichte Verschlechterung aus den Zustandsdaten zu erkennen. Auffallend ist jedoch, dass im Jahre 2008 eine zu Beginn und am Ende des Streckenabschnittes geringere Längsebenheit im Vergleich zu den darauffolgenden Messkampagnen zu beobachten war (vgl. Abbildung 20).

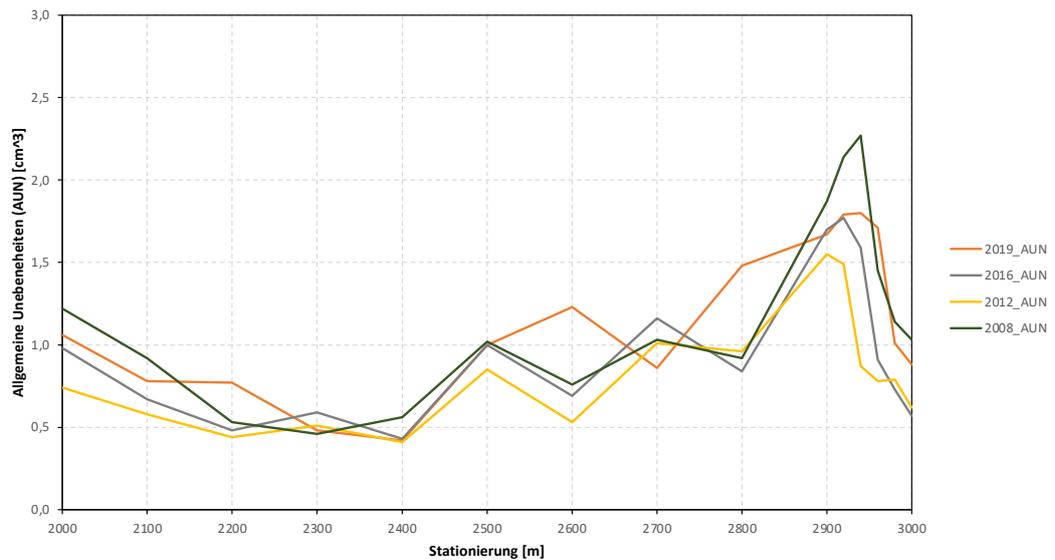


Abbildung 20: Zeitlicher Verlauf der Längsebenheit im Verlauf des Streckenabschnittes

Querebenheit

Die Auswertung der Daten zur Querebenheit zeigt, dass im Laufe der Zeit eine Verschlechterung zu beobachten ist. Ähnlich wie bei der Längsebenheit fällt jedoch eine Messkampagne heraus, die dem erwarteten Verlauf einer Zustandsverschlechterung nicht entspricht. Im Vergleich zu den restlichen Messkampagnen wurden im Jahre 2016 fast über den gesamten Streckenabschnitt um etwa 1,0 mm grössere Spurrinntiefen gemessen (vgl. Abbildung 21).

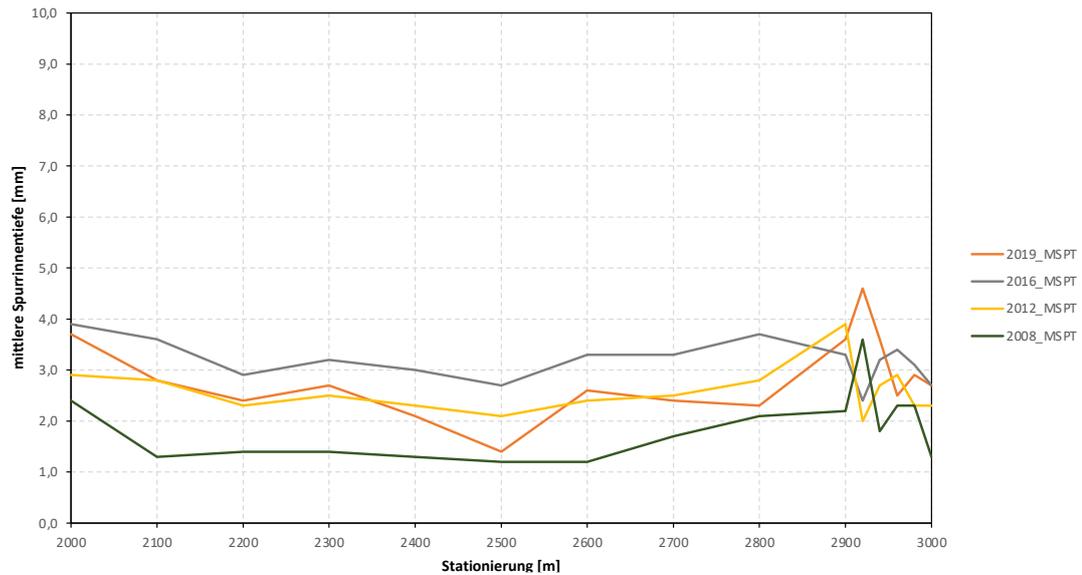


Abbildung 21: Zeitlicher Verlauf der Querebenheit im Verlauf des Streckenabschnittes

Risse

Auch bei der Auswertung des Rissbildes anhand der vier Messkampagnen 2008 bis 2019 ist eine tendenzielle Verschlechterung des Oberflächenschadens zu erkennen. Im vorderen Streckenbereich (Stationierung 2+000 bis 2+200) ist eine gleichmässige Ausbreitung des Anteils an von Rissen betroffenen Flächen aus den Daten zu beobachten. In der zweiten Hälfte des Streckenabschnittes hingegen wurde das Ausmass der Schädigung zwischen Erfassungskampagnen unterschiedlich beurteilt, sodass es hier zum Teil zu gemessenen Zustandsverbesserungen kommt (vgl. Abbildung 22).

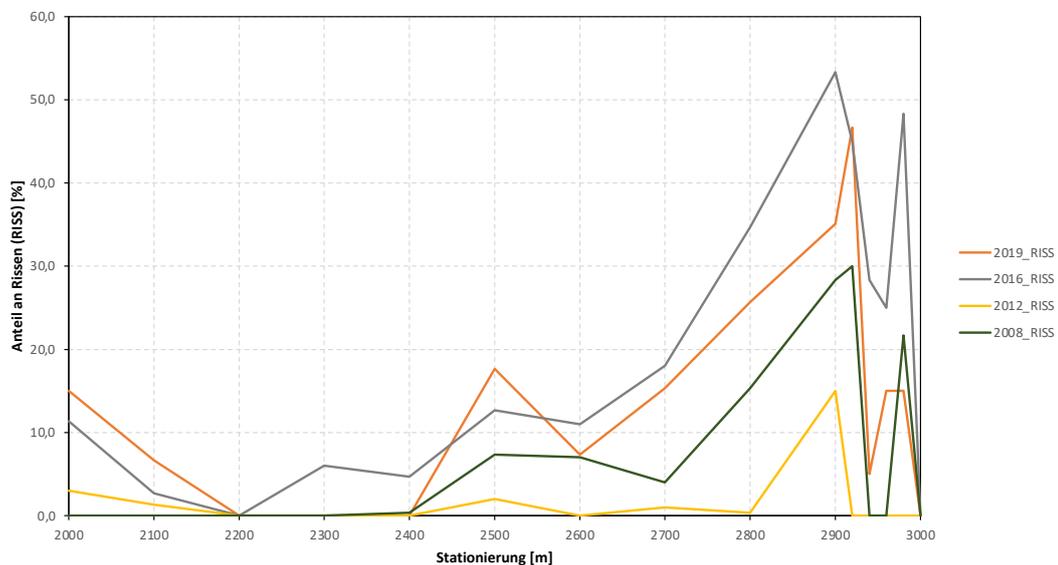


Abbildung 22: Zeitlicher Verlauf des Rissbildes im Verlauf des Streckenabschnittes

5.3 Versuchsstrecke Staffeleggstrasse

Die Staffeleggstrasse wurde im Jahr 2010 fertiggestellt und kurz vor der Verkehrsfreigabe an einer Stelle in der Nähe des Tunnels Horental mit der MLS10-Prüfmaschine (siehe Kap. 5.3.2) belastet. Es handelt sich um einen Streckenabschnitt einer Kantonstrasse, die Aarau mit dem Fricktal verbindet. Im Folgenden wird eine Strecke von 940 m (km 2040- km 2980) zwischen Tunnel Horental und Kreisell Kuttigen (vgl. Abbildung 23) näher betrachtet. Die

MLS10 Belastung fand dabei im Jahr 2010 bei km 2075 statt (Fahrtrichtung, Tunnel Horental bis Kreisel Kuttingen). Die Farben (Grün, Hellblau und Rot) bezeichnen, wie in Abschnitt 5.3.1 erklärt, die unterschiedlichen Aufbaustrukturen.



Abbildung 23: Probestrecke Staffeleggstrasse

5.3.1 Aufbaudaten

Gemäss Schweizer Norm VSS 40 324 [37] wird der Strukturwert SN als Kennziffer für die Tragfähigkeit eines Belags verwendet. Der SN ist definiert als Summe der Dicken D [cm] multipliziert mit den entsprechenden Tragfähigkeitswerten a der einzelnen Oberbauschichten.

$$SN = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 + a_3 \cdot D_3 + \dots + a_n \cdot D_n$$

mit SN	Strukturwert
a_i	Wert für die relative Tragfähigkeit einer Oberbauschicht bezogen auf den Basiswert für ungebundenes Gemisch
$a_i \cdot D_i$	Tragfähigkeitswert einer Oberbauschicht der Dicke D [cm]

Bei einer Tragfähigkeitsdimensionierung wird auf Grund der erwarteten Verkehrslastklasse T_{i20} und der anhand von Sondierungen ermittelten Tragfähigkeitsklasse S_i des Untergrundes der erforderliche Strukturwert SN_{erf} bestimmt. Zusätzlich zur Tragfähigkeitsdimensionierung sind allenfalls bauliche Massnahmen zur Verhütung von Frost- und Auftauschäden oder eine Frostdimensionierung durchzuführen.

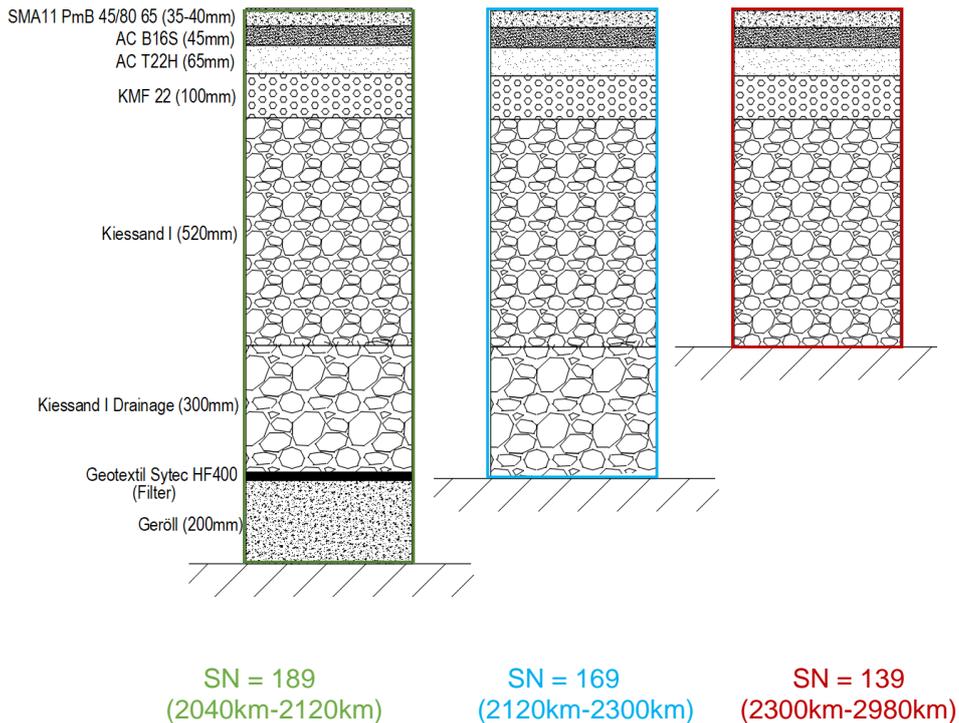


Abbildung 24: Belagsaufbau der Staffeleggstrasse

Die Belagsstrukturen der Strecke (siehe farbige Markierung in Abbildung 23) sind in Abbildung 23 dargestellt, wobei diese sich durch Drainage/Kiessand und Geröll unterscheiden. Diese Schichten wurden aber nur auf einer Länge von 260m eingebaut, was auf ein punktuelleres Entwässerungsproblem zurückgeführt werden kann. In der gleichen Abbildung 23 sind die für jede Struktur entsprechenden Strukturwerte SN angegeben. Anmerkung: Der Ausdruck "Kiessand I" ist mittlerweile nicht mehr gebräuchlich und wurde durch den Begriff "Kiessand 0/45" ersetzt.

5.3.2 Beschleunigte Verkehrssimulation Versuche mit die MLS10 in Jahr 2010

Grundlage der Verkehrssimulation

Es ist schwierig, über mehrere Jahre hinweg Daten zum Zustandsverhalten einer Fahrbahn, zur Verkehrsbelastung und zum Klima zu erhalten, um Performancemodelle zu validieren und zu kalibrieren. Accelerated Pavement Testing (APT) ist eine Technologie, mit der ein Belagsaufbau unter realistischen Bedingungen, jedoch in einem komprimierten Zeitraum untersucht werden kann. Diese Methode kann dazu beitragen, die steigenden Kosten für Strassenbau und -management bei relativ geringen Investitionen zu senken. APT bietet ein Mittel zur Bewertung von Belagsmaterialien. Es hilft unter anderem bei der Verbesserung der strukturellen Bemessung und der Fahrbahneigenschaften. Das Hauptziel des ATP besteht darin, das Verkehrsaufkommen in angemessener kurzer Zeit und mit akzeptablen Kosten zu simulieren, indem eine messbare Reaktion erzeugt und/oder eine signifikante Verschlechterung der Struktur hervorgerufen wird. Die Beschleunigung der Schadensbildung kann durch eine erhöhte Rate von Lastanwendungen (Wasser, Frost, Hitze), erhöhte Lastgrößen (Lasten, die grösser als die Fahrbahnauslegungslast sind), eine Änderung der Belastungseigenschaften, verringerte Fahrbahndicken, auferlegte ungünstige Umgebungsbedingungen oder eine Kombination dieser Faktoren erreicht werden. Es ist wichtig, dass sich die APT-Bedingungen nicht wesentlich von den tatsächlichen Betriebsbedingungen unterscheiden, so dass APT Strassenbelastungen und

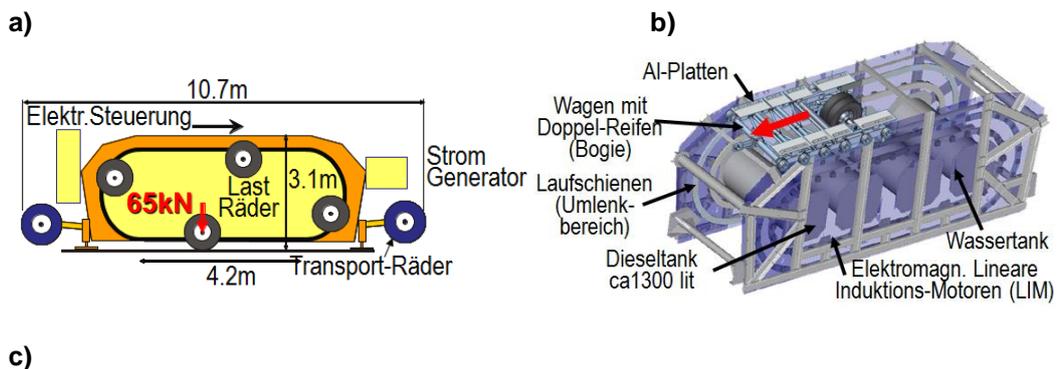
Schäden erzeugt, die denen ähneln, die bei Strassenbelägen beobachtet werden. Daher ist das Aufbringen von Verkehrslasten mit einer erhöhten Wiederholungsrate, die in kurzer Zeit sehr viele Lastanwendungen hervorruft, ein gutes Mittel zur beschleunigten Erzeugung von Fahrbahnschäden.

Verschiedene Projekte zeigen, dass mit dem Verkehrslastsimulator MLS10 verkehrslastbedingte Schädigungen des Belags zuverlässig und schnell herbeigeführt werden können, so dass die gewünschten Effekte auftreten. Zu beachten bleibt jedoch, dass andere Effekte von Schädigung hervorgerufen durch Alterung des Belags oder Witterungseinflüsse nicht simuliert werden können und deren Einflüsse weiterhin abgeschätzt werden müssen.

Funktionsweise des Mobile Load Simulator MLS10

Der MLS10 ist ein mobiler Verkehrslastsimulator, der es ermöglicht, beschleunigte Verkehrslastsimulationen durchzuführen. Er ist somit ein Werkzeug für praxisnahe Eignungsprüfung und Forschungen im Strassenwesen. Mit seiner Hilfe können wiederholbare, realistische und verlässliche Prüfungen an Strassenbelägen und -aufbauten durchgeführt werden. Kernstück des MLS10 bildet ein starrer Aussenrahmen, in welchem sich zu einer Kette verbundene Wagen mit den Lasträdern (sog. Bogies) bewegen. Deren Bahn wird auf Schienen geführt, und sie werden von linearen Induktionsmotoren (LIM) angetrieben. Die insgesamt vier Bogies sind jeweils mit einer hydraulisch gelagerten, einzel- oder doppelbereiften Halbachse zum Aufbringen der Verkehrslast bestückt. Sobald ein Bogie sich horizontal auf den unteren Schienen bewegt, wird seine Halbachse mit der voreingestellten Last gegen den Belag gedrückt und somit eine Verkehrslast-Überfahrt simuliert. Die maximal mögliche Belastung, welche auf den Überrollbereich von 4,2 m aufgebracht werden kann, beträgt 65 kN pro Bogie. Die Geschwindigkeit kann dabei frei bis zu einem Maximum von 6 m/s gewählt werden.

Mit der maximalen Geschwindigkeit wird eine Leistungsfähigkeit von 6.000 unidirektionalen Überrollungen pro Stunde erreicht. Beispielweise kann ein Belag der Verkehrslastklasse T3 so in nur 50 Stunden Betrieb mit 300'000 MLS10 mit Überrollungen belastet werden, was einem realen Verkehrsaufkommen während ca. 25 Jahren mit einer Achslast von 8 t entspricht. Zudem kann der MLS10 mit einem hydraulischen Zusatzsystem bestückt werden, das die Simulation des in der Praxis vorkommenden seitlichen Spurdriftens um +/- 400 mm erlaubt. Die Leistung für den Betrieb der Anlage wird von einem Dieselgenerator mit Partikelfilter erbracht. Abbildung 25 zeigt ein Funktionsschema (a), die Innenansicht (b) und die Aussenansicht der Maschine (c).



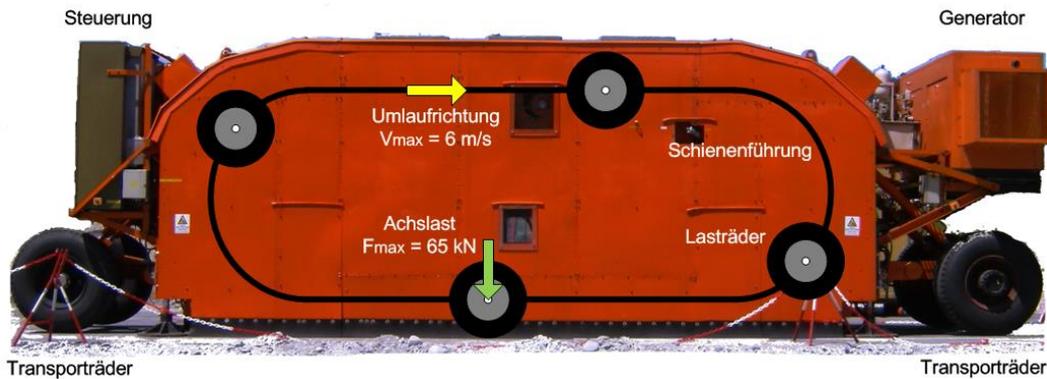


Abbildung 25: Mobile Load Simulator MLS10

In der folgenden Tabelle 15 sind zusammenfassend alle Daten des MLS10 aufgeführt:

Tabelle 15: Eckdaten der MLS10

Abmessungen (L x B x H):	10.7m x 3.5m x 3.1m
Gesamtgewicht:	34 Tonnen
Treibstoffverbrauch:	ca. 10L/h Diesel
Elektrische Versorgung:	380 V, 50 Hz
Leistungsaufnahme Betrieb:	50 kW (75A)
Art der Bereifung:	Supersingle 455/45 R22.5 oder Doppelräder 285/70 R19.5
Achslast pro Rad:	variabel bis max. 65 kN
Art der Belastung:	kanalisiert oder variierend (Lateral Wandering)
Überrollgeschwindigkeit:	variabel bis 6 m/s = 22 km/h (max.) bzw. 5 m/s=18 km/h (Normalbetrieb)

Messmethoden zur Erfassung des Belagszustands

Die mit der mobilen Grossversuchsanlage MLS10 durchgeführten Messungen und Untersuchungen hatten in der Regel die Ermittlung der mechanischen Versagensgrenze eines Belagsaufbaus bzw. eines Systems (z. B. Belagsaufbauten mit Bewehrungseinlagen) und damit seines Verhaltens, d.h. die sukzessive Entstehung von Oberflächenschäden und strukturellen Schäden durch praxiskonforme und beschleunigte Verkehrslastsimulation zum Ziel.

Durch geeignete begleitende Zustandsmessungen am Belag und Berechnungen sollten die Veränderungen der mechanischen Eigenschaften über die gesamte Lebensdauer vom Neubau bis zum vollständigen Tragfähigkeitsverlust unter natürlicher Witterung erfasst werden. Zur Erfassung der Schädigungsentwicklung wurden zusätzlich im Belag Temperatur-, Dehnungs- und Beschleunigungssensoren eingebaut. Um die Veränderung der mechanischen Eigenschaften über die gesamte Lebensdauer unter natürlicher Witterung erfassen und beurteilen zu können, wurden neben den begleitenden Zustandsmessungen Bohrkern- oder Belagsausschnitte aus den Belagsaufbauten vor und nach der MLS10 Belastung zur Bestimmung von Materialkennwerte im Labor entnommen.

Während des Betriebs der Grossversuchsanlage wurden in regelmässigen Abständen und nach einer festgelegten Anzahl Überrollungen einerseits visuelle Inspektionen zur Feststellung von Oberflächenschäden (Risse, Verformungen und Materialverlust) und zum anderen Querprofilmessungen (Spurbildung) mit einem automatischen Profilometer durchgeführt.

MLS10 Versuche an der Staffeleggstrasse

In den 2010 durchgeführten Belastungsversuchen wurde die Last der einzelnen Bogies auf 65 kN festgelegt. Dies entspricht einer totalen Achslast von 130 kN. Der Reifendruck wurde auf 10.5 bar eingestellt. Zum Einsatz kam Zwillingsrädern. Die Überrollgeschwindigkeit wurde auf 6m/s, d.h. etwa 22 km/h, festgelegt. Die Anzahl durchgeführter Überrollungen belief sich auf rund 400'000. Da der MLS10 eine Achslast von 130 kN (13.26 t) simuliert, ist seine schädigende Wirkung verglichen mit der Norm VSS 40 320 um einen Achsäquivalenzfaktor 7.10 höher. Der Äquivalenzfaktor kann aus der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$F_i = \left[\frac{L_x + A}{19} \right]^{4.79} A^{-4.33} 10^{\left(\frac{0.2}{\beta_x} \frac{0.2}{\beta_{18}} \right)}$$

F_i steht dabei für den Achsäquivalenzfaktor, L_x ist die einwirkende Achslast in [kips], A ist die Anzahl Achsen. β_x und β_{18} sind Funktionen, die von der Struktur und Last abhängig sind.

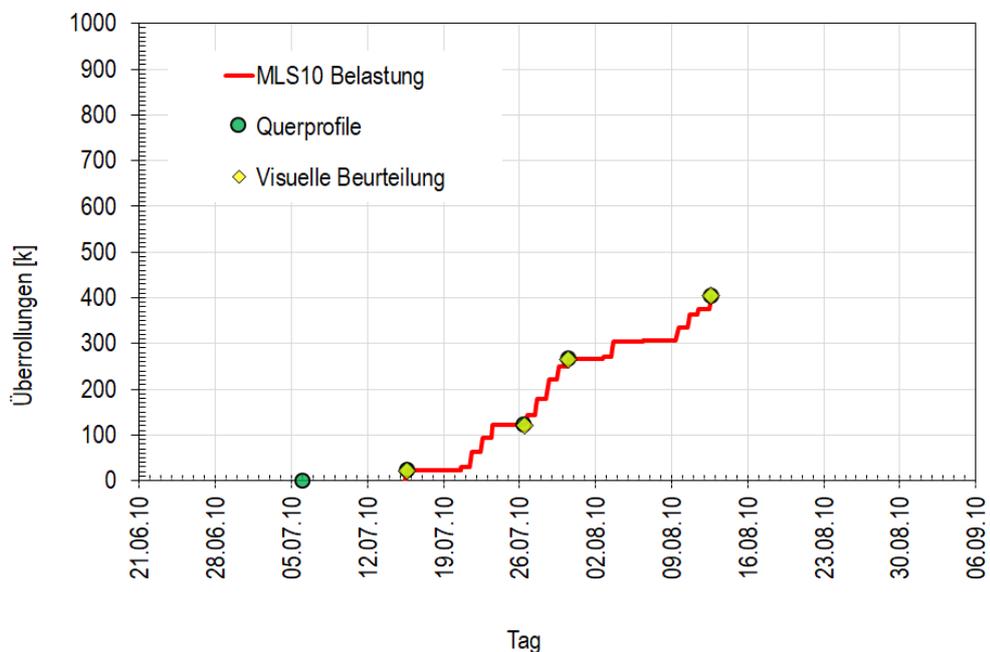


Abbildung 26: Zeitlicher Ablauf der Untersuchungen zu den MLS10-Versuchen

Unter Berücksichtigung des Achsäquivalenzfaktors für eine Achslast von 130 kN ergibt sich daraus für die MLS10 Überrollungsversuche eine aufgebrachte gesamte äquivalente Verkehrslast von ca. 3'000'000. Dies entspricht ca. 13 % der gesamten äquivalenten Verkehrslast der Struktur, die bei 22'000'000 liegt.

Die Belastung der Staffeleggstrasse mit dem MLS10 wurde von Mitte Juli bis Mitte August 2010 durchgeführt. Während der Belastungsversuche wurden, verschiedene Zustandserhebungen durchgeführt. In diesen Bericht werden nur die visuelle Beurteilung der Oberflächenschäden und die Spurbildung durch Querprofilemessungen mit einem Profilometer berücksichtigt. Der zeitliche Verlauf der Belastung und die punktuell durchgeführten Messungen sind in Abbildung 26 dargestellt.

5.3.3 Materialkennwerte

Während des Einbaus des Belags wurden Kontrollprüfungen an den unterschiedlichen Schichten durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den folgenden Abschnitten dargestellt.

Fundationsschichten

Kiessand I

Die Firma Erne AG Bauunternehmung hatte den Kiessandkoffer im März 2009 im Rahmen des Forschungsprojekts nach [69] eingebaut. Am 02.04.2009 wurden Plattendruckversuche gemäss Schweizer Norm VSS 70317 [70] an 5 verschiedenen Stellen durchgeführt. Das Ziel des Plattendruckversuches ist es, Drucksetzungslinien zu ermitteln und daraus die Tragfähigkeit des Untergrundes zu beurteilen. Aus den Drucksetzungslinien der Erstbelastung bzw. Zweitbelastung können die Verformungsmodul E_{V1} und M_{E1} bzw. E_{V2} und M_{E2} nach [70] und [71] ermittelt werden. Beim Plattendruckversuche werden die Setzungen einer kreisförmigen Platte gemessen. Die stufenweise wiederholte Be- und Entlastung erfolgt mit Hilfe einer Druckvorrichtung und einem Lastwagen. Die mittleren Normalspannungen unter der Platte samt zugehörigen Setzungen der einzelnen Laststufen werden in einem Drucksetzungsdiagramm dargestellt. Gemäss der Projektanforderung sollte der M_{E1} über 80 MN/m^2 liegen. Die Ergebnisse sind mittels eines Boxplots in Abbildung 27 dargestellt, wobei die drei unterschiedlichen Strukturen Grün, Hellblau und Rot markiert sind.

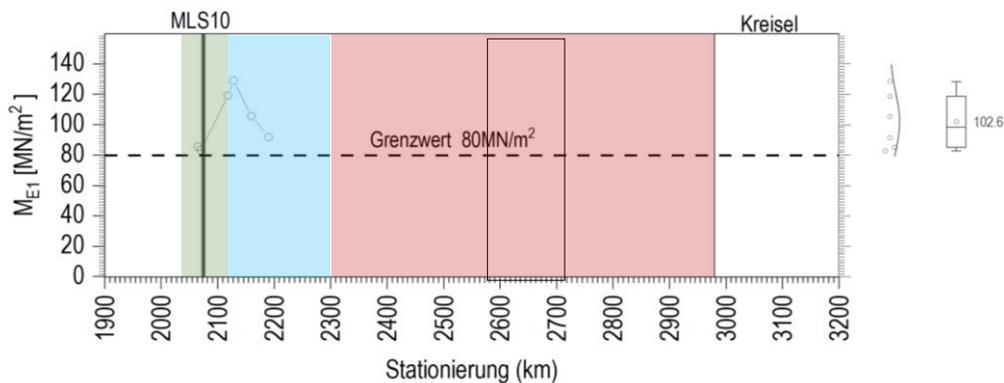


Abbildung 27: Plattendruckversuch Ergebnisse am Kiessandkoffer

KMF 22

Das Kaltmischgut wurde in den Anlage Recycling-Center Frick hergestellt und durch die Firma Tozzo AG am 03.04.2009 eingebaut. Während des Einbaus wurden Verdichtungskontrollen mit einer Troxler Isotopsonde an 30 verschiedenen Stellen durchgeführt. Mit diesem Gerät es ist möglich, die Dichte und den Wassergehalt der eingebauten Schicht zu bestimmen. Die Ergebnisse sowie der berechnete Verdichtungsgrad und die Trockendichte sind in Abbildung 28 dargestellt. Gemäss diesen Ergebnissen wurde die angestrebte Verdichtung nicht erreicht.

Im Anschluss wurde am 04.04.2009 die Tragfähigkeit des Planums an 5 verschiedenen Stellen gemessen (entsprechend der Messstellen für den Kiessandkoffer). Dabei wurde das Leichte Fallgewichtsgerät (LFG) verwendet (vgl. [72]). Im Gegensatz zu einem Plattendruckversuch ist dieses Verfahren einfacher, da es kein Fahrzeug als Gegengewicht benötigt. Mit diesem Verfahren werden Messstösse auf das Planum aufgebracht und nach jedem Stoss wird die Setzung in Millimetern aufgezeichnet. Nach dem dritten Stoss werden automatisch der Mittelwert der Setzung und der Wert des dynamischen Verformungsmoduls E_{vd} in MN/m^2 angegeben. Gemäss Projektunterlagen sollte dieser Wert über 65 MN/m^2 liegen. Die Tragfähigkeit der Schicht erfüllt damit die Anforderungen.

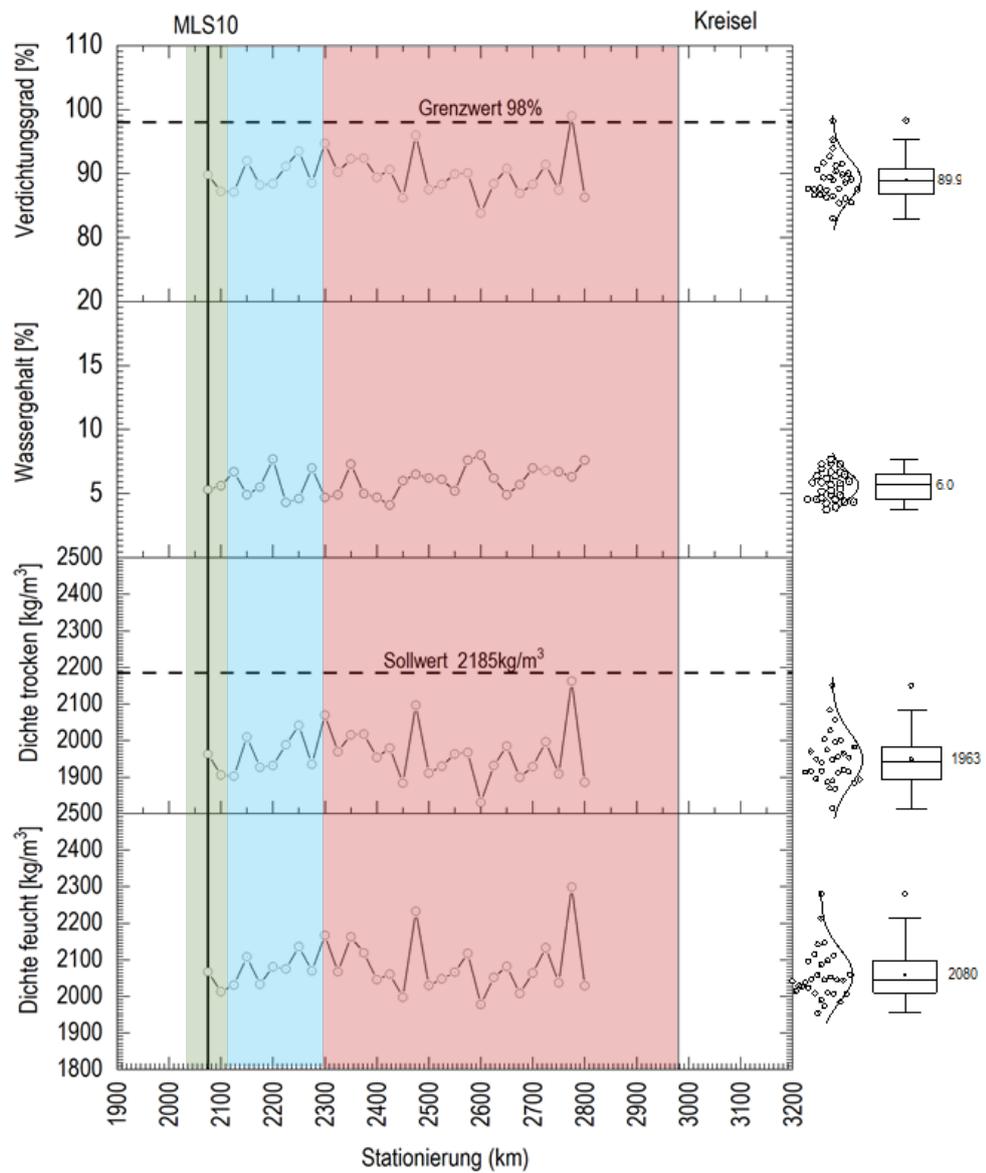


Abbildung 28: Volumetrische Kennwerte und Verdichtungskennwerte der KMF 22

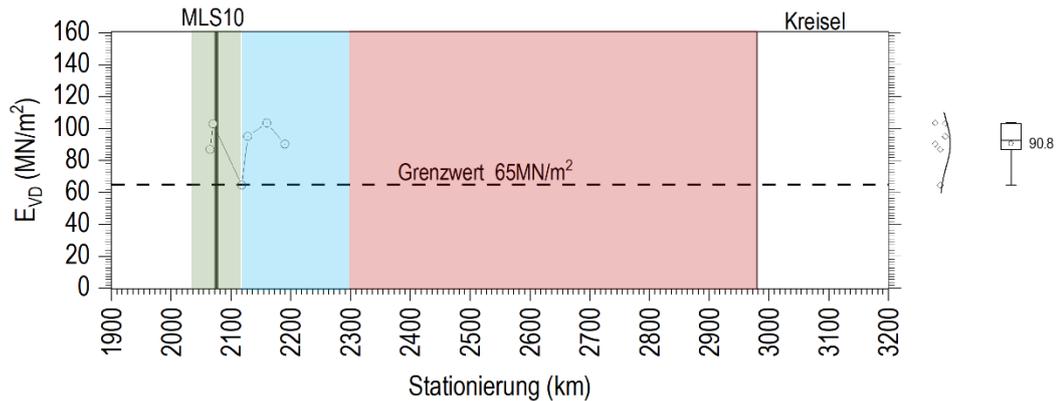


Abbildung 29: Tragfähigkeit des Kiessandkoffers gemäss LFG Messungen

Asphaltschichten

Das Mischgut für die Asphaltschichten des Oberbaus, AC T 22H, AC B 16S und SMA 11 wurde in der Anlage AMW Grenzach-Wylen hergestellt. Tragschicht, Binderschicht und Deckschicht wurden jeweils am 08.05.2009, am 09.05.2009 und am 01.10.2009 gemäss [36] eingebaut. Während des Einbaus wurden Proben zur Bestimmung der Mischguteigenschaften und der Einbauqualität entnommen.

Dazu wurden an verschiedenen Stellen entlang der Strecke Mischgut aus den Fertiger entnommen. Im Labor wurde die Rohdichte bestimmt und Marshall Prüfkörper hergestellt. Danach wurden der Hohlraumgehalt Marshall sowie Marshall Stabilität und Fliesen bestimmt. In einige Fällen wurde das Bitumen rückgewonnen und die Penetration und der Erweichungspunkt Ring und Kugel bestimmt.

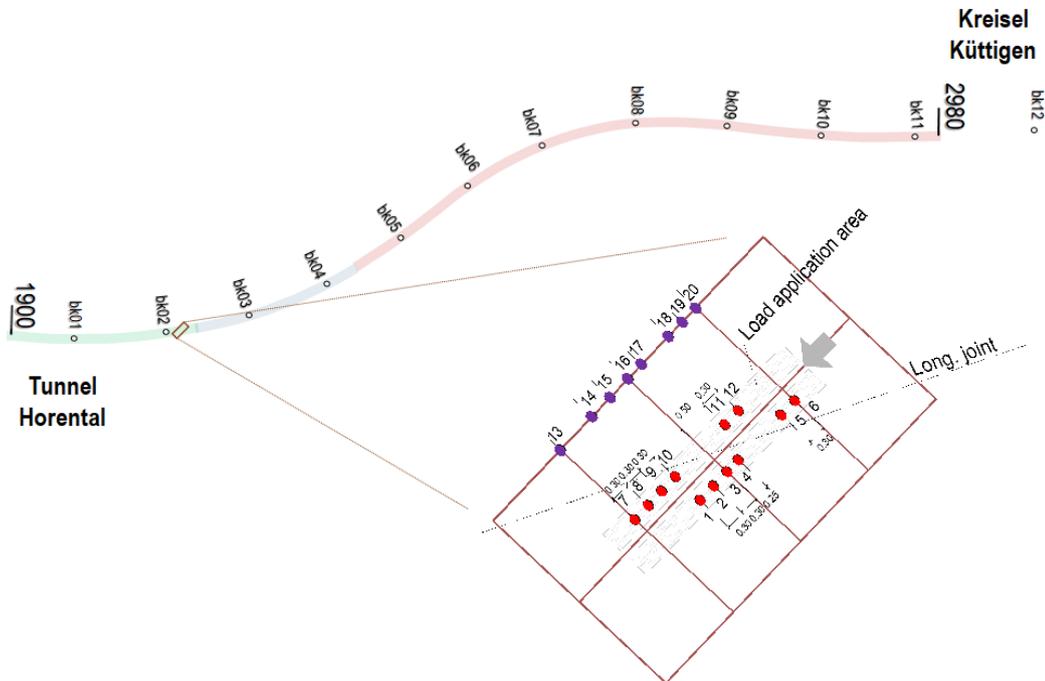


Abbildung 30: Übersicht der Bohrkerne Entnahme im Jahr 2010

Nach Fertigstellung des Streckenabschnitts wurden an insgesamt 12 Entnahmestellen in einem Abstand von ca. 100m Bohrkerne entnommen. An diesen Bohrkernen wurden dann

Tabelle 16: Liste der im Jahr 2020 durgeführten Materialuntersuchungen

Stationierung	BK	wo ?	Schichtdicke				Schichtenverbund			Steifigkeit	Ermüdung	Druck-Schwell-Versuch	Rohdichte	Raumdichte
			SMA11	ACB16S	ACT22H	KMF	SMA11 ACB16S	ACB16S ACT22H	ACT22H KMF					
2080	1	DF	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja					
2110	2	DF	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja					
2140	3	IC	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja					
2170	4	IC	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja					
2200	5	D C	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja					
2230	6	D C	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja					
2260	7	IC	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja					
2290	8	D C	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja					
2320	9	IC	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja					
2350	10	D C	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja					
2380	11	IF	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja					
2410	12	DF	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja					
2440	13	IF	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja		ja	ja	ja	
2470	14	DF	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja					
2500	15	IF	ja	ja	ja	ja		ja	ja	ja	ja	ja	ja	
2530	16	DF	ja	ja	ja	ja			ja	ja	ja	ja	ja	
2560	17	IF	ja	ja	ja	ja		ja	ja	ja	ja	ja	ja	
2590	18	DF	ja	ja	ja	ja			ja	ja	ja	ja	ja	
2620	19	IF	ja	ja	ja	ja		ja	ja	ja	ja	ja	ja	
2650	20	DF	ja	ja	ja	ja		ja	ja	ja	ja	ja	ja	
2680	21	IC	ja	ja	ja	ja		ja	ja	ja	ja	ja	ja	
2710	22	D C	ja	ja	ja	ja		ja	ja	ja	ja	ja	ja	
2740	23	IC	ja	ja	ja	ja		ja	ja	ja	ja	ja	ja	
2770	24	D C	ja	ja	ja	ja				ja	ja	ja	ja	
2800	25	IC	ja	ja	ja	ja		ja	ja	ja	ja	ja	ja	

Volumetrische Kenngrößen der Mischgutsorten

Abbildung 32, Abbildung 33 und Abbildung 34 zeigen die Hohlraumgehalt sowie die Marshall Stabilität und Fließen der Deckschicht SMA 11, der Binderschicht AC B 16 S und der Tragschicht AC T 22 H. Rechts neben jeder Abbildung sind die wichtigsten statistischen Parameter dargestellt.

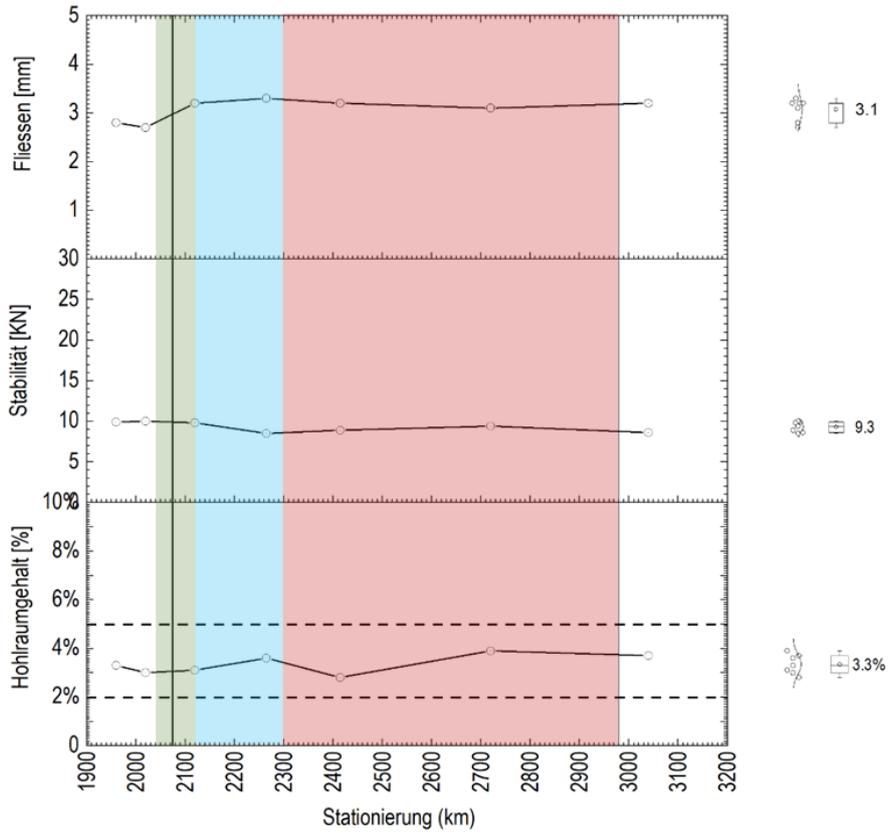


Abbildung 32: Hohlraumgehalt sowie Marshall Stabilität und Fließen der Deckschicht SMA 11

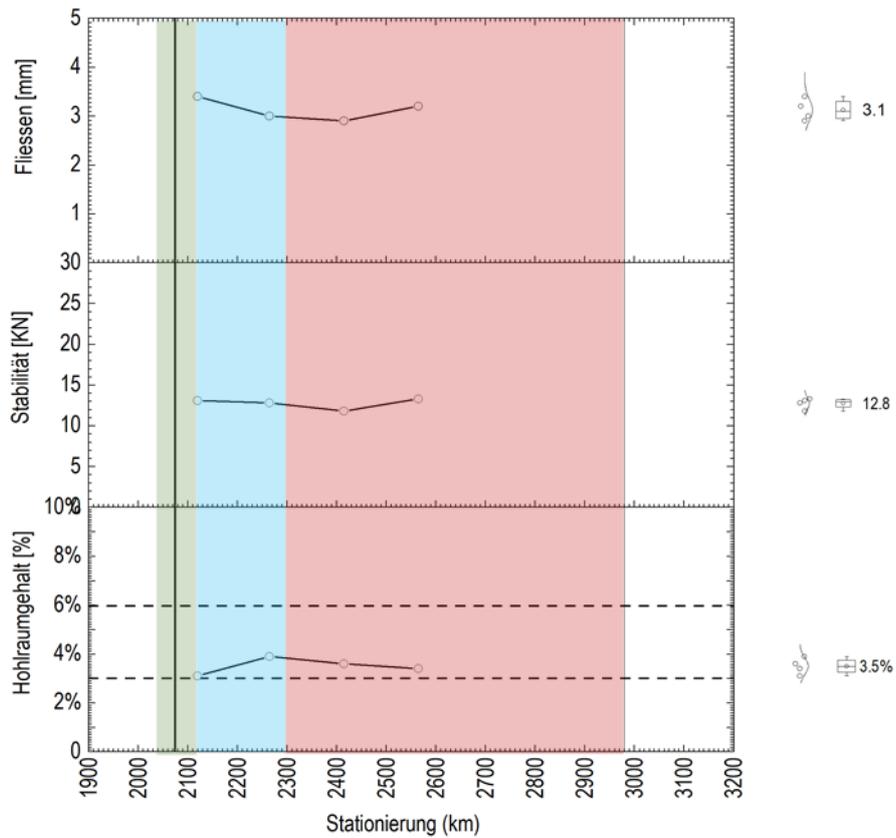


Abbildung 33: Hohlraumgehalt sowie Marshall Stabilität und Fließen der Binderschicht AC B 16 S

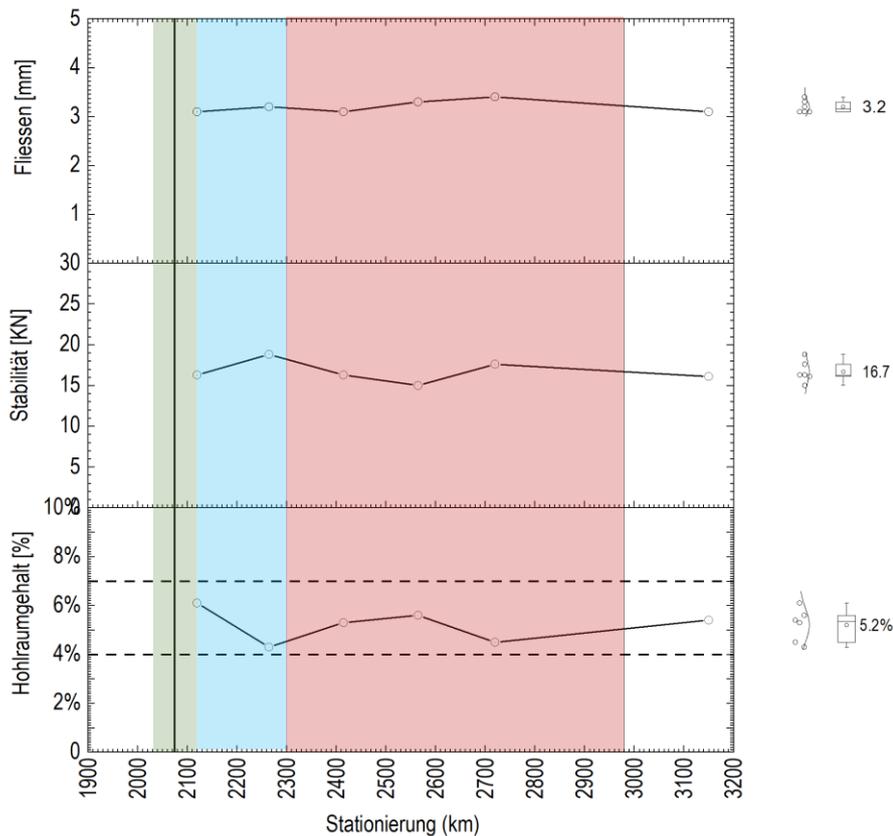


Abbildung 34: Hohlraumgehalt sowie Marshall Stabilität und Fließen der Tragschicht AC T 22 H

Bitumeneigenschaften der Asphaltschichten

Tabelle 17 zeigt die Werte der Penetration und des Erweichungspunkts RuK für das im Jahr 2010 und 2020 rückgewonnene Bitumen, sowie den löslichen Bindemittelanteil für alle Mischgutsorten. In Abbildung 35 sind die Ergebnisse grafisch dargestellt. Die Ergebnisse zeigen deutlich die durch die Alterung des Bitumens hervorgerufene Verhärtung, wobei die Penetrationswerte mit der Zeit ab und die Erweichungspunkte leicht zunehmen.

Tabelle 17: Statistische Kennwerte der Schichtdicken

Schicht	Jahr der Untersuchung	Einbau Temp [°C]	Bitumentyp	Lösliche Bindemittelanteile [%]	Penetration [mm ⁻¹]	Erweichungs-punkt RuK [°C]
Deckschicht SMA 11	2010	166	PmB 40/80-65 (CH-E)	6.07	53	68.7
	2020			6.10	34	73.4
Binderschicht ACB16S	2010	176	50/70	5.05	35	59.1
	2020			4.90	26	62.8
Tragschicht ACT22 H	2010	168	PmB-E 25/55-65 (CH-E)	4.05	27	70.2
	2020			4.70	20	70.6

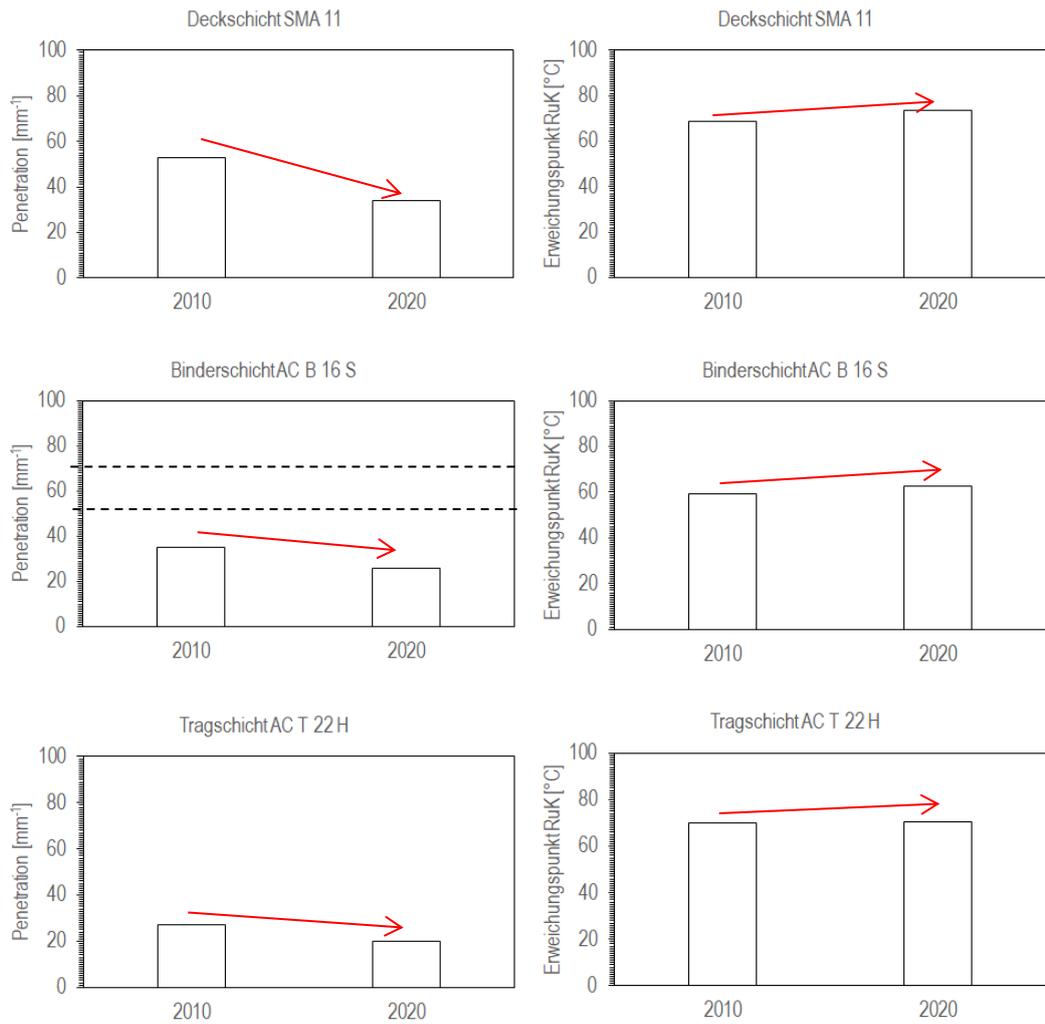


Abbildung 35: Vergleich Penetration und Erweichungspunkt RuK der untersuchten Schichten in 2010 und in 2020

Korngrößenverteilung der Asphaltsschichten

Abbildung 36 stellt die Siebanalyse jeder Schicht mit den Grenzwerten nach Schweizer Norm dar. Links ist jeweils die Siebanalyse des Mischguts und rechts die an den Bohrkernen durchgeführte Siebanalyse dargestellt.

Schichtdicken

Die gemessenen Schichtdicken inklusiv der statistischen Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung etc.) sind in Tabelle 18 zusammengefasst und in Abbildung 37 grafisch dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Mittelwerte der Dicke der eingebauten Schichten in fast allen Fällen grösser als die geforderten Sollwerte sind und die Variationsbreite zwischen minimaler und maximaler Dicke einer Schicht ebenfalls hoch ist.

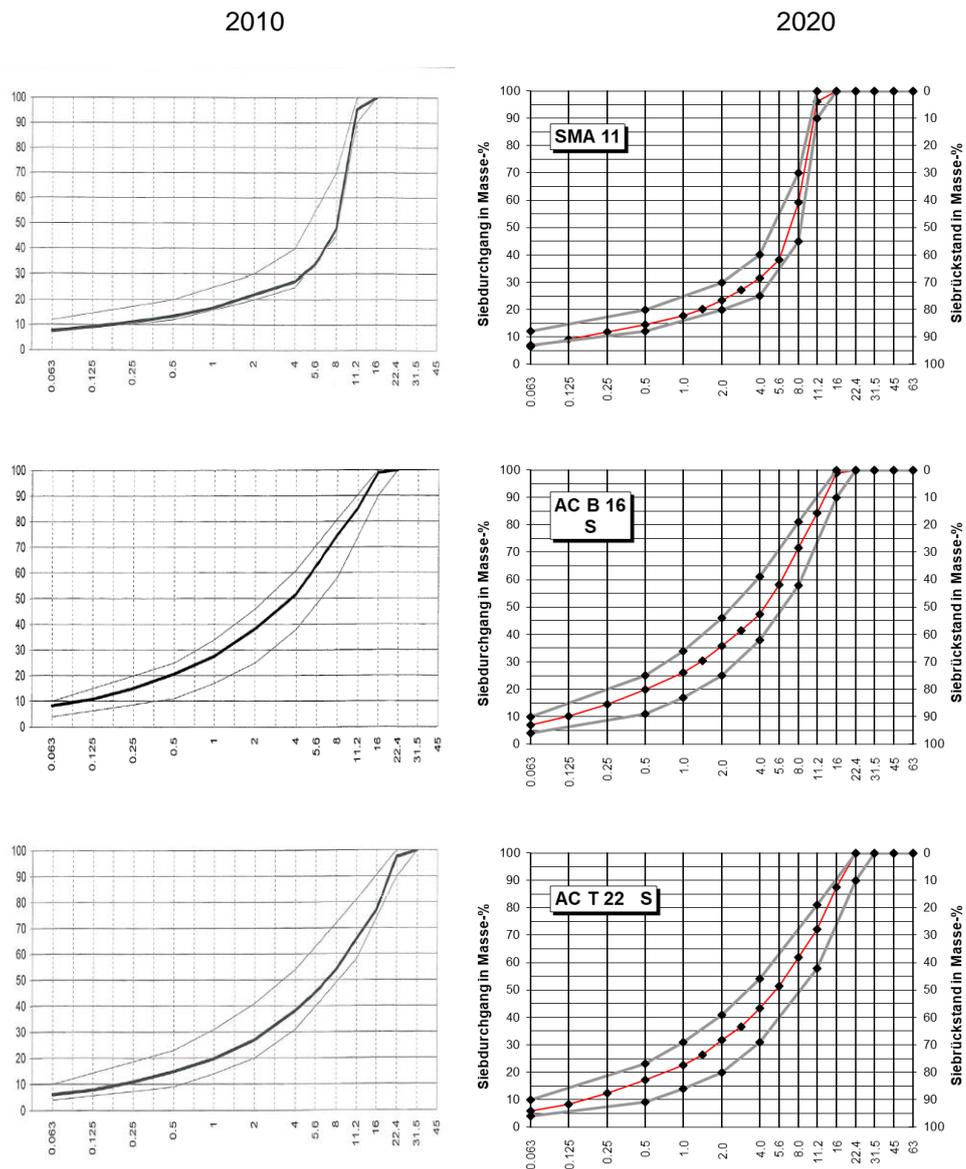


Abbildung 36: Korngrößenverteilung aller untersuchten Schichten

Tabelle 18: Statistische Kennwerte der Schichtdicken

Schicht	Bohrkerne	Mittelwert [mm]	SD [mm]	Min [mm]	Max [mm]	Sollwert [mm]
Deckschicht SMA 11	2010	33.5	5.1	26	44	35-40
	2020-Unbelastet	37.8	3.4	34	45	
	2020-Belastet	36.9	3.3	32	42	
Binderschicht ACB16S	2010	67.1	3.5	61	74	45
	2020-Unbelastet	45.8	5.3	38	55	
	2020-Belastet	51.3	4.1	46	58	
Tragschicht ACT22 H	2010	71.7	11.2	50	83	65
	2020-Unbelastet	72.2	10.0	55	95	
	2020-Belastet	76.5	4.8	67	83	

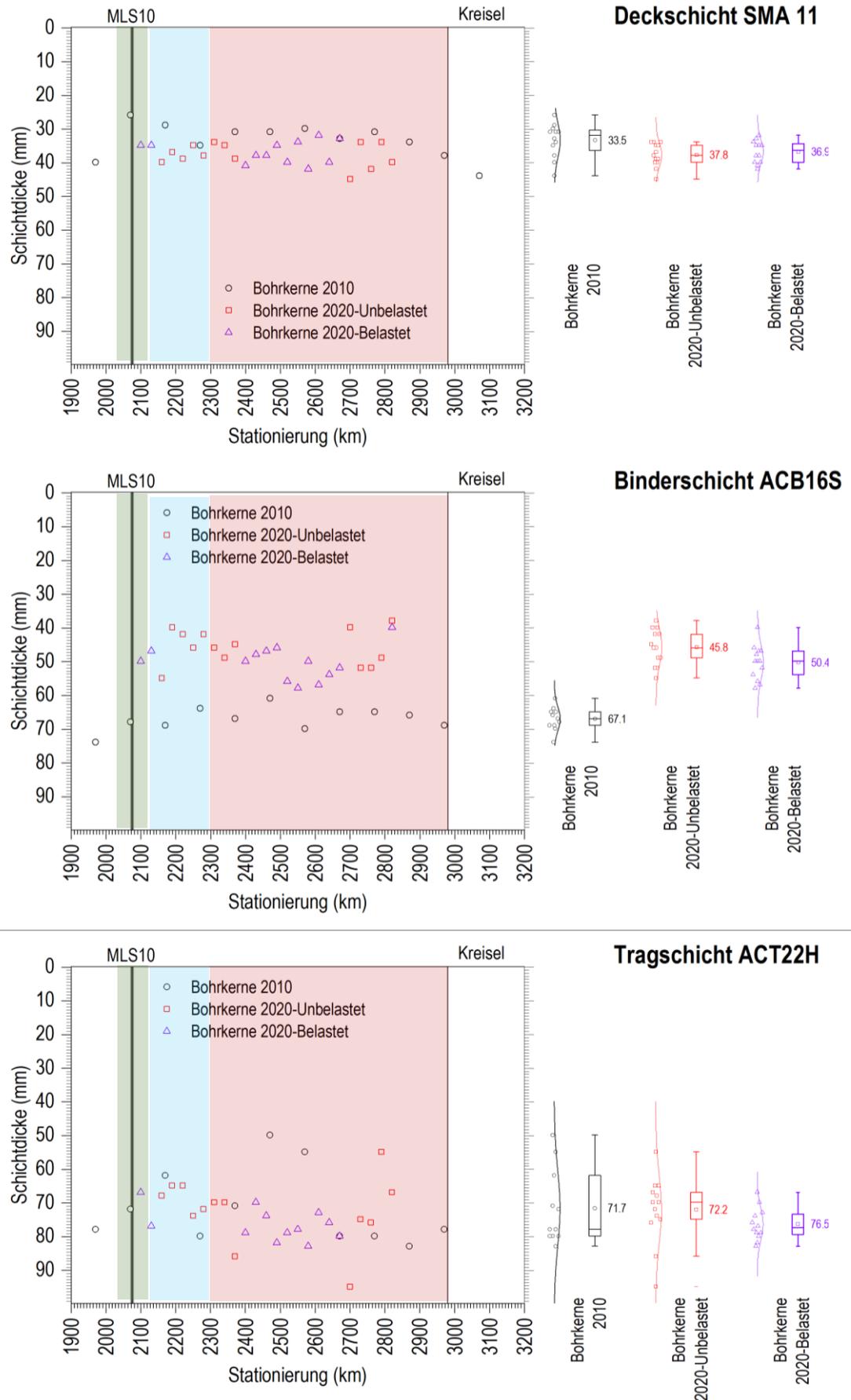


Abbildung 37: Gemessene Schichtdicken entlang des Streckenabschnittes in den Jahren 2010 und 2020

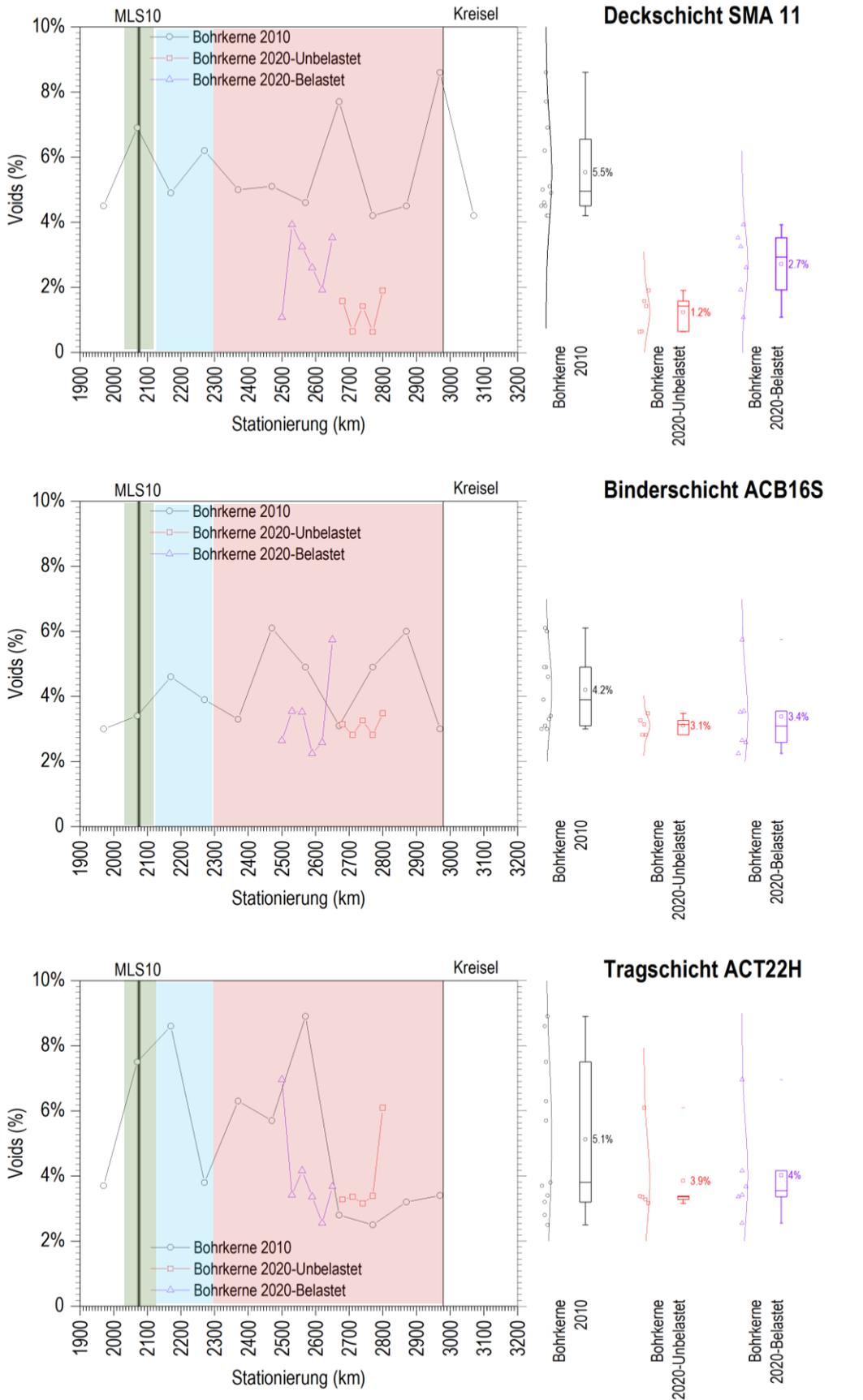


Abbildung 38: An den Bohrkerne bestimmte Hohlraumgehalte entlang des Streckenabschnittes in den Jahren 2010 und 2020

Hohlraumgehalt der Bohrkerne

Die an den Bohrkerne bestimmten Hohlraumgehalte sind in Tabelle 19 aufgeführt und in Abbildung 35 grafisch dargestellt.

Tabelle 19: Statistische Kennwerte der Hohlraumgehalte

Schicht	Bohrkerne				Sollwert Marshall Prüfkörper [%]
	Mittelwert [mm]	SD [mm]	Min [mm]	Max [mm]	
Deckschicht SMA 11	2010	5.5	1.5	4.2	2.0-5.0
	2020-Unbelastet	1.2	0.6	1.9	
	2020-Belastet	2.7	1.1	3.9	
Binderschicht AC B 16 S	2010	4.2	1.2	3.0	3.0-6.0
	2020-Unbelastet	3.1	0.3	3.5	
	2020-Belastet	3.4	1.3	5.7	
Tragschicht AC T 22 H	2010	5.1	2.4	2.5	4.0-7.0
	2020-Unbelastet	3.9	1.3	6.1	
	2020-Belastet	4.0	1.5	7.0	

Schichthaftung nach Leutner

Der Schichtenverbund nach Leutner wurde im Jahr 2010 zwischen allen Schichten nach der MLS10 Belastung gemäss Schweizer Norm VSS 70461 [73] bestimmt, um den Einfluss einer beschleunigten Verkehrslastsimulation auf denselben zu ermitteln. Im Jahr 2020 wurden 14 Bohrkerne in einem Bereich von 400m geprüft, wobei 6 in der Rollspur und 8 in der Fahrstreifenmitte entnommen worden waren (siehe Tabelle 16 und Abbildung 31). Die Ergebnisse der gemessenen Scherkraft sind in Tabelle 20 aufgeführt und in Abbildung 39 dargestellt. Gemäss den Ergebnissen werden die Anforderungen der Schweizer Norm von 15kN zwischen Deckschicht und Binderschicht und 12kN zwischen den anderen Schichten für alle Prüfkörper erreicht. Die Auswertung der Untersuchung des Schichtenverbunds zeigte, dass die Belastung einen positiven Effekt (Zunahme des Schichtenverbundes im Laufe der Zeit) auf den Verbund zwischen Binder- (ACB16S) und Tragschicht (ACT22H (S2-S3)) hatte. Bei den Verbundwerten der anderen Schichten war dagegen keine Veränderung feststellbar.

Tabelle 20: Statistische Kennwerte zur Scherkraft [kN]

Schichtverbund	Bohrkerne	Mittelwert [mm]	SD [mm]	Min [mm]	Max [mm]	Grenzwert [kN]
Deckschicht / Binderschicht	2010-Unbelastet	37.6	4.0	32.6	42.5	15
	2010- MLS10 Belastung	38.7	4.3	33.5	43.8	
	2020-Unbelastet	35.3	7.4	20.7	42.4	
Binderschicht / Tragschicht	2020-Belastet	35.4	7.5	23.7	42.3	12
	2010-Unbelastet	30.2	8.3	18.7	38.4	
	2010- MLS10 Belastung	40.3	4.0	35.2	45.6	
Tragschicht / KMF	2020-Unbelastet	45.5	9.9	27.2	58.2	12
	2020-Belastet	41.2	16.8	15.2	62.1	
	2010-Unbelastet	42.0	1.8	38.6	44.5	
	2010- MLS10 Belastung	41.4	5.3	35.3	49.4	
	2020-Unbelastet	38.9	4.3	31.9	44.6	
	2020-Belastet	39.0	5.2	29.6	44.1	

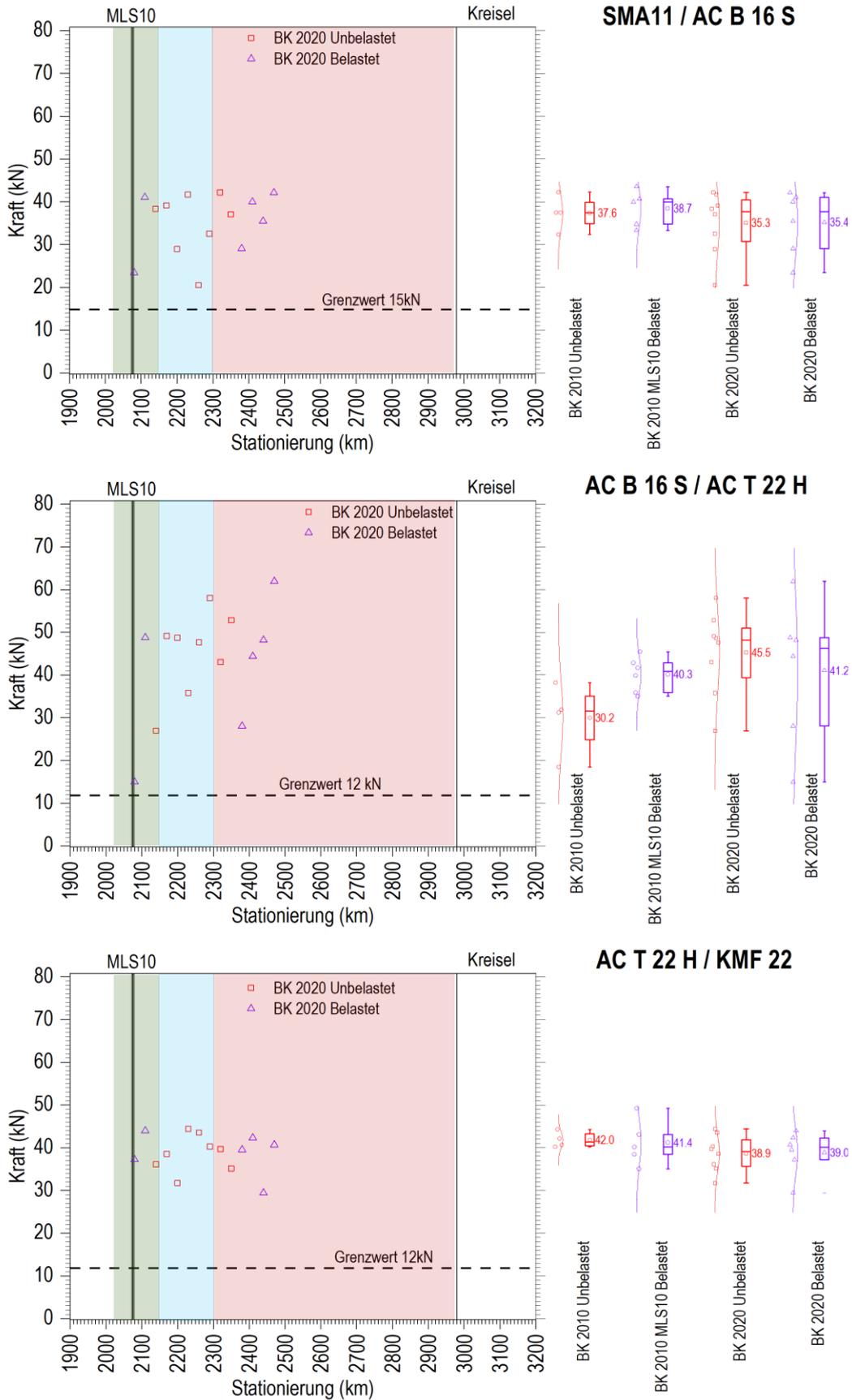


Abbildung 39: Gemessene Scherkräfte entlang des Streckenabschnittes im Jahr 2020

Modulbestimmung im Spaltzugversuch

Das Elastizitätsmodul und Phasenwinkel der Asphaltsschichten von 4 Bohrkernen aus der Rollspur und von 4 Bohrkernen aus der Fahrbahnmitte wurden mittels der indirekten Zugversuchsprüfungen gemäss EN 12697-26 [74] ermittelt und die Ergebnisse sind in Abbildung 41 dargestellt. In Abbildung 42 sind die aus den befahrenen und unbefahrenen Bohrkernen bei 20 °C ermittelten Masterkurven dargestellt.

Betrachtet man die Werte der befahrenen Bohrkern der Deckschicht SMA11 fallen diese etwas höher aus als diejenigen der unbefahrenen Bohrkern. Dies könnte auf eine Verdichtung durch den Verkehr hinweisen. In den restlichen Schichten ist dagegen kein Unterschied erkennbar. Ein Vergleich der Masterkurven zeigt, dass die elastischen Module der Deckschicht und der Binderschicht bei kleinen Frequenzen (quasi statische Belastung) im befahrenen Bereich zugenommen haben, während die elastischen Module der Tragschicht auch bei tieferen Frequenzen durch die Verkehrsbelastung dagegen abgenommen haben.

Bestimmung der Ermüdungsbeständigkeit

Die Ermüdungsbeständigkeit der verschiedenen Schichten wurde an je 4 Bohrkernen aus der Rollspur und 4 Bohrkernen aus die Fahrbahnmitte mit der Indirekten Zugprüfung bei einer Temperatur von 20°C nach EN 12697-24 [75] bestimmt. Die Belastung der Probekörper wurde in Form einer kraftgeregelten, harmonischen Sinusschwellbelastung ohne Lastpausen und mit einer Belastungsfrequenz von 10 Hz aufgebracht. Die in Abbildung 43 dargestellten Ermüdungsfunktionen zeigen keinen eindeutigen Unterschied zwischen belasteten und unbelasteten Prüfkörper.

Verformungsverhaltens bei Wärme

Die Beständigkeit der verschiedenen Schichten gegen verbleibende Verformungen wurde an 2 Bohrkernen aus der Rollspur und an 1 Bohrkern aus der Fahrbahnmitte mit dem Druckschwellversuch bei einer Temperatur von 60°C bestimmt (siehe Abbildung 40). Als Belastung wurde eine gleichmässig verteilte haversine-impulsförmige Druckschwellbelastung mit Lastpausen aufgebracht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 44 grafisch dargestellt.

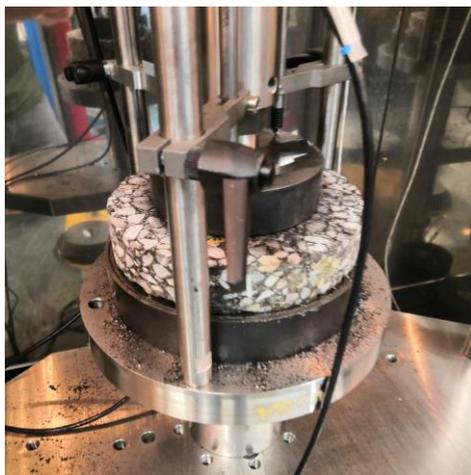


Abbildung 40: Ansicht des Druckschwellversuch Setups

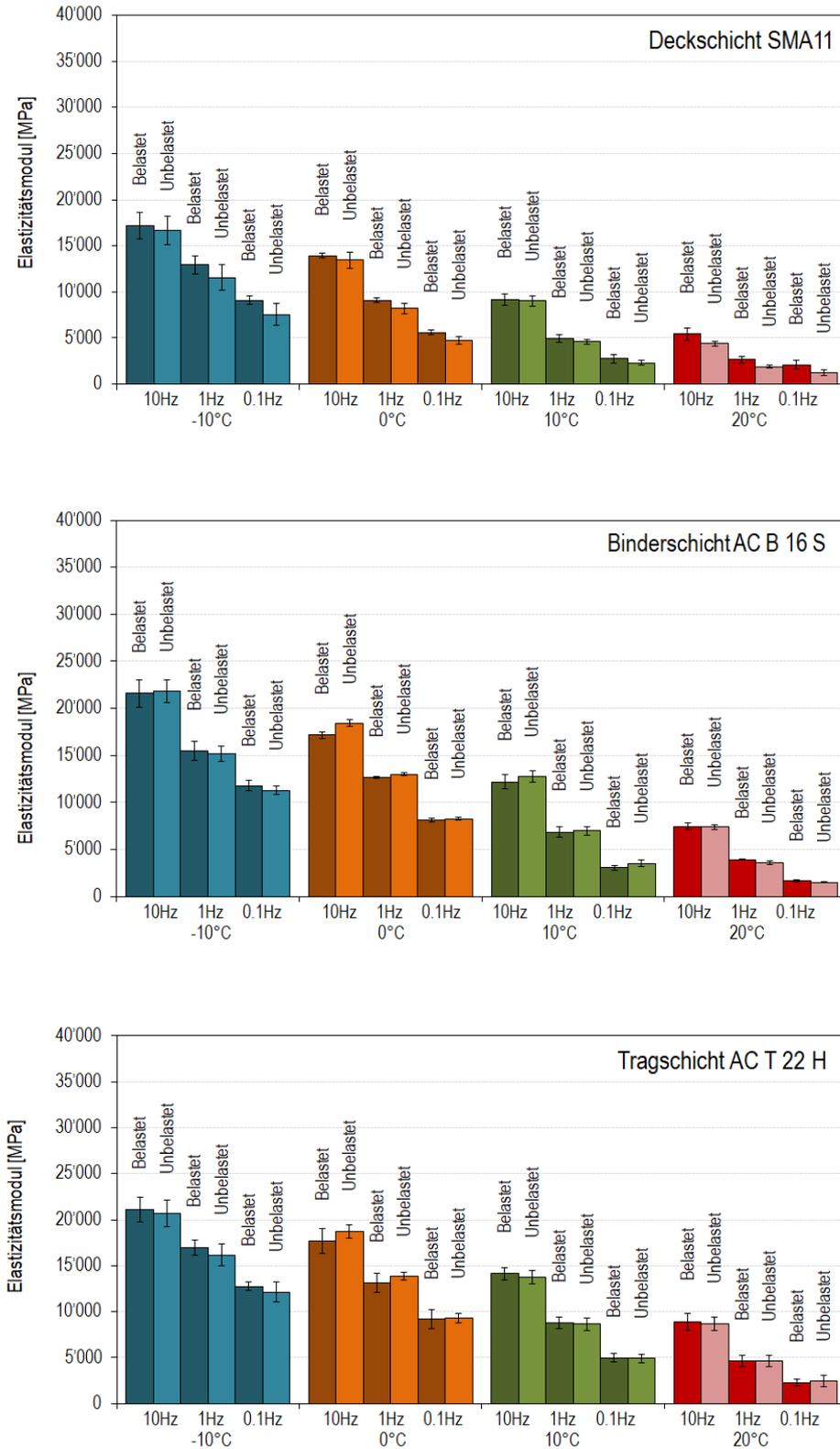


Abbildung 41: Gemessene Elastizitätsmodule bei verschiedenen Temperaturen und Belastungsfrequenzen

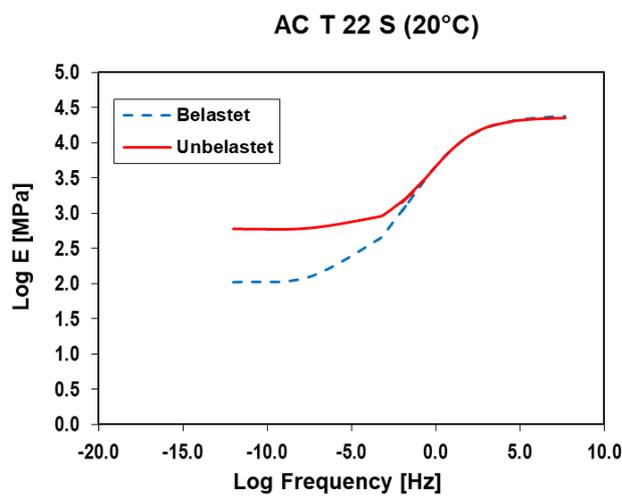
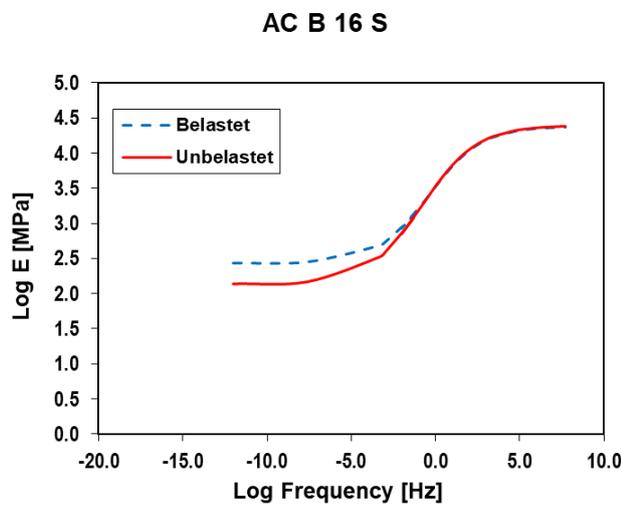
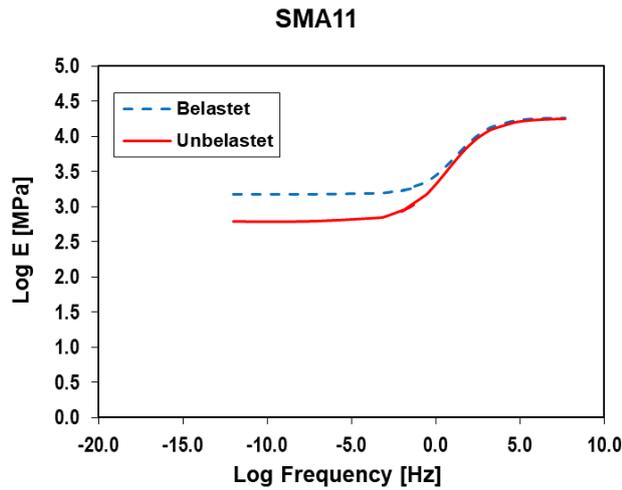


Abbildung 42: Masterkurven bei 20°C für belastete und unbelastete Bohrkerne aus allen untersuchten Schichten

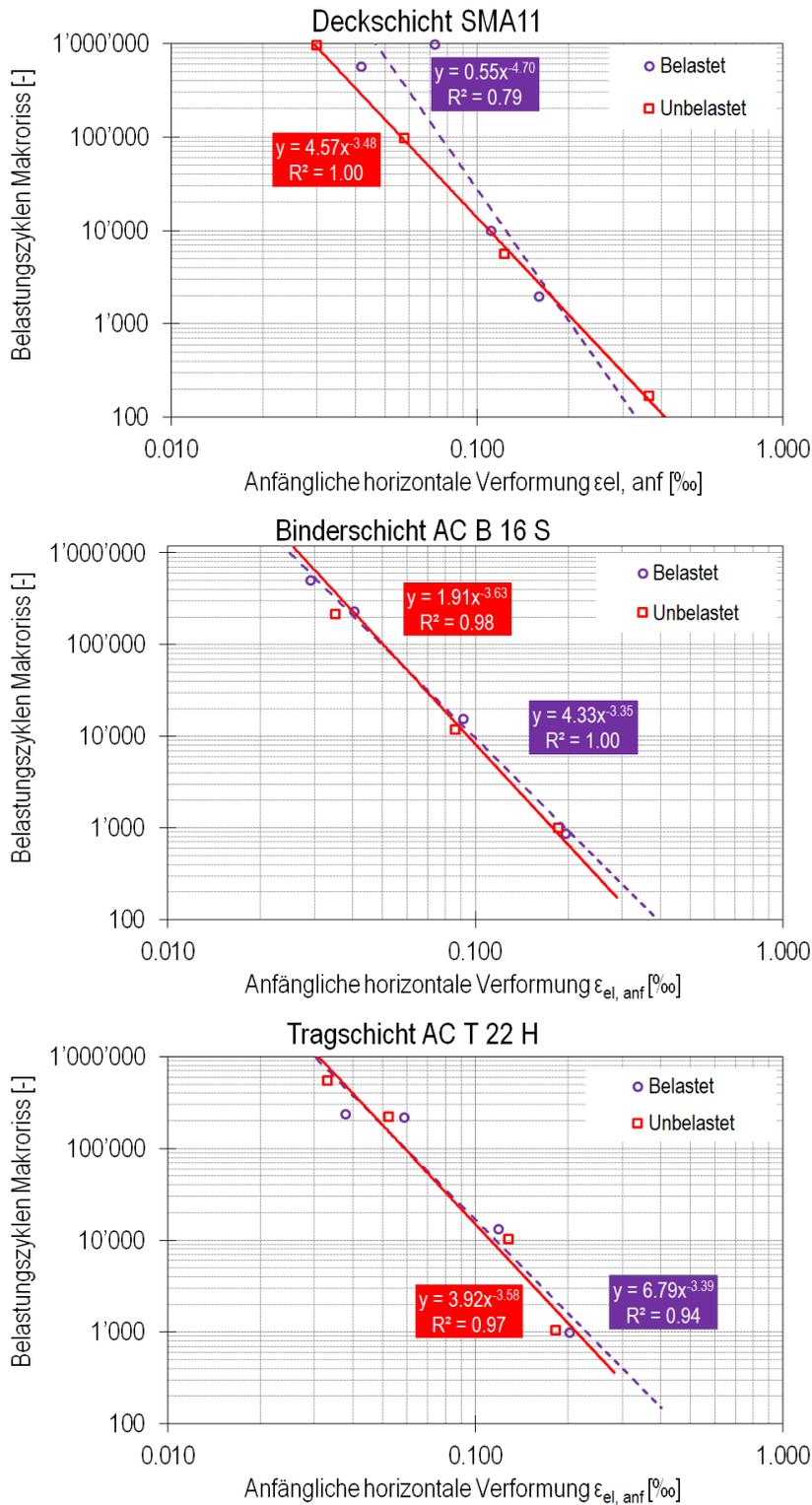


Abbildung 43: Ermüdungsfunktionen aus den belasteten und unbelasteten Asphaltschichten

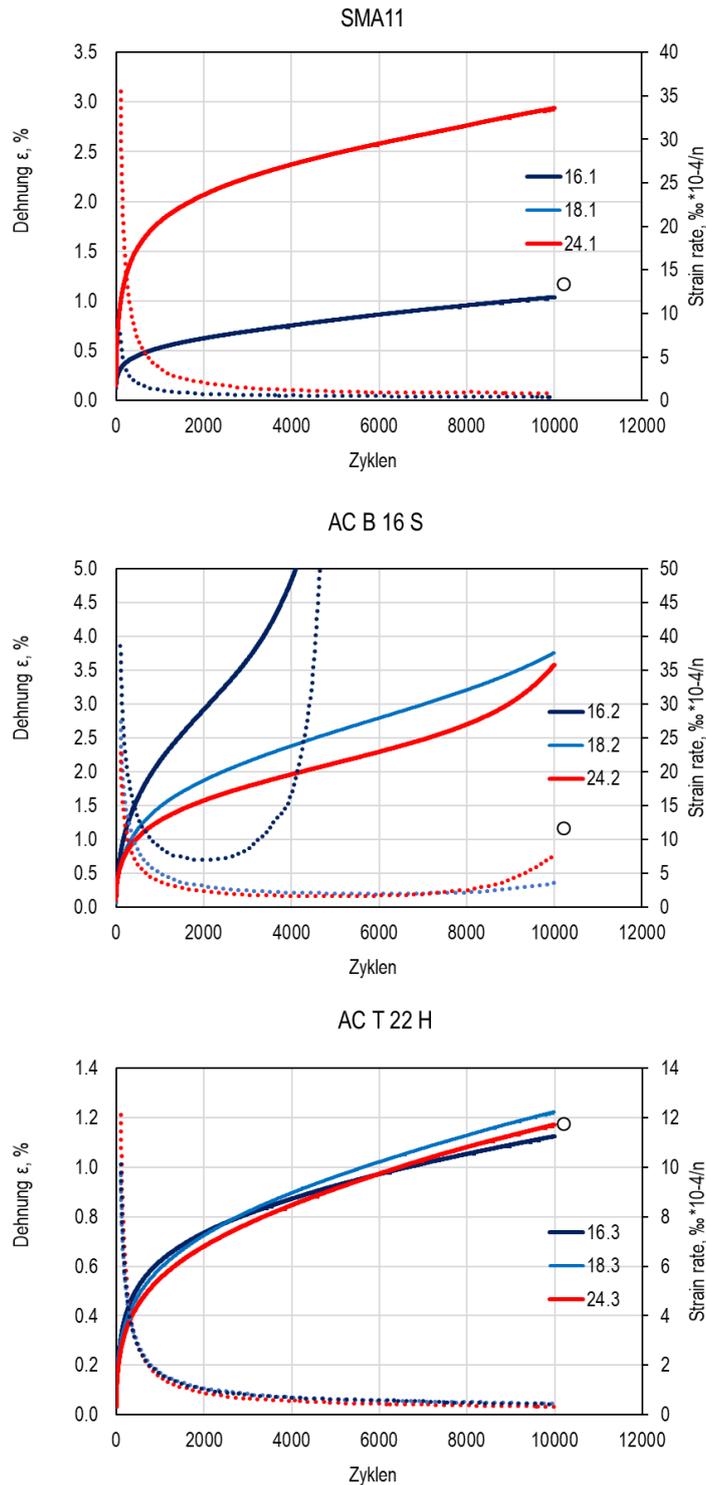


Abbildung 44: Dehnung der getesteten Prüfkörper

5.3.4 Verkehrsdaten

Die Verkehrsmengen entlang des untersuchten Streckenabschnittes der Staffeleggstrasse wurden anhand von Zählschleifen im Bereich des Horentaltunnels erhoben. Da diese Daten keine Fahrzeugklassifizierung beinhalteten, wurden die Anteile des Schwerverkehrs mit Hilfe von Simulationsdaten aus dem kalibrierten Verkehrsmodell 2015 ermittelt. Angaben zur zeitlichen Entwicklung der Verkehrsmengen und -zusammensetzung wurden aus benachbarten Zählstellen des ASTRA nördlich des Kreisverkehrs entnommen und

liegen für die Jahre 2010 bis 2017 vor. Abbildung 45 zeigt die Zunahme der Verkehrsbelastung auf dem betrachteten Streckenabschnitt seit 2010 und die kumulierte äquivalente Verkehrslast (ESAL).

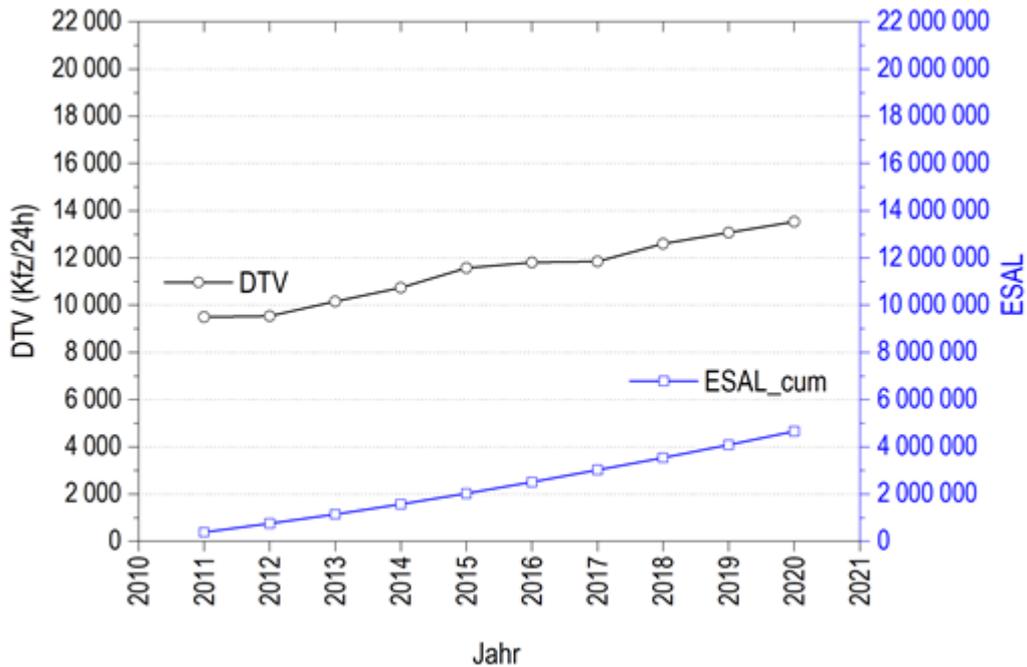


Abbildung 45: Entwicklung der Verkehrsbelastung im Bereich des Streckenabschnittes

5.3.5 Zustandsdaten

Der Oberflächenzustand der Versuchsstrecke wurde in den Jahren 2013, 2017 und 2020 im Rahmen von Zustandserfassungen und -bewertungen aufgenommen. Im Folgenden ist die zeitliche Entwicklung der Oberflächenmerkmale am Beispiel der Längs- und Querebenheit dargestellt.

Längsebenheit

In Bezug auf die Längsebenheit ist im Vergleich zwischen 2013 und 2020 eine leichte Verschlechterung über den gesamten Streckenabschnitt zu erkennen. Hierbei haben sich vor allem die bereits 2013 auffallenden Bereiche weiter verschlechtert. Abbildung 46 zeigt die gemessenen Längsunebenheiten entlang des Streckenabschnittes für verschiedene Erfassungszeitpunkte.

Querebenheit

Die Auswertung der Daten der Querprofilierung zeigt eine allmähliche Verschlechterung der Querebenheit zwischen den Jahren 2013 und 2020. Während die beiden Zustandserfassungen 2013 und 2017 vergleichbare Unebenheiten im Querprofil zwischen ca. 1,0 mm und 2,5 mm aufweisen, zeigen sich anhand der Daten aus 2020 über den gesamten Streckenabschnitt zunehmende Spurrinntiefen von bis zu 6,0 mm. Abbildung 47 zeigt die gemessenen Spurrinntiefen entlang des Streckenabschnittes für verschiedene Erfassungszeitpunkte.

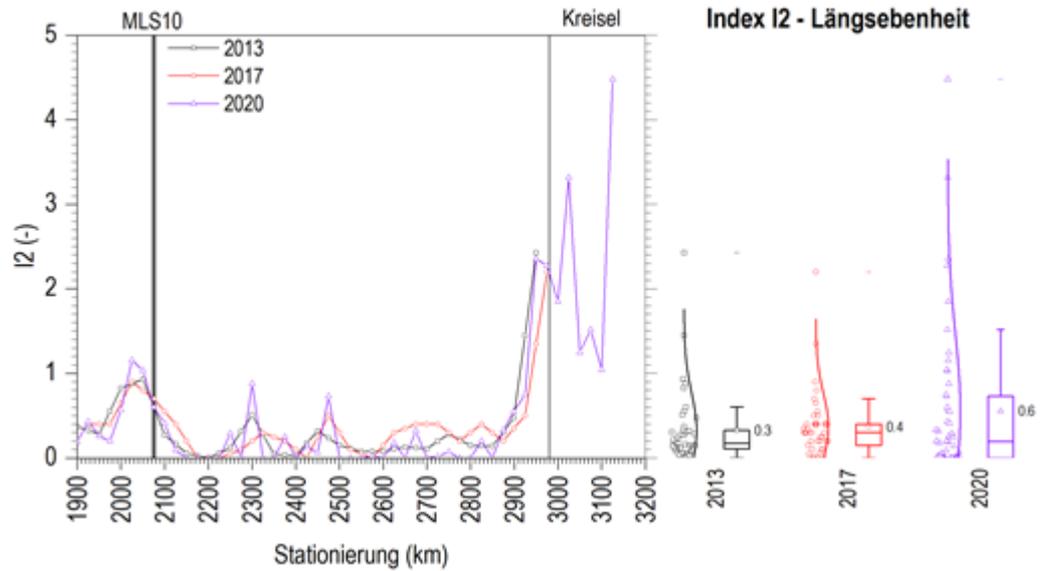


Abbildung 46: Zeitlicher Verlauf der Längsebenheit im Verlauf des Streckenabschnittes

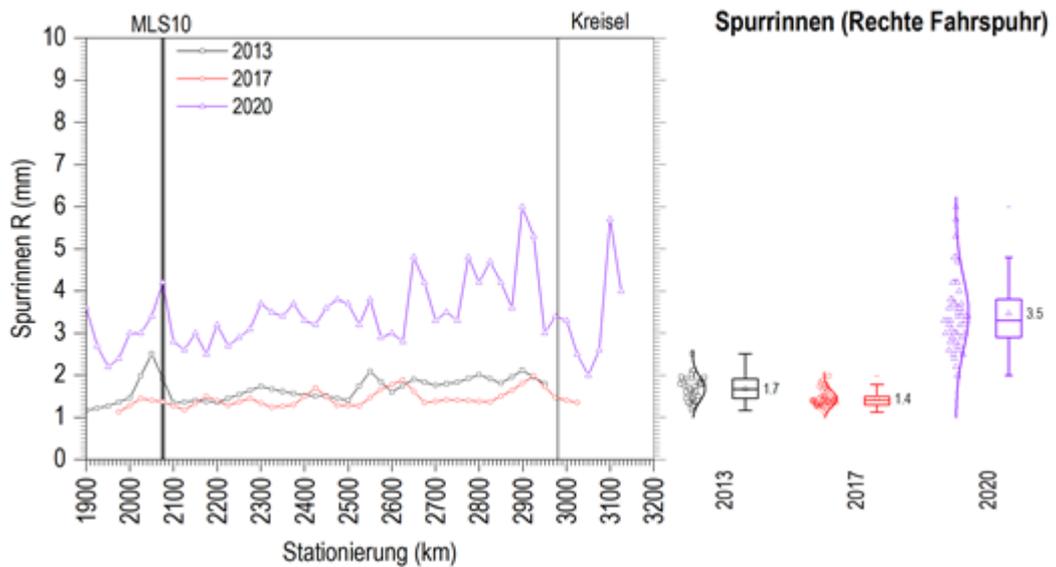


Abbildung 47: Zeitlicher Verlauf der Querebenheit im Verlauf des Streckenabschnittes

5.4 Kapitelzusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Versuchsstrecken sowie die damit verbundene Datengrundlage vorgestellt. Es wurden sowohl der Umfang als auch die Qualität der erhobenen Daten erläutert. Neben der Erfassung und Bewertung des Zustands der Fahrbahnoberfläche wurden Aufbaudaten, materialbezogene Daten und Verkehrsdaten erfasst. Die vorliegenden Daten dieser Versuchsstrecken erlauben die Integration von Materialuntersuchungen in die Zustandsprognose, was im folgenden Kapitel analysiert werden soll.

Es zeigt sich, dass die Datenlage zum Zustand der Fahrbahnoberfläche in Datenbanken meist historisiert zur Verfügung stehen. Damit stehen diese Daten maschinenlesbar für netzweite Analysen zur Verfügung. Ein erstes Defizit zeigt sich bei den Aufbau- bzw. Schichtendaten. Diese für die Modellentwicklung notwendigen Daten sind aktuell bei den

meisten Strassenbetreibern nicht flächendeckend, sondern nur sehr lückenhaft vorhanden. Auch werden oft ausgeführte Erhaltungsmassnahmen nicht ausreichend dokumentiert. Die vorhandenen Projektdaten von Bohrkernuntersuchungen, welche Aufschluss über die Ergebnisse der Kontrollprüfungen von Material und Schichteneinbau geben, werden nicht kompatibel zur Strassendatenbank referenziert und meist auch nicht digital abgelegt. Eine Analyse von Zusammenhängen durch netzweite statistische Auswertungen ist somit nicht möglich.

6 Methoden zur Nutzung von Materialuntersuchungen bei Prognosemodellen

Wie in Kapitel 2.3.3 erwähnt, kann mithilfe von Labor- oder In-Situ-Prüfungen eine Prognose der Dauerhaftigkeit und Lebensdauer einer Asphaltbefestigung erfolgen. Für die Entwicklung von aussagekräftigen Prognosemodellen sind daher Materialuntersuchungen von grosser Bedeutung. Allerdings erfordern Performance-Prüfungen an Asphaltprobekörpern einen hohen Zeit- und Kostenaufwand [76]. Die Asphalt-Performance wird jedoch massgeblich durch das verwendete Bindemittel (und den entsprechenden Füller) bestimmt [77, 17]. Dabei wird insbesondere das Alterungsverhalten durch das Bindemittel Bitumen beeinflusst (vgl. Kapitel 2.3.2).

Über Prüfungen allein an dem Bindemittel können bereits vielseitige Informationen hinsichtlich der Dauerhaftigkeit und möglichen Schadensmechanismen abgeleitet werden. Für derartige Prüfungen wird nur sehr wenig Material benötigt, sodass auch Proben aus den in Kapitel 5.2 und 5.3 beschriebenen Versuchsstrecken berücksichtigt werden können. Dafür können verschiedene konventionelle und rheologische Prüfverfahren in Kombination mit simulierter Bitumenalterung zur Anwendung kommen, welche in den nachfolgenden Kapiteln detailliert erläutert werden.

Zur Berücksichtigung der Verkehrsbelastung kommt im Rahmen dieses Projekts zusätzlich die Grossversuchsanlage MLS-10 zum Einsatz, welche ebenfalls nachfolgend beschrieben ist.

6.1 Konventionelle Bitumenprüfungen

Die konventionellen Bitumenprüfungen sind seit vielen Jahren fester Bestandteil der Bitumencharakterisierung und -bewertung. Die Verfahrensweise der verschiedenen Prüfungen sind in DIN-Normen festgelegt. Zu den konventionellen Bindemittelprüfungen zählen unter anderem die Nadelpenetration [78] sowie der Erweichungspunkt Ring und Kugel [79].

Die Nadelpenetration dient der Bestimmung der Sortenbezeichnung, indem die Bindemittelhärte ermittelt wird. In Abbildung 48 ist die Vorgehensweise der Prüfung schematisch dargestellt. Eine genormte Nadel dringt vertikal mit einer Belastung von 100 g bei einer Temperatur von 25 °C in eine Bitumenprobe für fünf Sekunden ein. Das Ergebnis ist der zurückgelegte Weg der Nadel in 1/10 mm (bis maximal 500 1/10 mm). Das Strassenbaubitumen 50/70 weist beispielsweise einen Nadelpenetrationswert zwischen 50 und 70 1/10 mm auf [17].

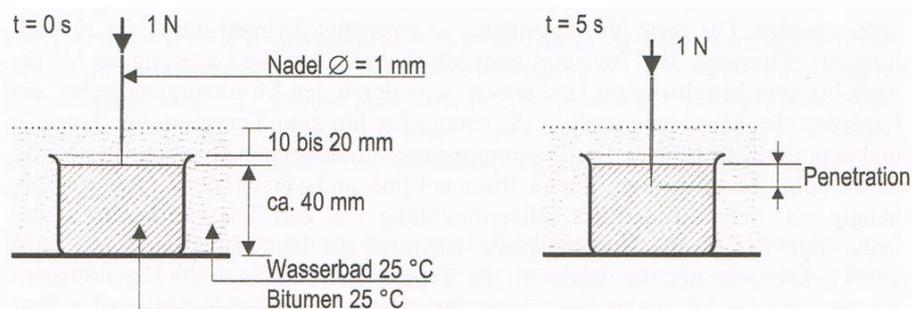


Abbildung 48: Schematische Durchführung der Nadelpenetration zur Bestimmung der Bindemittelhärte nach DIN EN 1426 [12]

Mithilfe des Erweichungspunkts Ring und Kugel wird die Temperatur bestimmt, bei der eine bestimmte Verformung eintritt und sie stellt gleichzeitig die obere Grenze der Gebrauchstemperatur dar. Die Durchführung der Prüfung ist in Abbildung 49 abgebildet.

Je eine Stahlkugel (3,4 g) wird auf insgesamt zwei Bitumenschichten, die in Messingringe gegossen und erhärtet sind, gelegt und um 5 °C pro Minute in einem Flüssigkeitsbad erwärmt. Der arithmetische Mittelwert jener Temperaturen, bei denen die Bitumenproben soweit erweicht sind, dass sich ein Bitumensack ausbildet und dieser eine Strecke von $25 \pm 0,4$ mm zurück legt, ist der Erweichungspunkt. Für polymermodifizierte Bitumen wird der Erweichungspunkt zur Kennzeichnung der Sorte verwendet (25/55-55 weist einen Erweichungspunkt von mindestens 55 °C auf) [17].

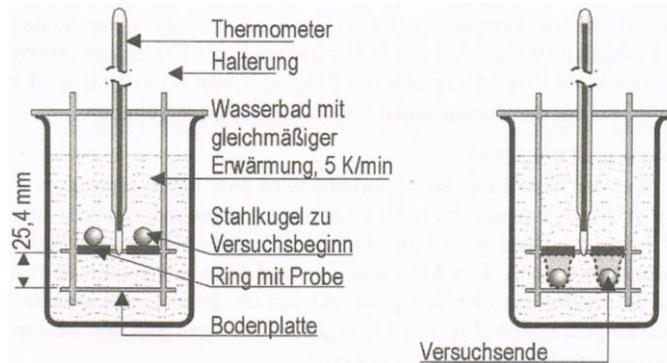


Abbildung 49: Schematische Durchführung des Erweichungspunkt Ring und Kugel nach DIN EN 1427 [12]

Seit einigen Jahren sind Veränderungen am Bindemittelmarkt festzustellen. Zum einen werden Bitumen immer weniger in ihrer Reinform eingesetzt, sondern vielmehr polymermodifizierte Bitumen (PmB) und Bindemittel versetzt mit z. B. Wachsen oder Rejuvenatoren. Zum anderen werden Mehrfachmodifikationen und -recycling immer häufiger durchgeführt. Konsequenzen daraus sind, unter anderem, dass die Zusammensetzung und die Eigenschaften von Bindemitteln immer komplexer werden. Das führt dazu, dass die konventionellen Prüfverfahren an ihre Grenzen stoßen und zunehmend an Aussagekraft verlieren, da die Bindemittelbewertung unzuverlässig wird und die Qualitätsbewertung nur schwer möglich ist [17].

Die Klassifizierung von Bindemittel soll künftig nicht mehr auf Penetration, Erweichungspunkt Ring & Kugel, Brechpunkt nach Fraass etc., sondern auf dynamische Schubmodulwerte, Kriechkennwerte und Zugfestigkeiten in gealtertem und nicht gealtertem Zustand abgestützt werden. Zudem werden immer häufiger analytische Methoden zur Charakterisierung verschiedener Bindemittel mit Hilfe von «Fingerabdrücken» routinemässig eingesetzt.

6.2 Rheologische Bitumenprüfungen im Dynamischen Scherrheometer (DSR)

Das Dynamische Scherrheometer (DSR), das in den 1990er Jahren im Rahmen des amerikanischen Strategic Highway Research Programs (SHRP) für Bitumenprüfungen eingeführt wurde, ist ein Messgerät, das auf eine Materialprobe eine Scherdeformation aufbringt, damit deren Fließ- und Verformungsverhalten gemessen werden kann. Im DSR können unterschiedlichste Messgeometrien eingesetzt werden (siehe Abbildung 50) und es ist möglich statische sowie dynamische Untersuchungen scherdeformations- oder schergeschwindigkeitsgeregelt durchzuführen [17]. Im Projekt mapFALKE werden ausschliesslich die 4 mm, 8 mm und 25 mm Platte/Platte Geometrien verwendet.

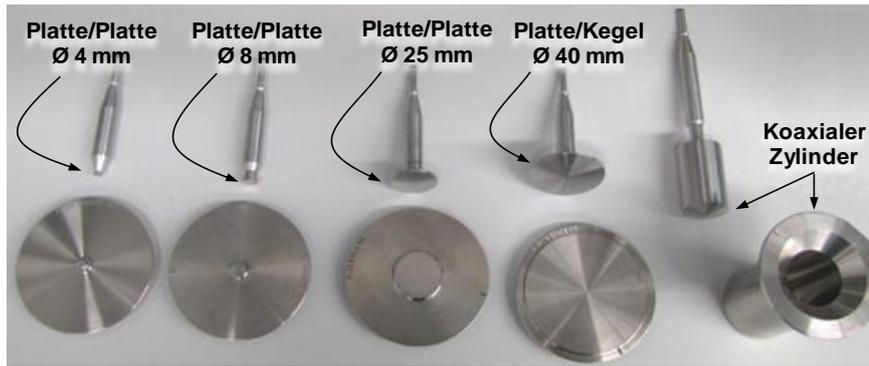


Abbildung 50: 4 mm, 8 mm und 25 mm Platte/Platte-, 40 mm Platte/Kegel- und koaxialer Zylinder- Messgeometrien für das DSR [76].

Abbildung 51 zeigt die prinzipielle Funktionsweise des DSR. Während die untere Platte stillsteht, kann die obere Platte oszillieren (oder auch rotieren) und somit entweder eine Spannung oder eine Deformation aufgebracht werden, gleichzeitig wird der jeweils andere Parameter gemessen.

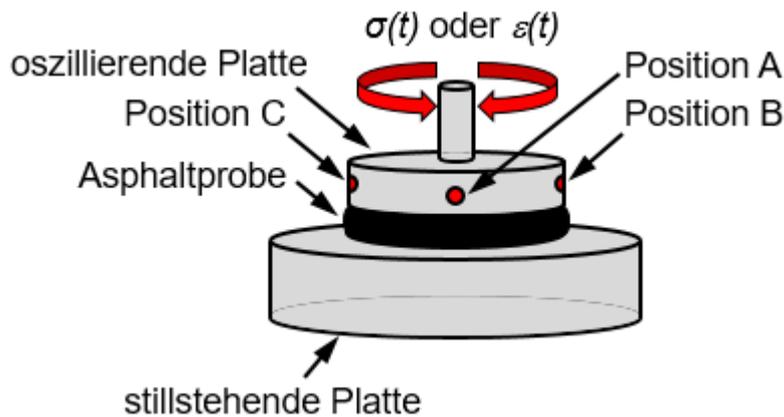


Abbildung 51: Prinzipielle Funktionsweise des DSR [76].

Die Wahl der Messgeometrie ist abhängig von der Prüftemperatur, da die Steifigkeit der bitumenhaltigen Bindemittel stark temperaturabhängig ist. Die Platte/Platte Geometrie mit 4 mm Durchmesser findet im Temperaturbereich von -40 bis 10 °C, die 8 mm von -10 bis 40 °C und die 25 mm von 30 bis 90 °C Anwendung [80]

6.2.1 Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren (BTSV)

Mit dem Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren (BTSV) können Bitumen im hohen Temperaturbereich rheologisch differenziert werden. Es ist in Deutschland ein genormtes Prüfverfahren nach [81], hat aber auch schon vereinzelt Anwendung in der Schweiz und Österreich gefunden.

Die Prüfung wird im DSR mit der 25 mm Platte/Platte-Geometrie und 1 mm Spaltabstand durchgeführt. Im Oszillationsmodus bei einer Frequenz von 1,59 Hz, wird die Probe mit einer Belastung von 500 Pa belastet. Die Spannungsregelung garantiert dabei eine Beanspruchung im linear-viskoelastischen (LVE) Bereich. Die Temperatur wird kontinuierlich mit einer Temperaturrate von 1,2 K/min im Bereich von 20 bis 90 °C erhöht. Somit ergibt sich eine maximale Prüfdauer von ca. 60 min. Während der Prüfung werden der komplexe Schermodul (G^*) und der Phasenwinkel durchgehen aufgezeichnet. Das Ergebnis des BTSV ist jene Temperatur (T_{BTSV}), bei der der komplexe Schermodul auf einen Wert von $G^* = 15 \text{ kPa}$ abfällt. Des Weiteren wird der dazugehörige Phasenwinkel

(δ_{BTSV}) bei dieser Temperatur bestimmt. Die Ermittlung der beiden Ergebnistemperaturen ist in Abbildung 52 beispielhaft dargestellt [17].

Das Prüfverfahren dient, wie der Erweichungspunkt Ring und Kugel, der Bindemittelklassifizierung, ist jedoch, im Gegensatz zum Erweichungspunkt Ring und Kugel, auch zuverlässig für komplexe Bitumen einsetzbar [17].

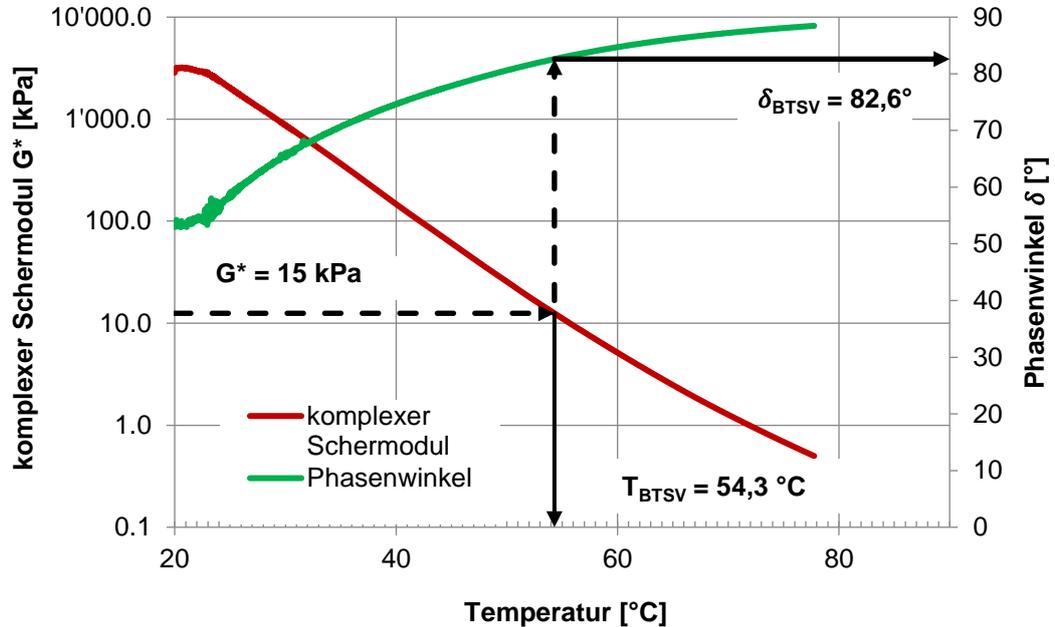


Abbildung 52: Beispielhafte Darstellung zur Ermittlung der Temperatur T_{BTSV} und dem zugehörigen Phasenwinkel δ_{BTSV} bei definierter rheologischer Eigenschaft ($G^* = 15 \text{ kPa}$) [17].

6.2.2 Performance Prüfungen

Am ISBS wurden zur gebrauchsverhaltensorientierten Prüfung von bitumenhaltigen Bindemitteln drei verschiedene Performance Prüfungen am DSR für den oberen, mittleren und unteren Gebrauchstemperaturbereich entwickelt (Arbeitsanleitungen siehe [82]). Somit können nach ISBS-Spezifikation Bindemittel- und Mastixproben mittels Relaxationsprüfung im unteren Gebrauchstemperaturbereich, mittels Ermüdungsprüfung im mittleren Gebrauchstemperaturbereich und mittels Verformungsprüfung im oberen Gebrauchstemperaturbereich zuverlässig charakterisiert werden. Alle Prüfungen werden ausserhalb des visko-elastischen Bereichs (LVE-Bereich) durchgeführt, um eine Materialschädigung zu simulieren.

Relaxationsverhalten – unterer Gebrauchstemperaturbereich

Die Relaxationsprüfung wird mit der 4 mm Platte/Platte Geometrie, einem Plattenabstand von 2 mm, im Kriechmodus bei einer konstanten Deformation (0,1 %) sowie einer konstanten Prüftemperatur (-15 und -20 °C) durchgeführt. Während der Prüfdauer von 60 min fällt die aus der Deformation resultierende Scherspannung durch Spannungsrelaxation langsam ab. Das Ergebnis ist der zeitliche Abfall der resultierenden Scherspannung als Kennwert für die Relaxationsfähigkeit des Materials (Scherspannungsrelaxation nach 60 min) (siehe Abbildung 53). Für eine detaillierte Erläuterung und eine Arbeitsanleitung der Ermüdungsprüfung wird auf [82] verwiesen.

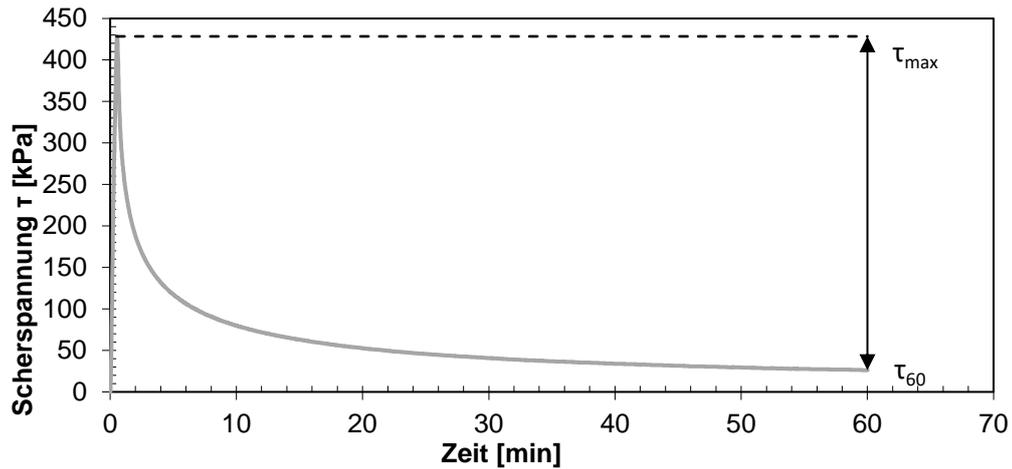


Abbildung 53: Verlauf der Scherspannung über die Zeit zur Bestimmung der Scherspannungsrelaxation nach 60 min als Kennwert der Relaxationsprüfung [82].

Ermüdungsverhalten – mittlerer Gebrauchstemperaturbereich

Die Ermüdungsprüfung wird mit der 8 mm Platte/Platte Geometrie, 2 mm Plattenabstand, im Oszillationsmodus bei 10 Hz (zur Simulation des Schwerverkehrs) und einer Prüftemperatur von 10 und 20 °C durchgeführt. Die Prüfung startet mit einer Scherspannung von 50 kPa, welche alle 1.000 Lastwechsel um 10 kPa erhöht wird. Die dauerhafte Beanspruchung auf Scherung erfolgt bis zum Bruch des Materials. Die Energy Ratio wird aus dem komplexen Schermodul und der Anzahl der Lastwechsel berechnet und gibt die dissipierte Energie während der Prüfung an. Das Maximum der Energy Ratio ist nach [83] der Ermüdungszeitpunkt. Über das Maximum der Energy Ratio können die Lastwechsel bis zur Materialermüdung (N_{Rowe}) bestimmt werden (siehe Abbildung 54). Für eine detaillierte Erläuterung und eine Arbeitsanleitung der Ermüdungsprüfung wird auf [82] verwiesen.

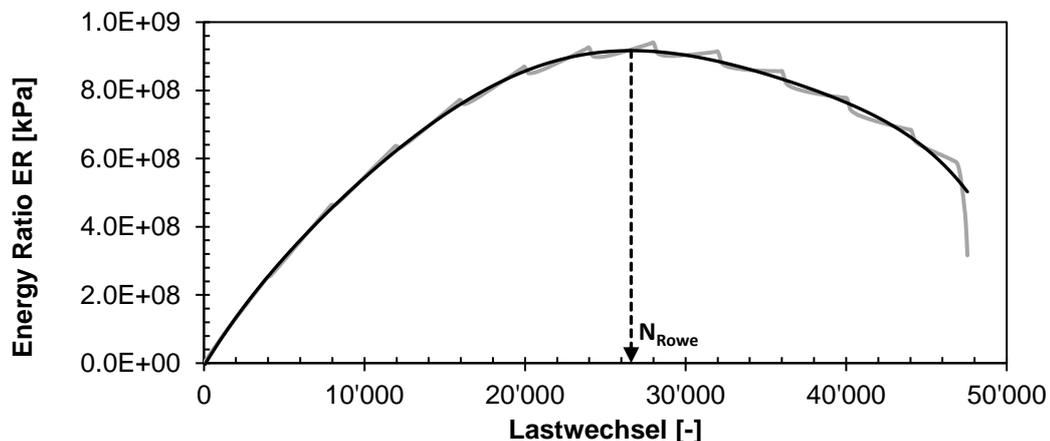


Abbildung 54: Verlauf der Energy Ratio über die Anzahl der Lastwechsel zur Bestimmung der Lastwechsel bis zur Materialermüdung (Kennwert: N_{Rowe}) im Rahmen der Ermüdungsprüfung [82].

Verformungsverhalten – hoher Gebrauchstemperaturbereich

Die Verformungsprüfung wird mit der 25 mm Platte/Platte Geometrie mit einem Plattenabstand von 1 mm durchgeführt. Die Prüfung erfolgt im Kriechmodus bei einer konstanten Scherspannung von 0,1 kPa und einer Prüftemperatur von 60 °C. Aus der konstanten Scherspannung resultiert eine Deformation, über deren zeitlichen Verlauf das Kriechverhalten des Materials bewertet werden kann (siehe Abbildung 55). Nach einer gewissen Zeit stellt sich ein Zustand stationären Fließens ein, von dem die Kriechrate als

charakteristischer Materialkennwert abgeleitet werden kann. Für eine detaillierte Erläuterung und eine Arbeitsanleitung der Kriechprüfung wird auf [82] verwiesen.

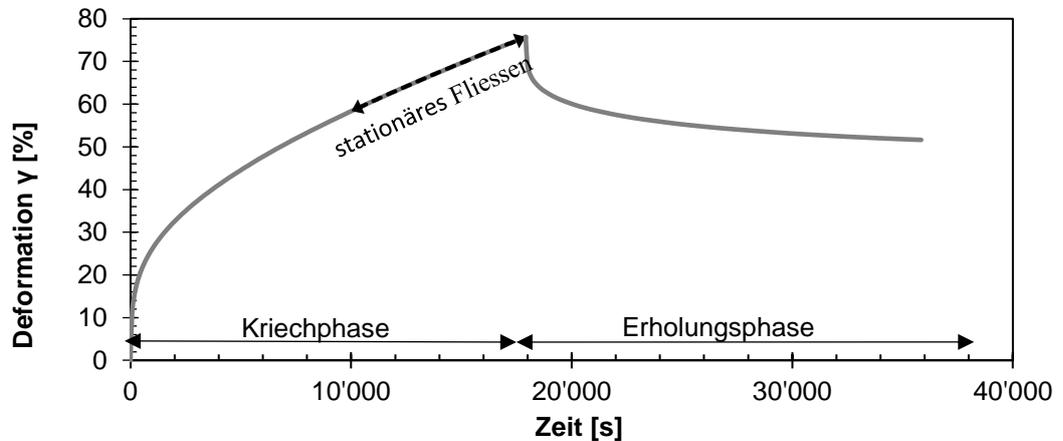


Abbildung 55: Verlauf der Deformation über die Zeit zur Bestimmung der Kriechrate im Bereich des stationären Fließens im Rahmen der Verformungsprüfung [82].

6.3 Simulation der Bitumenalterung

Zur Simulation des Alterungsverhaltens im Labor haben sich auf Bitumenebene zwei Verfahren international etabliert.

Der „Rolling-Thin-Film-Oven-Test“ (RTFOT) nach EN 12607-1 [84] simuliert im Labor die Alterung des Bindemittels, die es im Strassenbau während der Herstellung, der Lagerung, des Transports und der Verarbeitung erfährt. Hierfür rotieren acht, mit einer definierten Bitumenmenge von 35 g gefüllte, runde Glasbehälter in einer Wärmekammer bei 163 °C horizontal um ihre eigene Achse (Abbildung 56, links). Zusätzlich wird während der Rotation heisse Luft in die Öffnung der Glasbehälter eingeblasen. Der in den Gläsern dünne rollende Bitumenfilm oxidiert aufgrund seiner grossen Oberfläche, der Hitze und der eingeblasenen Luft stark und ändert so seine Eigenschaften. Nach einer Alterungsdauer von 75 Minuten bei konstanter Temperatur ist die RTFOT-Alterung abgeschlossen.



Abbildung 56: RTFOT-Ofen (links) und PAV-Druckalterungsbehälter (rechts).

Zur Simulation der Langzeitalterung nach dem Einbau des Asphalts wird das Laboralterungsverfahren „Pressure Aging Vessel“ (PAV) nach EN 14769 [85] angewandt. Das PAV besteht aus einem Druckalterungsbehälter mit angeschlossener Druckluftversorgung (Abbildung 56, rechts). Das Bitumen wird in flachen Metallschalen einer Temperatur von $(90 \pm 1) ^\circ\text{C}$ und einem Druck von $(2,1 \pm 0,1) \text{ Mpa}$ über einen

festgelegten Zeitraum von 20 Stunden ausgesetzt, was den Alterungsprozess simulieren soll, den das Bindemittel während der durchschnittlichen Asphaltliegedauer von ca. 5 bis 10 Jahren erfährt. Durch den konstant einwirkenden Druck bilden sich kleine Lufteinschlüsse, die die Oxidation des Bitumens fördern und durch eine, der PAV-Alterung angeschlossen, Erhitzung des Bitumens im Ofen bei 170 °C über 30 Minuten wieder entfernt werden.

Seit einigen Jahren wird die mehrfache Laboralterung (sowohl RTFOT als auch PAV) immer häufiger [86 bis 89] angewandt. Mit dem Bitumen-Typisierung-Schnell-Verfahren (BTSV) kann beobachtet werden, dass die Änderungen infolge Alterung einem linearen Trend folgen. Alisov [90] stellte mithilfe des BTSV fest, dass eine reale Bindemittelverhärtung nach 17 Jahren etwa 2x – 3x RTFOT bzw. 1x PAV entspricht. Da die Feldalterung jedoch von vielen individuellen Faktoren wie z. B. klimatische Variablen (Temperatur, Ultraviolette-Strahlung, Luftfeuchtigkeit, etc.) und Materialvariablen (Bindemittel, Hohlraumgehalt, etc.) abhängig ist [86, 87, 91], ist es nicht möglich pauschal festzulegen, wie viele Jahre Liegedauer einer Alterungsstufe (z. B. 1x PAV) entsprechen. In der Literatur sind beispielsweise Kennwerte zu finden, die von ca. 2 bis 10 Jahren für 1x PAV reichen [86, 87, 91, 92].

6.4 Belastungsversuche

Wie in Kapitel 5.3.2 beschrieben, ist es mit Accelerated Pavement Testing (APT) möglich, einen Belagsaufbau unter realistischen Bedingungen, aber in einem begrenzten Zeitraum zu prüfen. Mit dem MLS10 der Empa wurden zwischen 2007 und 2016 insgesamt 49 verschiedene Typen von Asphaltbelägen und Pflästerungen getestet. Die meisten Tests wurden durchgeführt, um die Schadensentwicklung verschiedener Strukturen aus unterschiedlichen Materialien unter realistischen rollenden Reifen zu messen. Aber es wurden auch andere Versuche durchgeführt, beispielsweise um die erforderliche Abkühlzeit einer Asphaltdecke vor der Verkehrsfreigabe zu ermitteln, oder um die Schädigung verschiedener Arten von Weight in Motion (WIM) Anlagen festzustellen. Im Rahmen des Projekt MapFalke wurden nur Asphaltbeläge in Betracht gezogen. Eine zusätzlich wichtige Voraussetzung war, dass bei den berücksichtigten Projekten vollständige periodische Riss- und Spurrinnenmessungen vorhanden waren, um den Schadensverlauf in Abhängigkeit der Belastung quantifizieren zu können.

Zur Identifikation von Rissen und anderer struktureller Schädigungen wurden periodisch visuelle Inspektionen der Belagsoberfläche durchgeführt. Die detaillierten Inspektionen zeigten, dass durch die Belastung Wasser an die Belagsoberfläche gelangte, wodurch kapillare Risse entdeckt werden konnten, die mit bloßem Auge nicht sichtbar waren. Diese Risse wurden dann von Hand mit weißer Farbe markiert (vgl. Abbildung 57) und fotografiert.

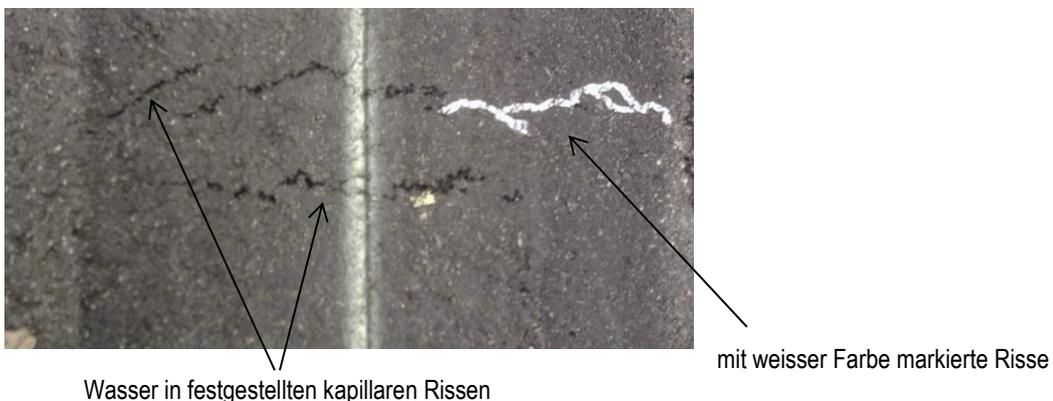


Abbildung 57: Rissermittlung durch visuelle Inspektionen

Die Quantifizierung der Risse wurde durch die Auswertung der Risslänge innerhalb der Fahrspur durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde ein Matlab-Skript geschrieben, mit dessen Hilfe die Länge der weiss markierten Rissen ermittelt werden konnte.

In allen Projekten wurden auch Querprofilmessungen mit einem Profilometer durchgeführt, um so die Spurrinnenbildung und die permanente Deformation des Belags zu erfassen. Das eingesetzte Profilometer besteht aus einem Alubalken mit einem sich darin bewegenden Messrad (vgl. Abbildung 58), welches sich in ständigem Kontakt mit dem Belag entlang eines Trägers bewegt. Der Alubalken liegt an seinen Enden auf höhenverstellbaren Füßen, welche vor Beginn der Messung fixiert werden, um die Referenzhöhe der Messung konstant zu halten. Mit diesem Messsystem können Unebenheiten von bis zu 1mm aufgezeichnet werden. Die Kombination von horizontaler und vertikaler Bewegung ermöglicht es, das Querprofil und dessen Änderungen während des gesamten Testverlaufs zu messen.

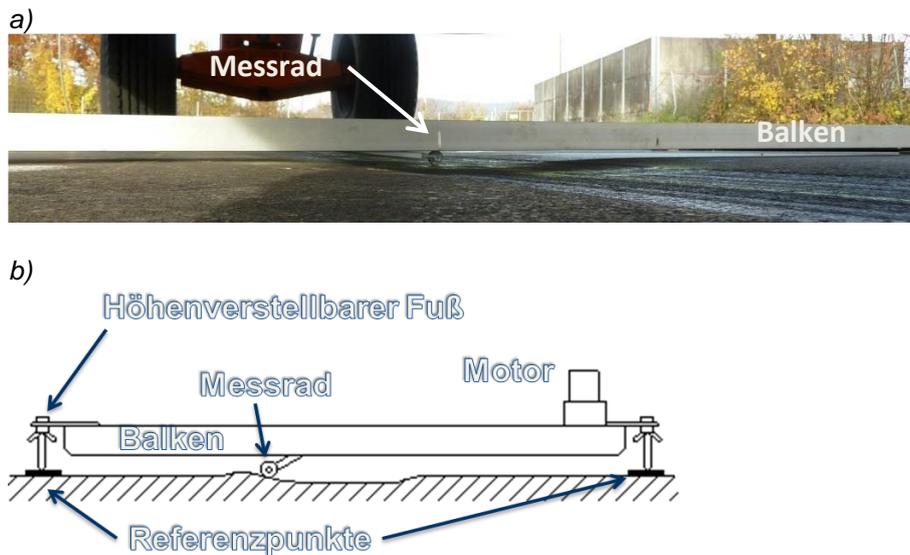


Abbildung 58: Foto des Profilometers zur periodischen Querprofilmessung (a) und schematische Skizze der Messanordnung (b)

Die Messdaten des Profilometers wurden im ASCII-Format auf einem lokalen Rechner gespeichert. Die Datei enthält eine Tabelle mit der Position des Messrades entlang des Balkens und dessen Abstand zur Belagsoberfläche. Die Gesamtmesslänge wurde auf ein Messintervall von 5mm auf 1400mm begrenzt. Die Rohdaten wurden zunächst bereinigt, d.h. es wurden Ausreisser entfernt, welche durch kleine Steine unter dem Messrad entstanden waren. Danach wurden die bereinigten Daten unter Berücksichtigung des 5mm Intervalls gemittelt.

Die erste Messung (Nullmessung) wurde als Referenz gesetzt. Die gemessene Spurrinentiefe widerspiegelt demzufolge die Relation zu dieser Referenz. Um die maximale Spurrinentiefe zu berechnen, wurde zuerst die mittlere Verformung der Fahrspur unter dem Reifen berechnet. Es muss berücksichtigt werden, dass sich aufgrund des Materialtransports zu den Rändern der Spurrinne diese Bereiche über der ursprünglichen Referenzhöhe befinden können. Bei der Berechnung der maximalen Spurrinentiefe wurde diese Anhebung als obere und die gemittelte Eindringtiefe des Belastungsrades als untere Extremität gewählt (siehe Abbildung 59). Dieses Resultat wurde der Anzahl Lastanwendungen des MLS10 gegenübergestellt.

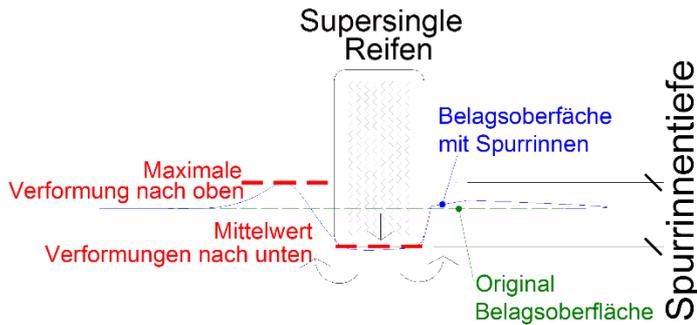


Abbildung 59: Auswertung der Spurrinnentiefe

In allen Projekten wurde auch die Belagstemperatur ermittelt, wobei aber Alterungs- und Witterungseffekte nicht berücksichtigt werden konnten.

6.4.1 Berücksichtigte MLS10 Projekte

Für die Kalibrierung der Prognosemodelle wurden 4 verschiedene MLS10 Teststrecken berücksichtigt, wobei es sich, wie bereits erwähnt, in allen Fällen um Asphaltbeläge handelte und detaillierte Messungen von Oberflächenschäden und Spurrinnen vorhanden waren.

ASTRA 2011/004 Ermittlung der Versagensgrenze eines T2 Norm-Belages mit der mobilen Grossversuchsanlage MLS10 (T2)

Belagsaufbau

Die Teststrecke befand sich auf dem Gelände der Walo Bertschinger AG bei Wimmis im Kanton Bern. Auf dem werkseigenen Areal wurde ein Testfeld (30m x 5m) erstellt. Plattendruckversuche auf dem Planum zeigten, dass der Untergrund eine Tragfähigkeitsklasse S2 aufwies. Darüber wurde gemäss Schweizer Norm VSS 40324 [37] ein Belag der Verkehrslastklasse T2 mit einem Strukturwert (SN) von 75 eingebaut (siehe Abbildung 60). Da sich dieser Aufbau aus Asphaltsschichten auf einem ungebundenen Gemisch befand, handelte es sich um einen Oberbautyp 1 gemäss SN 640 324 und damit nach Norm um eine Verkehrslastklasse T2 und einen Oberbautyp 1, S2. Dieser Belag wird im Folgenden als T2 bezeichnet.

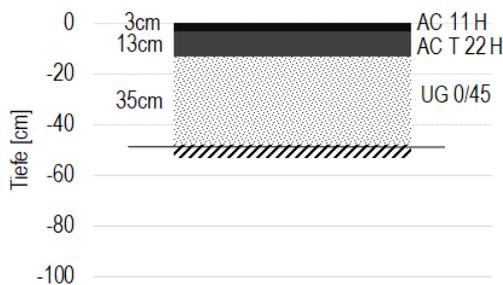


Abbildung 60: Ansicht des T2 Belagsaufbaus

Belastung

Die Last der einzelnen Bogies des MLS10 wurde auf je 65kN festgelegt. Dies entspricht einer totalen Achslast von 130kN. Der Reifendruck wurde auf 10.5bar eingestellt. Zum Einsatz kam eine Super Single Bereifung von Goodyear der Dimension 455/40 R22.5. Die Überrollgeschwindigkeit betrug 22km/h. Die Belastung mit insgesamt 800'000 MLS10 Überrollungen erfolgte im Herbst 2011.

ASTRA 2013/006: Einfluss kanalisierter und nicht kanalisierter Belastung mit der Grossversuchsanlage MLS10 auf die Widerstandsfähigkeit eines T2 Norm-Belages (T2d)

Belagsaufbau

Die Teststrecke befand sich auf dem ASTRA Testgelände beim Rastplatz Lenzburg an der A1 im Kanton Aargau. Ziel des Projektes war es, mit Hilfe der Grossversuchsanlage MLS10 den Unterschied zwischen kanalisierter und nicht kanalisierter beschleunigter Verkehrslastsimulation zu ermitteln, wobei in Rahmen des Projekts MapFalke nur die kanalisierte Belastung berücksichtigt wurde. Der Aufbau des Testgeländes bestand aus einem verdichteten Planum auf einem Kieskoffer aus ca. 50cm frostsicherem, ungebundenen Gemisch 0/45 und einer 5-10cm dicken Feinplanie Schicht (Oberbautyp 1). Plattendruckversuche auf dem Planum zeigten, dass der Untergrund eine Tragfähigkeitsklasse S2 aufwies. Darüber befand sich ein Asphaltbelag mit einem Strukturwert von 80, was der Verkehrslastklasse T2, entspricht. Jedoch muss gesagt werden, dass dieser Aufbau eigentlich nicht normgerecht war, da die erforderlichen Minstdicken der Asphaltsschichten für diesen Aufbau unterschritten wurden. Dies stellt aber somit einen kritischeren Belagsaufbau dar, der erwartungsgemäss ein frühes Versagen zeigen sollte als ein normgerechter Belag. Die Mischguttypen und Schichtdicken wurden so gewählt, dass sie der Schweizer Norm VSS 40 430c [36] entsprechen. Dieser Belag wird im Folgenden als T2d (dünn) bezeichnet.

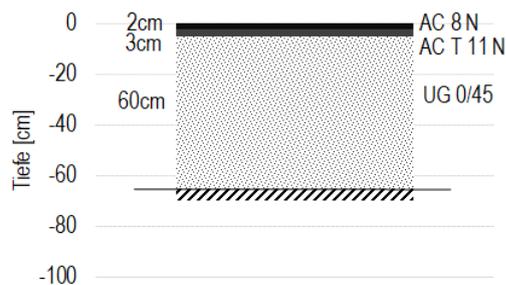


Abbildung 61: Ansicht des T4d Belagsaufbaus

Belastung

Die Last der einzelnen Bogies des MLS10 mit einer Super Single Bereifung wurde auf je 65 kN festgelegt. Die Überrollgeschwindigkeit betrug 5m/s, d. h. etwa 18 km/h. Insgesamt wurden im Sommer 2014 250'000 MLS10 Überrollungen durchgeführt.

Belagsaufbau

Diese Teststrecke befand sich ebenfalls auf dem ASTRA Testgelände beim Rastplatz Lenzburg, dessen Untergrund eine Tragfähigkeitsklasse S2 aufwies. Für dieses Projekt wurde ein Belag mit einem Strukturwert SN von 92 eingebaut, was der Verkehrslastklasse T3 und dem Oberbautyp 1 entspricht. Wie bereits im vorgehend beschriebenen Projekt, war dieser Aufbau nicht normgerecht und wird daher im Folgenden als T3d (dünn) bezeichnet.

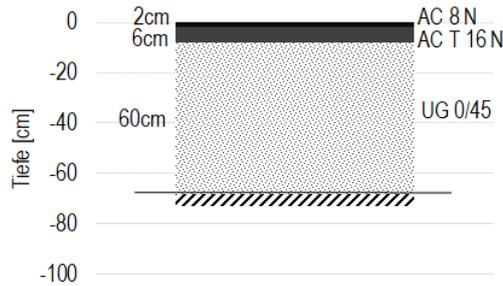


Abbildung 62: Ansicht des T3d Belagsaufbaus

Belastung

Die Last von 65 kN wurde mit einer Super Single Bereifung und einer Geschwindigkeit von 18km/h aufgebracht. Die Belastung des Belags durch den MLS10 wurde in 2 Phasen, von Oktober bis Dezember 2012 mit 500'000 Überrollungen und von Juli bis Mitte August 2013 mit 400'000 Überrollungen durchgeführt. Dies entspricht einer ersten Belastungsphase bei Wintertemperaturen und einer zweiten Phase bei Sommertemperaturen.

Belagsaufbau

Hier handelte es sich auch um einen Aufbau auf einem Testgelände der Tragfähigkeitsklasse S2. Darüber wurden 3 Asphalt-schichten eingebaut. Der gesamte Belag wies einen Strukturwert SN von 108 auf, was der Verkehrslastklasse T3 entspricht. Wiederum war dieser Aufbau nicht vollkommen normgerecht und wird daher im Folgenden als T4d (dünn) bezeichnet.

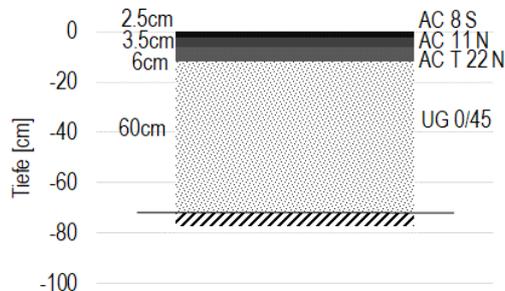


Abbildung 63: Ansicht des T4d Belagsaufbaus

Belastung

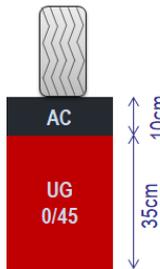
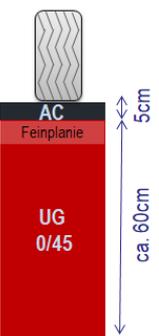
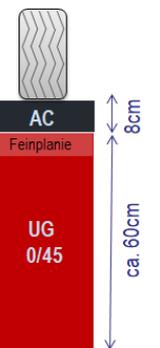
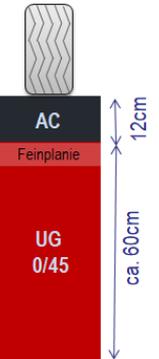
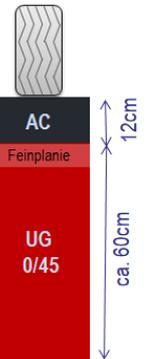
Wie in den letzten beiden Projekten wurde eine Last von 65kN mit einer Super Single Bereifung aufgebracht. Die Überrollgeschwindigkeit betrug dabei 18km/h. Die Belastung des Belags wurde auf 2 verschiedenen Strecken durchgeführt:

- Auf der Belastungsstrecke 1 wurden insgesamt 1 Mio. Überrollungen in 2 Phasen im Frühling/Sommer (25 April – 21 Juni) bei relativ hohen Temperaturen und im Herbst (10. Sep – 14. Okt) bei milden/kalten Temperaturen durchgeführt
- Auf der Belastungsstrecke 2 wurden 375'000 Überrollungen im Herbst/Winter (16.Okt – 6. Dez) bei milden/kalten Temperaturen durchgeführt.

Zusammenfassung der Belastungsprojekte

Tabelle 21 zeigt alle Belastungsprojekte.

Tabelle 21: Zusammenfassung der Belastungsprojekte

Name	T2	T2d	T3d	T4d	T4d
Aufbau					
	Tragfähigkeitsklasse S2 (Mittlere Tragfähigkeit)				
SN	75	80	92	108	108
MLS10 Über. / Saison	800'000 / Herbst	250'000 / Sommer	500'000 / Winter 400'000 / Sommer	500'000 / Frühling 500'000 / Sommer	375'000 / Winter
Reifentyp	Super Single	Super Single	Super Single	Super Single	Super Single
Belastung	65kN	65kN	65kN	65kN	65kN
Art	kanalisiert	kanalisiert.	kanalisiert.	kanalisiert.	kanalisiert.
Geschwindigkeit	22 km/h	18 km/h	18 km/h	18 km/h	18 km/h

6.4.2 Ergebnisse

Spurrinnen

Abbildung 64 zeigt als Beispiel Profilmessungen der verschiedenen Beläge nach 250'000 Überrollungen. Durch den Vergleich der Profile wird der Unterschied zwischen den unterschiedlichen Aufbauten und auf Grund der während der Belastung herrschenden Temperatur deutlich. Die Spurrinnentiefe, sowie die minimale, die maximale und die Durchschnittstemperatur während der Belastung sind in Abbildung 65 dargestellt. Abbildung 66 zeigt einen Vergleich der gemessenen Spurrinnentiefe.

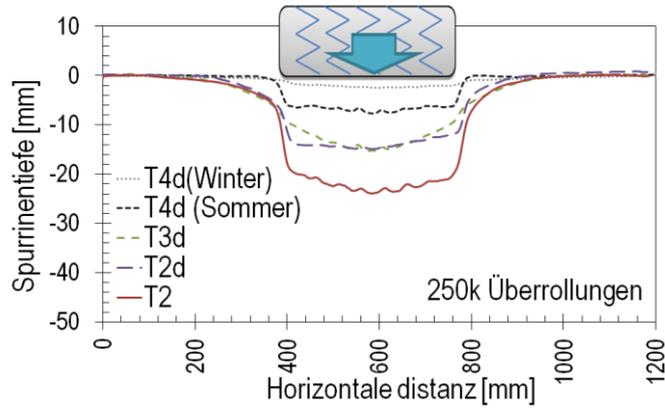


Abbildung 64: Vergleich der Profile aller Beläge nach 250'00 Überrollungen

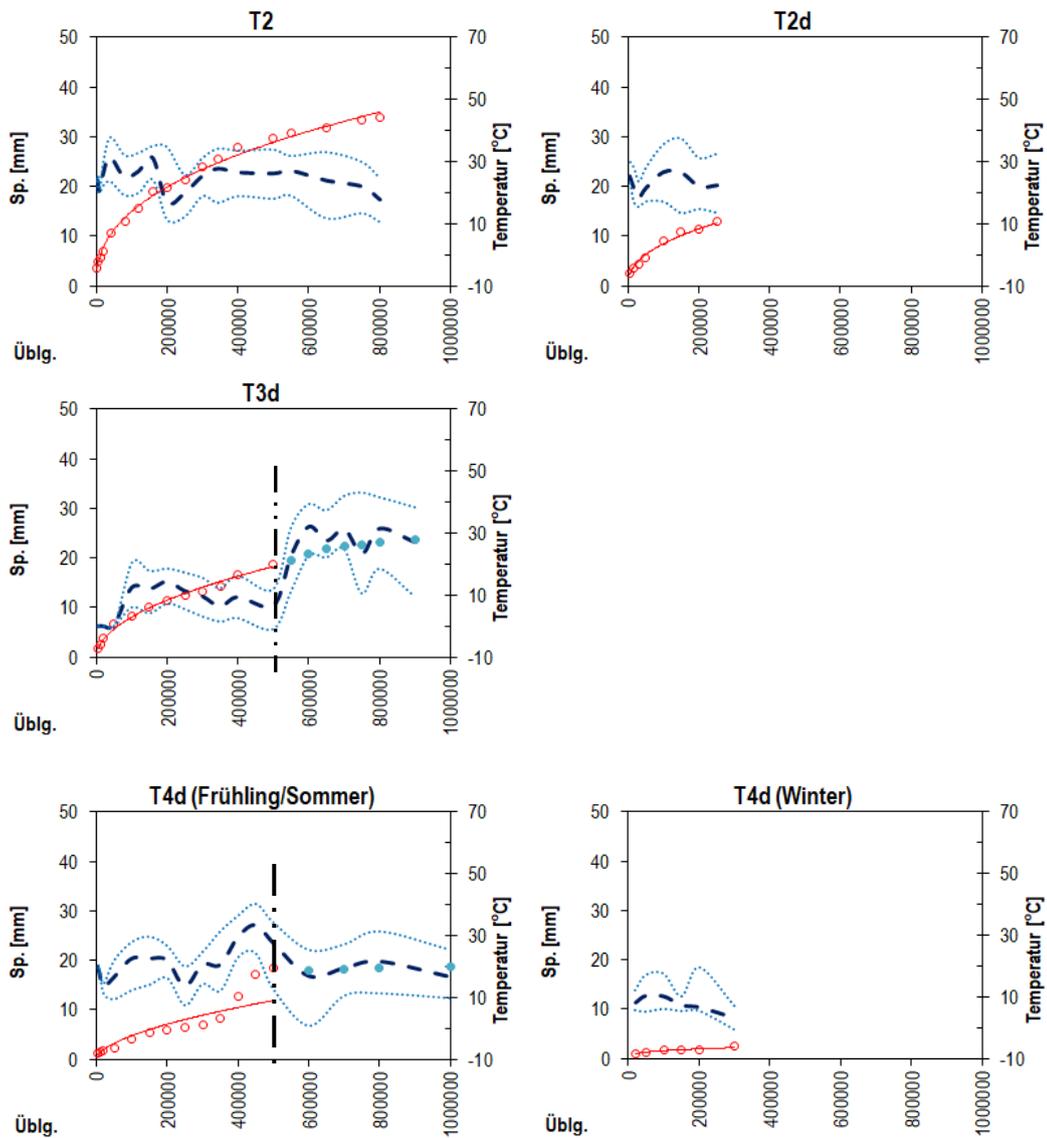


Abbildung 65: Spurrinnen der verschiedenen Beläge bei MLS10 Tests und Mittelwert, Minimum und Maximum Temperatur des Belags während der Belastung

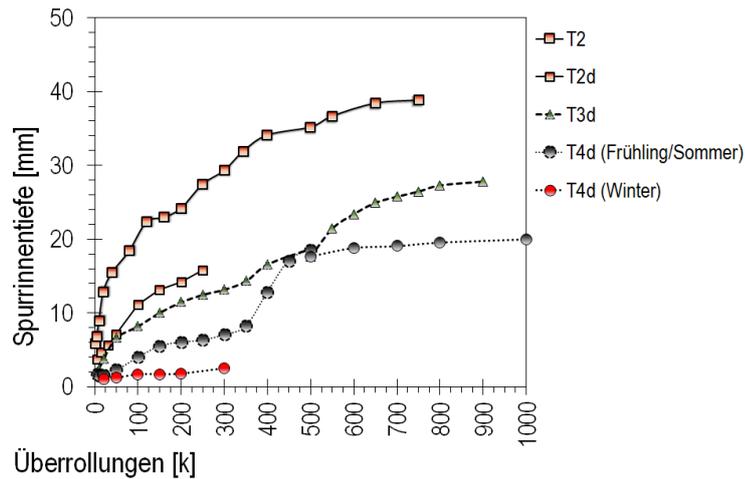


Abbildung 66: Vergleich der Spurrinnentiefe

Rissbildung

Abbildung 67 zeigt als Beispiel, die Fotodokumentation der Risse und die Digitalisierung und Messung der Risslänge des Matlab-Skripts. Die Risslänge, sowie die minimale, maximale und die Durchschnittstemperatur während der Belastung sind in Abbildung 68 dargestellt. Eine Zusammenfassung der Risslängen aller Beläge ist in Abbildung 69 zu sehen.

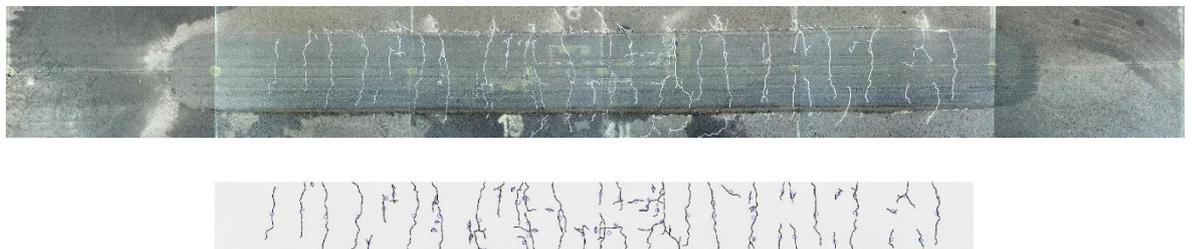


Abbildung 67: Beispiel der Risserhebung, Digitalisierung und Messung der Risse

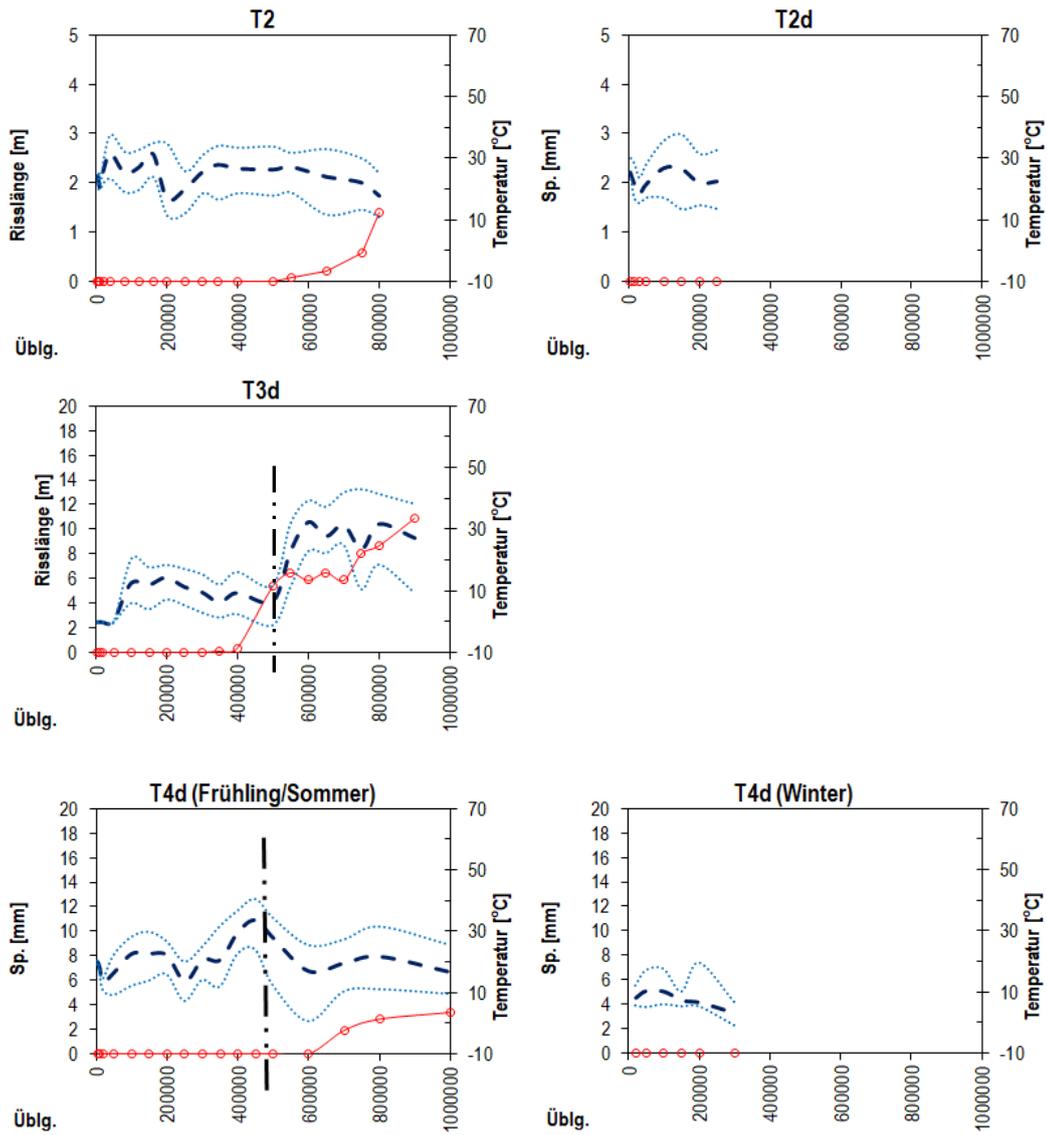


Abbildung 68: Rissbildung der verschiedenen Beläge bei MLS10 Tests und Mittelwert, Minimum und Maximum Temperatur der Belag während der Belastung

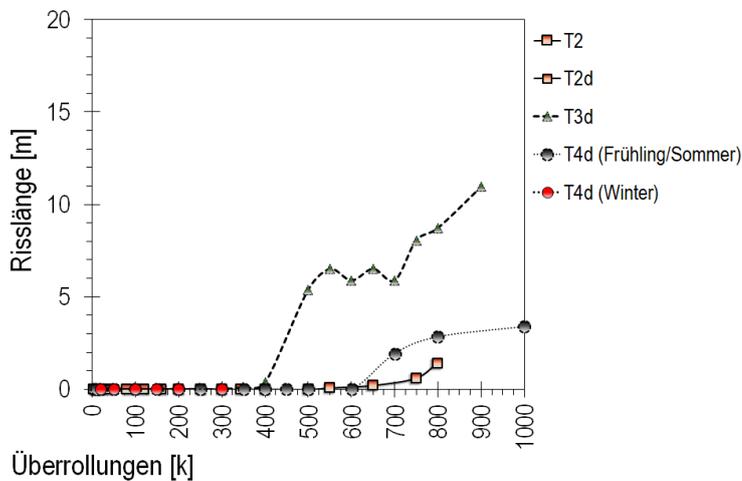


Abbildung 69: Zusammenfassung des Risslängenverlaufs

6.5 Bewertung des Potentials von Prüfverfahren

Im Folgenden soll das Potential von ausgewählten Performance-Prüfungen am Baustoff Asphalt bzw. am Bindemittel in Bezug auf deren Integration in die Modellbildung zur Zustandsprognose von Fahrbahnen bewertet werden. Dazu werden die einzelnen Prüfverfahren in Hinblick auf die Kriterien Aussagekraft, Verfügbarkeit der Daten, Materialmenge und Aufwand zur Durchführung bewertet.

Bei dem hier dargestellten Umfang an Prüfverfahren handelt es sich nicht um eine abschliessende Aufzählung an Prüfverfahren bzw. materialspezifischen Eigenschaften. Stattdessen wurde eine Auswahl an Prüfverfahren gewählt, bei denen ein Zusammenhang zur Zustandsentwicklung vermutet wird.

6.5.1 Bewertungskriterien

Die **Aussagekraft** der Performance-Prüfverfahren zur Abschätzung des Zustandsverhaltens der Oberflächenmerkmale erfolgt für jedes Zustandsmerkmal getrennt. Hierbei wird bewertet, ob ein Zusammenhang bereits im Rahmen von anderen Forschungsarbeiten nachgewiesen wurde bzw. ob nach ingenieurmässiger Beurteilung ein Zusammenhang zu erwarten ist. Bei der Bewertung der Performance-Prüfverfahren handelt es sich um eine Beurteilung aus ingenieurmässiger Sicht, die vor allem auf der Erfahrung der am Projekt beteiligten Partner basiert. Da eine statistisch abgesicherte Beurteilung der Prüfverfahren nicht möglich war, erfolgte eine qualitative Bewertung. Als Bewertungsskala wurde ein Notensystem von 1 (gering) bis 5 (sehr hoch) verwendet.

Die praktische netzweite Anwendbarkeit des Prüfverfahrens ist stark von der **Verfügbarkeit der Daten** abhängig. Nur wenn bereits heute netzweit ausreichend Daten aus diesen Untersuchungen vorliegen bzw. eine netzweite Erhebung solcher Daten in Zukunft mit vertretbarem finanziellem und organisatorischem Aufwand in Aussicht steht, gibt es ein hohes Potential zur Nutzung der Prüfverfahren.

Damit einhergehend wird die **Materialmenge**, die zur Ermittlung eines Untersuchungsergebnisses benötigt wird, bewertet. Mit zunehmender Materialmenge - insbesondere bei Bohrkernuntersuchungen - ist das Potential des Prüfverfahrens geringer einzustufen.

Zuletzt wird der **Aufwand zur Durchführung** einer Untersuchung beurteilt. Dies betrifft sowohl die Kosten als auch den zeitlichen Rahmen zur Durchführung einer Untersuchung.

6.5.2 Bewertungsergebnisse

Zusammenfassend existiert eine Vielzahl an Prüfverfahren, die oftmals Indizien für das Verformungsverhalten sowie die Rissbildung liefern können. Aussagen zur Abschätzung der Griffigkeit sowie der zeitlichen Entwicklung der Längsebenheit lassen sich hingegen anhand von Prüfverfahren kaum ableiten.

Zur Abschätzung des Verformungsverhaltens in Querrichtung eignen sich erfahrungsgemäss der Erweichungspunkt Ring und Kugel sowie die Nadelpenetration. Diese Ergebnisse werden zudem im Rahmen von Abnahmeprüfungen i.d.R. standardmässig erhoben.

Untersuchungen mit dem Dynamischen Scherrheometer (DSR) sowie das Bitumen-Typisierungs-Schnellverfahren (BTSV) weisen eine hohe Aussagekraft in Hinblick auf eine Abschätzung der Anfälligkeit zu Unebenheiten im Querprofil auf, liegen bisher jedoch noch nicht netzweit vor, obgleich sie mit vergleichsweise geringem Aufwand durchzuführen sind.

Die weitverbreiteten volumetrischen Kenngrössen, die den derzeitigen Stand der Technik widerspiegeln, weisen insgesamt eine geringe Aussagekraft in Hinblick auf die Abschätzung der Oberflächeneigenschaften auf. Dies wurde auch im Rahmen der

Untersuchungen an den Versuchsstrecken innerhalb der vorliegenden Forschungsarbeit bestätigt.

Die 4-Punkt-Biege-Ermüdungsprüfung sowie der Spaltzug-Schwellversuch eignen sich zur Abschätzung der Rissentwicklung aufgrund von Ermüdung, sind jedoch in der Durchführung zeit- und kostenintensiv.

Der Spurbildungsversuch liefert i.d.R. eine sehr gute Kenngrösse zur Abschätzung der Spurrinnenbildung. Weitere Performance-Prüfverfahren zur Beurteilung des Verhaltens bei Gebrauchstemperaturen eignen sich für die Abschätzung von Verformungen im Querprofil, weisen jedoch einen mässigen bis hohen Aufwand bei der Durchführung auf und benötigen grössere Mengen an Material.

Der Abkühlversuch sowie der einaxiale Zug-(Schwell-)Versuch eignen sich gut für die Ermittlung der Anfälligkeit zur kryogener Rissbildung, benötigen jedoch ebenfalls grössere Mengen an Material und zum Teil hoher Aufwand zur Durchführung der Versuche.

Eine tabellarische Zusammenstellung der Performance-Prüfungen mit Bewertung ist im Anhang II des Berichtes beigefügt.

6.6 Kapitelzusammenfassung

In diesem Kapitel wurden zuerst unterschiedliche klassische und neuartige Materialuntersuchungen gegenübergestellt. Danach erfolgte eine Datenanalyse verschiedener Projekte bei denen Belastungsversuche mit der MLS10 durchgeführt wurden. Das Kapitel schliesst mit einer Bewertung des Potentials der Prüfverfahren für die Verwendung bei der Entwicklung von Modellen der Zustandsentwicklung.

In der Praxis zeigt sich immer mehr, dass ein konventionelles Vorgehen bei der Bitumenprüfung an seine Grenzen stösst. Performance-Prüfungen zeigen jedoch neue Perspektiven auf. Bis jetzt werden diese Daten jedoch nicht zusammen referenziert mit den Strassendaten im Strasseninformationssystem abgelegt. Zudem wurde bisher eine Historisierung dieser Projektdaten analog den Zustandsdaten nicht verfolgt. Dies machte eine statistische Analyse über ein Strassennetz unmöglich.

Gerade bei den Auswertungen zu den MLS10-Daten von fünf verschiedenen Belastungsversuchen zeigt sich die Notwendigkeit von zusätzlichen Daten, welche eine Auswertung zum Erkennen von statistischen Zusammenhängen ermöglichen. Während bei der Bildung von Spurrinnen ein relativ klares Muster erkennbar ist, kann für die Rissausbreitung keine Aussage getroffen werden.

7 Integration von Materialuntersuchungen in die Modellbildung

7.1 Allgemeines

Im Rahmen dieser Untersuchung soll ein Modell erstellt werden, um Prognosefunktionen zur Beschreibung von Zustandsentwicklungen von Strassen zu ermitteln. Hierbei soll zum einen eine Lösung beim Vorhandensein schlechter Datenqualität bzw. fehlender Daten erarbeitet werden. Weiterhin wird geprüft, inwieweit die neuen Ansätze für vorhandene Materialprüfdaten anwendbar sind.

Als Leitfragen dienen folgende Fragestellungen:

- Sind die bisher vorhandenen Modelle der Zustandsentwicklung brauchbar?
- Werden die jeweils relevanten Einflussfaktoren auf die Zustandsentwicklung berücksichtigt?
- Welche Modelle der Zustandsentwicklung sind je nach Strassentyp geeignet?
- Welche Anforderungen müssen an die Qualität der Eingangsdaten gestellt werden?
- Wie erfolgt der Umgang bei fehlenden bzw. ungenügenden Eingangsdaten?

In Bezug auf die Materialeigenschaften sollen die neuen Untersuchungsmethoden der Technischen Universität Braunschweig, welche wenig aufwändige Bitumen- und Mastixprüfungen beinhalten, im Hinblick auf eine Integration in die Zustandsprognose von Oberflächenmerkmalen erprobt werden. Die exemplarische Anwendung des Modellansatzes soll u.a. am Beispiel der Spurrinnen- und Rissbildung im Rahmen eines Prototyps aufgezeigt werden.

7.2 Methodischer Ansatz

Ziel ist es, mit Hilfe zusätzlicher materialbezogener Datengrundlagen eine verbesserte Zustandsprognose zu ermöglichen. Dazu werden mit Hilfe von zusätzlichen «Sensoren» in Form von bspw. Materialuntersuchungen Informationen zum Zustand der Strassenbefestigung ergänzt, um die Abschätzung zum Zustand des Strassenoberbaus im Laufe der Liegezeit zu verbessern.

Als Ausgangspunkt liegt das grundsätzliche Systemverhalten in Form einer Masterkurve vor. Diese Masterkurve ist in Abhängigkeit von den Daten, die im Laufe der Nutzungsdauer erhoben werden, anzupassen bzw. zu aktualisieren. Diese Daten können Informationen zu folgenden Eigenschaften enthalten:

- Zustand der Strassenoberfläche (Zustandserfassungen)
- Verkehrsstärken (Verkehrszählungen)
- Materialeigenschaften (Asphalt- und Bindemitteluntersuchungen aus der Eignungs-, Konformitäts- und Abnahmeprüfung)
- Zustand der strukturellen Substanz (Tragfähigkeitsmessungen)

Grundsätzlich sind gleiche Grundlagen für die Kalibrierung von deterministischen und probabilistischen Modellen notwendig. Ein vorhandenes Modell wird durch aktuelle Daten in seiner grundsätzlichen Form – sofern in dieser Form anwendbar – nicht verändert, sondern an die objektbezogenen Randbedingungen angepasst.

Da es sich bei den erhobenen Daten naturgemäss stets um messfehlerbehaftete Grössen handelt, soll dieser Aspekt mit einem eigenen Teilmodell beschrieben werden. Dies betrifft i. d. R. alle erhobenen Datengruppen und beschränkt sich entsprechend nicht allein auf Strassenzustandsdaten.

Die Kalibrierung der Modelle basiert hierbei auf den in [42] definierten Kalibrierungsstufen:

Stufe 0	Auswahl des Zustandsprognosemodells
Stufe 1	Ermittlung der Funktionskoeffizienten einer Masterkurve in Abhängigkeit der vorherrschenden Randbedingungen
Stufe 2	Abschnittsbezogene Kalibrierung einer Verhaltensfunktion mit Hilfe der Zustandserfassung
Stufe 3	Abschnittsbezogene Kalibrierung einer Verhaltensfunktion mit Hilfe von Laborergebnissen

Im Folgenden werden mögliche Anwendungsszenarien skizziert. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der vorhandenen Datengrundlage für den jeweiligen Strassenabschnitt, dessen Zustand prognostiziert werden soll. Eine Voraussetzung für alle Anwendungsfälle ist, wie oben beschrieben, das Vorhandensein eines geeigneten Zustandsprognosemodells, welches unter Berücksichtigung der örtlichen Randbedingungen angewendet werden kann. Dieses Modell wird nachfolgend als Masterkurve oder -modell bezeichnet.

7.3 Anwendungsfall 1 – Ermittlung einer Masterkurve (Stufen 0 und 1)

Stufe 0 und 1 beinhalten die Auswahl eines Zustandsprognosemodells sowie die Ermittlung der Funktionskoeffizienten einer Masterkurve in Abhängigkeit von Randbedingungen. Diese bspw. in Abhängigkeit von Verkehr und Klima kalibrierte Masterkurve, die im Rahmen von vorherigen Forschungsvorhaben entwickelt wurde, kann auch ohne Zustandsdaten eines Auswerteabschnittes zur Prognose angewendet werden. Da diese aufgrund fehlender Zustandswerte jedoch nicht kalibrierbar ist, wird daher ein fiktiver Zustand basierend auf dem vorhandenen Alter und der Masterkurve berechnet und der Zustand entsprechend dieser Masterkurve prognostiziert.

Die nicht kalibrierten Verhaltensfunktionen stammen aus empirischen nationalen oder internationalen Untersuchungen. Diese Verhaltensfunktionen können in Abhängigkeit verschiedener Randbedingungen mit Hilfe von vorheriger Clusterung der netzweiten Strassendaten ermittelt werden.

Für die Ermittlung einer a priori Masterkurve zur Zustandsprognose können neben den Zustandsdaten, zusätzliche Daten aus Eignungs-, Konformitäts- und Abnahmeprüfungen in die Modellierung mit einfließen. Der Funktionstyp sollte zunächst basierend auf einem phänologischen Modell gewählt werden. Durch Clusterung der Daten können die Funktionskoeffizienten mit Hilfe einer Regressionsanalyse für jedes Cluster ermittelt werden:

$$y = a \cdot t^b + c$$

Neben den Materialdaten können zusätzlich auch Daten zur Verkehrsbelastung Berücksichtigung finden. Bei Material- und Verkehrsdaten ist zuvor eine Überprüfung des Zusammenhangs zum Zustand bzw. zum Zustandsverhalten mit Hilfe von geeigneten Methoden zu überprüfen (z. B. Korrelationsanalysen).

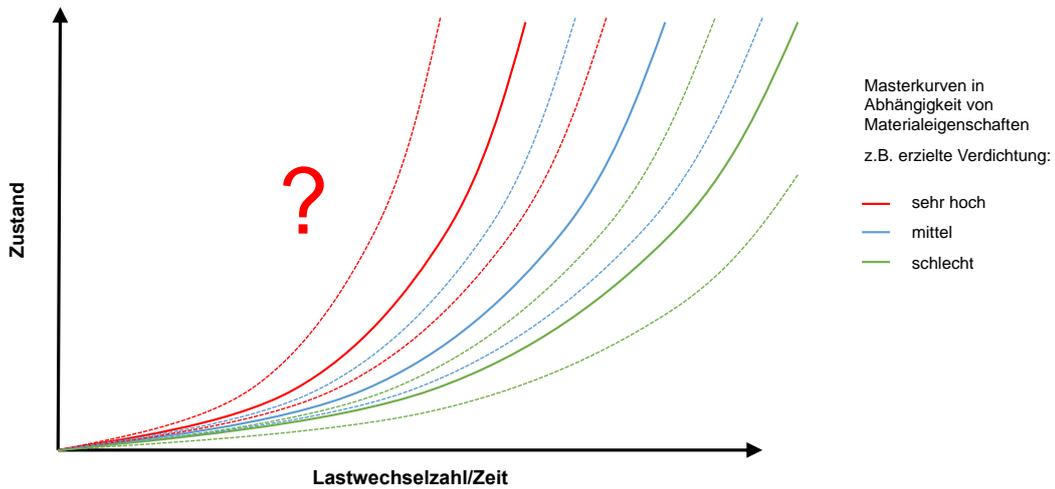


Abbildung 70: Grundlage für die abschnittsbezogene Zustandsprognose bildet eine an die vorhandenen Randbedingungen angepasste Masterkurve

In diesem Projekt wird explorativ untersucht, ob es sinnvoll ist, materialspezifische Cluster zu verwenden. So könnten Cluster gebildet werden, die bei Abnahme des Bauwerks bereits Mängel zeigen und entsprechend im weiteren Verlauf eine raschere Schadenszunahme aufweisen. So könnten bspw. in Abhängigkeit der beim Einbau erzielten Verdichtung clusterspezifische Verhaltensfunktionen entwickelt werden:

$$y = a_k \cdot t^{b_k} + c_k$$

Dies bedeutet, dass die Masterkurve durch Verwendung von materialspezifischen Kenngrößen vorab verfeinert wird. Dazu wird eine spezifische Masterkurve für einzelne Cluster gebildet, die zuvor in Abhängigkeit der Materialeigenschaften gebildet wurden.

7.4 Anwendungsfall 2 – Zustandsbasierte Kalibrierung (Stufe 2)

Im Rahmen des Anwendungsfalles 2 wird eine bestehende verkehrs- und/oder klimaspezifische Masterkurve anhand des Messergebnisses aus der aktuellen Zustandserfassung und dem Alter des Auswerteabschnittes kalibriert (Stufe 2).

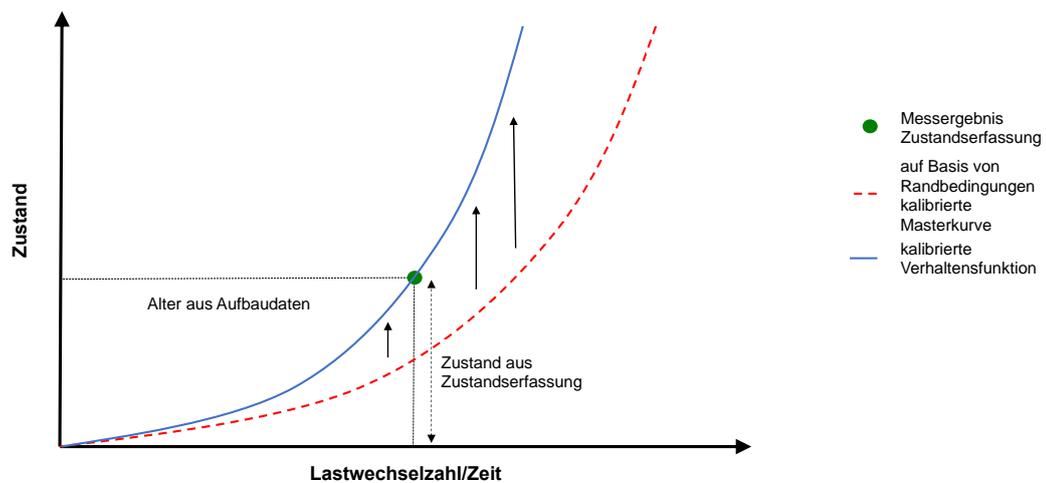


Abbildung 71: Abschnittsbezogene Anpassung einer Verhaltensfunktion mit Hilfe eines Messergebnisses der Zustandserfassung

Als Eingangsdaten werden das aus den Aufbaudaten ermittelte Alter des Strassenabschnittes sowie der aus der letzten Zustandserfassung ermittelte Zustand

verwendet. Die Anpassung der Funktionskoeffizienten erfolgt durch „Hineindrehen“ (Koeffizientenanpassung) oder „Verschieben“ (Curve-Shifting) der Masterkurve.

Die (ggf. materialspezifische) Masterkurve wird dabei anhand des Messergebnisses aus der aktuellen Zustandserfassung und dem Alter des Auswerteabschnittes kalibriert (vgl. Abbildung 71).

7.5 Anwendungsfall 3 – Materialbasierte Kalibrierung (Stufe 3)

Im Rahmen einer materialbasierten Kalibrierung von Verhaltensfunktionen werden im Folgenden drei Anwendungsmöglichkeiten vorgestellt:

- Integration von Ergebnissen aus Druck-Schwell-Versuchen
- Integration von Ergebnissen der Bindemittelalterung
- Integration von Ergebnissen der Bestimmung des Alters

7.5.1 Anwendungsfall 3a – Integration von Druck-Schwell-Versuchen

Bei Anwendungsfall 3a wurden in einem Strassenabschnitt zwei Bohrkern (1x belasteter Bereich / 1x unbelasteter Bereich) entnommen. An diesen Bohrkernen wurden Druck-Schwell-Versuche durchgeführt, deren Ergebnisse für die Entwicklung einer materialspezifischen Masterkurve genutzt werden.

Als Eingangsdaten werden die folgenden Informationen genutzt:

- Verformungskurven aus Druck-Schwell-Versuch des belasteten und unbelasteten Bohrkerns
- Messergebnis(se) der (letzten) Zustandserfassung:
 - o Zustandsgrösse(n)
 - o Jahr der Zustandserfassung(en)
- Einbaudatum des Strassenabschnittes
- Durchschnittliche tägliche Schwerverkehrsstärke des Strassenabschnittes

Die Arbeitsschritte zur Herleitung einer Masterkurve für das Zustandsmerkmal Spurrinnentiefe mit Hilfe des Druck-Schwell-Versuchs sind in nachfolgender Abbildung 72 dargestellt.

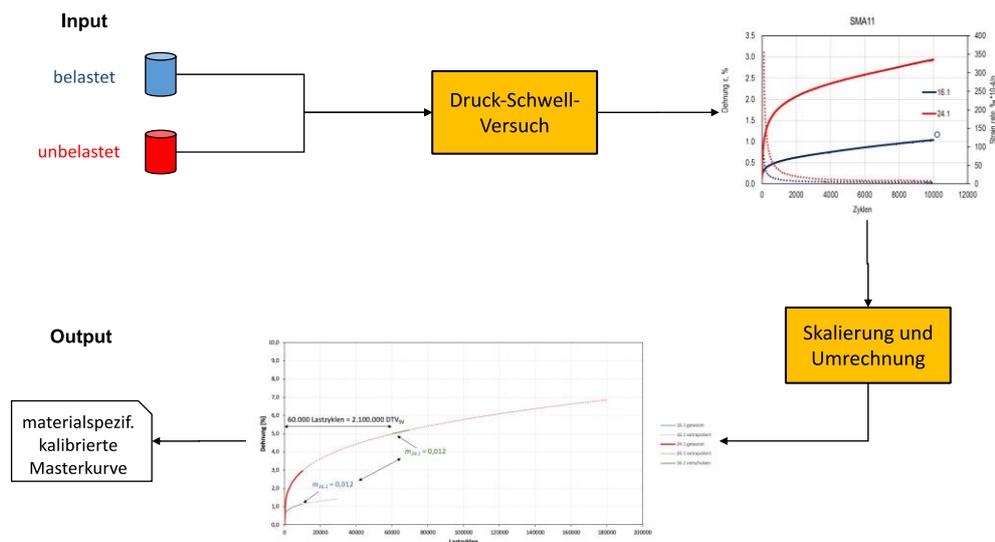


Abbildung 72: Arbeitsschritte zur Herleitung einer Masterkurve mit Hilfe des Druck-Schwell-Versuchs

Im Rahmen der Berechnung wird die Änderungsrate der Verformung nach 10.000 Lastzyklen des belasteten Bohrkerns bestimmt. Im vorliegenden Fall bedeutet dies:

$$\text{Strain rate}_{\text{belastet}}(10.000) = 0,012$$

Anhand dieser Änderungsrate und des Verformungsverlaufs des unbelasteten Bohrkerns wird die zugehörige Anzahl an Lastzyklen berechnet (vgl. Abbildung 73).

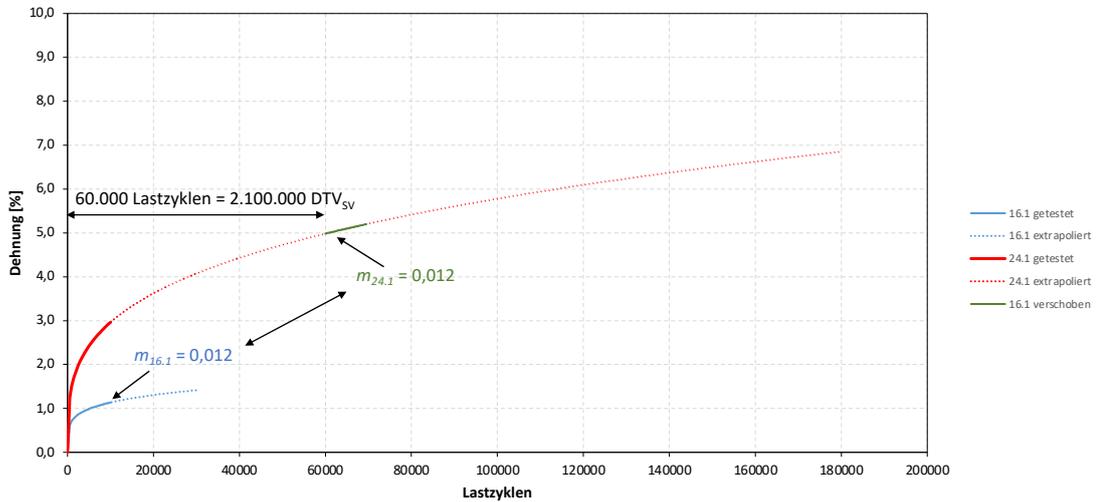


Abbildung 73: Vergleich der Dehnungsraten eines belasteten und unbelasteten Bohrkerns

Diese ermittelte Anzahl an Lastzyklen entspricht der kumulierten Anzahl an Schwerverkehr (DTV(SV)) des Strassenabschnittes. Damit kann die Verlaufskurve des unbelasteten Bohrkerns in Abhängigkeit des Schwerverkehrs als materialspezifische Masterkurve genutzt werden. Als Ergebnis erhält man schliesslich die aus den Druck-Schwell-Versuchen kalibrierte degressive Masterkurve mit ihren Funktionskoeffizienten in Abhängigkeit des Schwerverkehrs vor:

$$y_{(DTV(SV))} = a_m \cdot DTV_{SV}^{b,m} + c_m$$

Abbildung 74 zeigt die Verknüpfung der aus den Druck-Schwell-Versuchen kalibrierte Masterkurve und die Messergebnisse aus der Zustandserfassung innerhalb eines Diagramms.

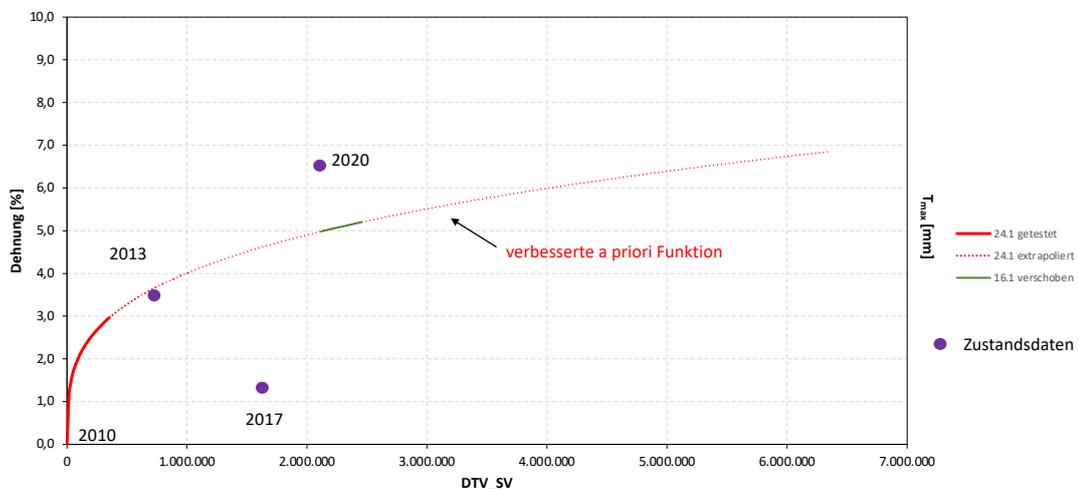


Abbildung 74: Anhand von Druck-Schwell-Versuchen verbesserte a priori Verhaltensfunktion

Der vorgestellte Ansatz zeigt eine erste Möglichkeit, wie Ergebnisse aus Druck-Schwell-Versuchen in die Zustandsprognose von Spurrinnen integriert werden können. Es ist hierbei jedoch zu beachten, dass mit Hilfe des Druck-Schwell-Versuchs lediglich die Verformung in Abhängigkeit der Belastung abgeschätzt werden kann. Der parallel wirkende Einfluss der Alterung ist hierbei jedoch nicht abgebildet. Des Weiteren ist bisher nicht abgesichert, inwiefern eine Umrechnung zwischen in situ gemessenen Spurrinentiefen eines Strassenabschnittes mit den gemessenen Verformungen während des Druck-Schwell-Versuchs in Verbindung gesetzt werden können. Es wird daher empfohlen, die Verknüpfung dieser beiden Parameter im Rahmen von weiterer Forschung näher zu untersuchen. Eine prototypische Umsetzung des Modellansatzes entfällt aufgrund der beschriebenen Aspekte.

7.5.2 Anwendungsfall 3b – Integration der Bindemittelalterung

Im Anwendungsfall 3 werden neben den Informationen aus den Zustandsdaten und zusätzlichen Materialuntersuchungen aus Eignungs-, Konformitäts- und Abnahmeprüfungen bzw. Bohrkernuntersuchungen weitere Bindemitteluntersuchungen verknüpft, die Aussagen zum Gebrauchsverhalten des Bitumens zulassen (Stufe 3). Diese Performance-Prüfungen wurden an der TU Braunschweig entwickelt und werden exemplarisch in Modelle zur Prognose der Zustandsentwicklung integriert.

Bei diesem Ansatz erfolgt eine Kalibrierung des Funktionskoeffizienten b anhand einer quantitativen Bewertung der Messreihe der Bindemitteluntersuchung im Vergleich zum Referenzbindemittel. Hierbei ist zu beachten, dass b vor allem den qualitativen Kurvenverlauf bestimmt. Daher ist b nur innerhalb eines zu definierenden Wertebereichs anzupassen.

Gemäss der verschiedenen Temperaturbereiche, bei denen die Prüfverfahren das Gebrauchsverhalten simulieren, sollten das BTSV sowie das Prüfverfahren zur Ermittlung der Kriechrate für das Alterungsverhalten in Hinblick zur Zustandsprognose von Spurrinnen angewendet werden. Für die Integration des Alterungsverhaltens bei der Zustandsprognose von temperaturinduzierten Rissen wird hingegen das Prüfverfahren zur Ermittlung der Spannungsrelaxation im Tieftemperaturbereich empfohlen.

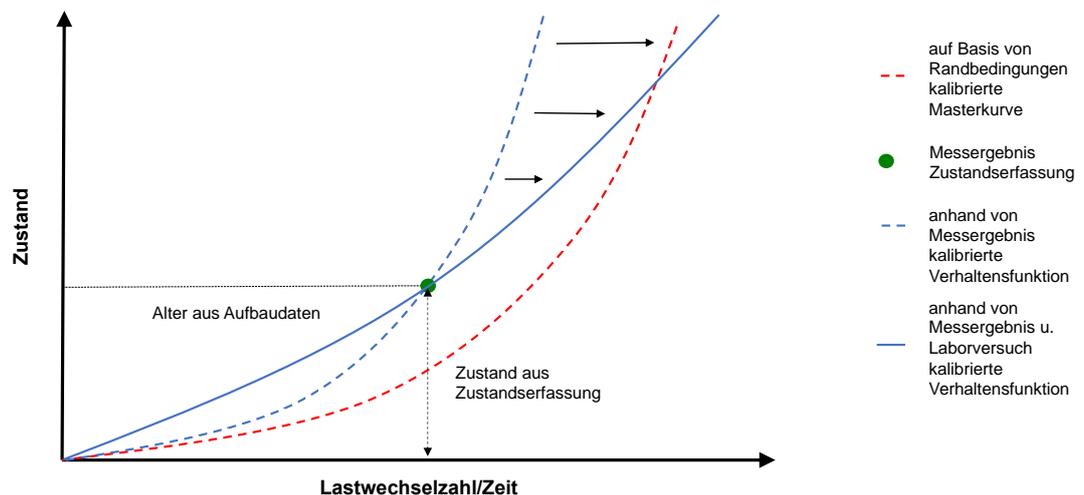


Abbildung 75: Abschnittsbezogene Anpassung einer Verhaltensfunktion mit Hilfe eines Messergebnisses der Zustandserfassung sowie aus Laboruntersuchungen

Die Umrechnung zwischen Laborergebnissen und Funktionsparameter b der Verhaltensfunktion kann in Abhängigkeit der Anzahl an vorhandenen Laborergebnissen einerseits deterministisch erfolgen, wenn nur ein Messergebnis der Laboruntersuchung zu einer Liegezeit vorliegt. Andererseits können bei einer künstlichen Alterung im Labor auch mehrere Messergebnisse zur Ermittlung einer Steigung der Spannungsrelaxation

verwendet werden. Abbildung 75 zeigt das Ergebnis einer anhand eines Messergebnisses aus der Zustandserfassung und einer im Labor zuvor kalibrierten Verhaltensfunktion.

Da für die Untersuchung der Bindemittelalterung unter Laborbedingungen mittlerweile ein kontinuierlich wachsender Erfahrungshintergrund vorliegt, wird der vorgestellte Modellansatz in Kapitel 8 prototypisch umgesetzt.

7.5.3 Anwendungsfall 3c – Bestimmung des Alters

Sobald das Alter des Auswerteabschnittes nicht bekannt oder stark unsicherheitsbehaftet ist, können die bisher vorgestellten Verfahren nicht angewendet werden. Die Ermittlung des Alters eines Strassenabschnittes kann jedoch anhand der Braunschweiger Bindemitteluntersuchungen relativ einfach bestimmt werden. Dazu ist ein Bohrkern zu entnehmen und das Alter anhand einer oder mehrerer Methoden zur Bindemitteluntersuchung zu bestimmen. Bei mehrfacher Bestimmung des Alters anhand von verschiedenen Methoden sind die Ergebnisse anhand ihrer Streubreite in Form von Wahrscheinlichkeitsverteilung miteinander zu verknüpfen. Dies liefert einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Zustandsprognose bei Abschnitten mit unbekanntem Alter.

Im Rahmen des Anwendungsfalles 3c liegt eine Masterkurve aus Kalibrierungsstufe 0 und 1 vor. Diese soll auf Basis eines Messergebnisses der aktuellen Zustandserfassung zustandsbezogen analog zu Anwendungsfall 2 (vgl. Kapitel 7.4) kalibriert werden. Im Gegensatz zu Anwendungsfall 2 ist jedoch das Alter des Strassenabschnittes zum Zeitpunkt der Zustandserfassung aufgrund der vorliegenden Aufbaudaten unbekannt bzw. nicht plausibel. Daher wird das Alter anhand einer Probennahme und anschließender Untersuchung des Bindemittels ermittelt.

Als Eingangsdaten dienen hierbei:

- kalibrierte Masterkurve aus Kalibrierungsstufe:
 - o Funktionstyp (z. B. linear, exponentiell, quadratisch)
 - o Kalibrierte Funktionskoeffizienten (z. B. a , b , c)
- Messergebnis der letzten Zustandserfassung:
 - o Zustandsgrösse
 - o Jahr der Zustandserfassung
- Informationen zur Bindemitteluntersuchung:
 - o Ergebnisparameter ($N_{\text{Rowe},10}$, $N_{\text{Rowe},20}$, KR, SR₁₀, SR₂₀)
 - o Ergebnisgrösse
 - o Jahr der Bindemitteluntersuchung

Anschliessend sind die folgenden Berechnungsschritte anzuwenden:

Ermittlung des Alters des Strassenabschnittes zum Zeitpunkt der Bindemitteluntersuchung

Die Umrechnung zwischen Ergebnis der Bindemitteluntersuchung und dem geschätzten Alter $t_{\text{Bindemittel}}$ des Strassenabschnittes erfolgt mit Hilfe von Umrechnungskurven, die für die jeweiligen Bindemitteluntersuchungen zuvor ermittelt wurden (vgl. Abbildung 76).

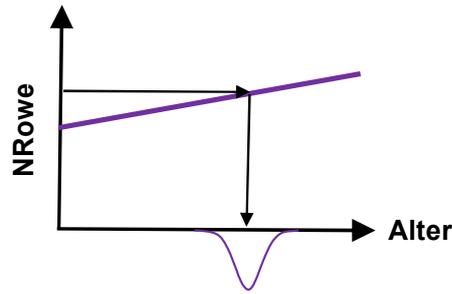


Abbildung 76: Exemplarische Umrechnung zwischen Ergebnis der Bindemitteluntersuchung und fiktivem Alter

Die folgenden Umrechnungsfunktionen sind im Prototyp zu implementieren:

Tabelle 22: Umrechnungsfunktionen zur Altersbestimmung

Laboruntersuchung	Prüftemperatur [°C]	Funktion	SD	R ²
Ermüdungslastwechsel	10	$N_{Rowe,10} = 1945,2 \cdot t + 36378$	6393	0,791
	20	$N_{Rowe,20} = 1327,1 \cdot t + 13693$	4548	0,781
Kriechrate	–	$KR = 1000 \cdot e^{-0,203 \cdot t}$	140	0,5889
Relaxation	10	$SR_{10} = -0,2758 \cdot t + 96,918$	1,9	0,4727
	20	$SR_{20} = -0,3669 \cdot t + 94,392$	2,2	0,5415

Die Berechnung des Alters erfolgt schliesslich durch Umstellung der obigen Gleichungen nach dem Parameter t. Im Falle einer ermittelten Lastwechselzahl bei 10°C ($N_{Rowe,10}$) von bspw. 54.000 ergibt sich somit ein ermitteltes Alter von:

$$t_{Bindemittel} = f_{N_{Rowe,10}}(54.000) = \frac{54.000 - 36.378}{1.945,2} = 9,0 \text{ Jahre}$$

Für das Alter des Strassenabschnittes zum Zeitpunkt der Zustandserfassung wird ein Wert von 9 Jahren angesetzt.

Ermittlung des Alters des Strassenabschnittes zum Zeitpunkt der Zustandserfassung

Im Falle, dass das Jahr der Probenentnahme und der Zustandserfassung nicht übereinstimmen, muss eine Umrechnung zwischen den beiden Zeitpunkten erfolgen. Das Alter des Strassenabschnittes zum Zeitpunkt der Zustandserfassung berechnet sich zu:

$$t_{neu} = t_{Bindemittel} - (j_{Bindemittel} - j_{ZEB})$$

mit: t_{neu} Liegezeit bzw. Alter des Strassenabschnittes zum Zeitpunkt der Zustandserfassung
 j_{ZEB} Jahr der Zustandserfassung
 $t_{Bindemittel}$ Alter des Bindemittels zum Zeitpunkt der Probennahme
 $j_{Bindemittel}$ Jahr der Bindemitteluntersuchung

Anpassung der Verhaltenskurve

Für die Anpassung der Masterkurve stehen erneut die beiden Methoden „Koeffizientenanpassung“ und „Curve-Shifting-Verfahren“ zur Auswahl. Als Ergebnis der Kalibrierung liegt eine anhand eines verschobenen Messergebnisses kalibrierte Verhaltensfunktion mit zugehörigen Funktionskoeffizienten vor.

7.6 Modellvariante 1 – Umsetzung von Anwendungsfall 1

Die in Modellvariante 1 verwendeten Master-Kurven für die Verhaltensfunktionen sind in den D-A-CH Ländern derzeit zumeist anhand von Clustern für die Verkehrsbelastung und die Bauweise bzw. Deckenart sowie den Frostindices kalibriert (vgl. [7, 43]), die im Rahmen von empirischen nationalen oder internationalen Untersuchungen entwickelt wurden.

Eine Berücksichtigung von streckenbezogenen volumetrischen Materialeigenschaften bei der Zustandsprognose ist hingegen bisher wenig untersucht, obgleich vermutet wird, dass diese Kennwerte einen deutlichen Einfluss auf die Entwicklung von Strassenschäden haben.

Im Allgemeinen gestaltet es sich jedoch als äusserst schwierig, die charakteristischen Kennwerte zu identifizieren, die sich unmittelbar auf die Zustandsentwicklung auswirken (vgl. Kapitel 2.3). Durch eine Berücksichtigung dieser Materialkenngrössen könnte durch Clusterung der Daten die Master-Kurve vorab materialspezifisch verfeinert und anhand der Messergebnisse der Zustandserfassung schliesslich kalibriert werden (vgl. Abbildung 77).

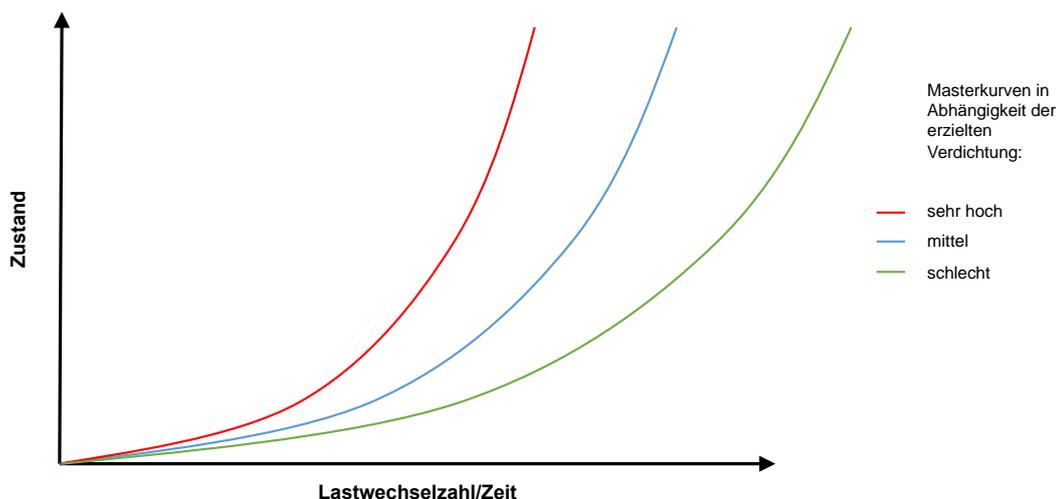


Abbildung 77: Unterschiedliche Masterkurven in Abhängigkeit der Einbauqualität

7.6.1 Vorüberlegungen zu möglichen Eingangsgrössen

Grundsätzlich ist zwischen über die Zeit weitgehend konstanten Einflussfaktoren und den im Beobachtungszeitraum veränderlichen Einflussfaktoren zu unterscheiden.

Konstante Einflussfaktoren:

- Lage im Gelände
- Art und Grösse der Längsneigung
- Querneigung
- Fahrbahnbreite
- Kurvenradien
- Aufbaudaten (unter der Voraussetzung, dass keine baulichen Massnahmen stattgefunden haben)

Diese Einflussfaktoren können über eine Clusterung der Daten modelliert werden (siehe Modellvariante 1).

Zeitabhängige Einflussfaktoren:

- Verkehrsbelastung (in erster Linie Schwerverkehrsbelastung, Normlastwechsel)
- Klimabeanspruchung (Niederschlag, Temperatur, etc.)
- Erhaltungsmassnahmenarten und -zeitpunkte

Der zeitliche Verlauf der einzelnen Materialeigenschaften kann anhand von kontinuierlichen Materialuntersuchungen erfolgen. Dies ist jedoch in der Praxis aufgrund des hohen finanziellen und personellen Aufwands als nicht zielführend zu beurteilen, sodass diese Daten meist nur punktuell vorliegen. Stattdessen kann der zeitliche Verlauf der Materialeigenschaften auch anhand von Laboruntersuchungen getätigt werden, bei denen die Materialien einer künstlichen Alterung und/oder (Verkehrs)-belastung ausgesetzt sind (siehe Modellvariante 2).

7.6.2 Durchführung der Untersuchung

Für die Versuchsstrecke Staffeleggstrasse wird eine Korrelationsanalyse durchgeführt, um eventuelle Abhängigkeiten zwischen den erhobenen Materialkenngrößen zum Zeitpunkt des Einbaus und dem Oberflächenbild nach einer längeren Liegezeit zu analysieren.

Korrelationsanalysen Material 2011 – Oberflächenzustand 2020

Als Eingangsgrößen wurden zunächst die Ergebnisse der Materialuntersuchungen aus der Kontrollprüfung 2011 verwendet. Die Daten umfassen Informationen zu:

Tabelle 23: Betrachtete Merkmale der Korrelationsanalyse

Merkmalskategorie	Merkmalsbeschreibung	Eigenschaft	Kenngrösse
Materialeigenschaften 2010	Deck-/Binder- und Tragschicht	Schichtdicke	d
		Raumdichte	rhoA
Materialeigenschaften 2020	Deck-/Binder- und Tragschicht	Hohlraumgehalt	HA
		Verdichtungsgrad	k
Längsebenheit	Deck-/Binder- und Tragschicht	Schichtenverbund (Weg/Kraft)	w, F
		Standardabweichung der Winkelwerte	Sw
Querebenheit	Oberflächenschäden	Index I2	I2
		Spurrinntiefe rechts	T_rechts
		Spurrinntiefe links	T_links
Oberflächenschäden	Oberflächenschäden	Index I3	I3
		Index I0	I0
		Index I1	I1

Erhaltungsmassnahme sowie nach einer Liegezeit von etwa zehn Jahren nachweisen. Exemplarisch sind hierzu in Abbildung 79 die beobachteten Zusammenhänge zwischen Verdichtungsgrad der Deck- bzw. Tragschicht und der Längsebenheit sowie strukturellen Schäden dargestellt. Hierbei zeigte sich, dass sich die Wahrscheinlichkeit eines Schadens bei geringeren Verdichtungsgraden erhöht. Eine quantitative Beurteilung dieses Risikos konnte jedoch aufgrund der geringen Stichprobengrösse nicht erfolgen.

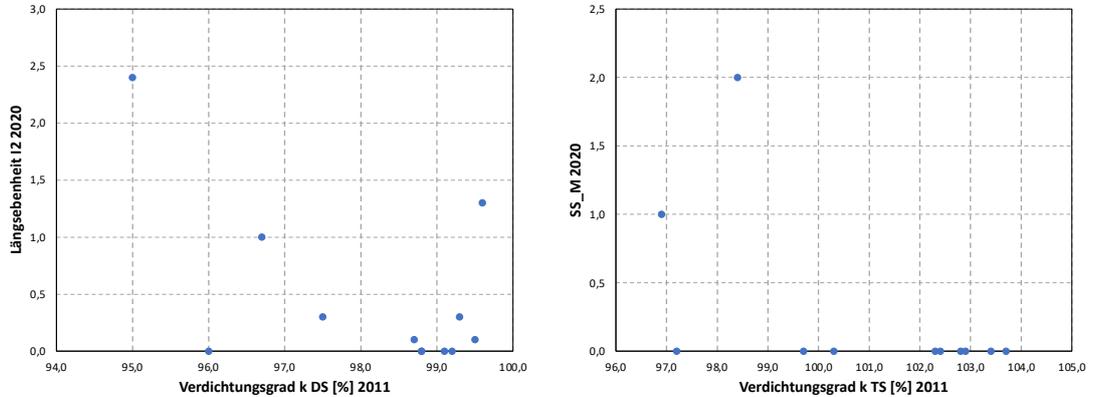


Abbildung 79: Beobachteter Zusammenhang zwischen Verdichtungsgrad der Deck- bzw. Tragschicht nach Einbau und der Längsebenheit sowie strukturellen Schäden nach ca. 10 Jahren Liegezeit

Die detaillierten Ergebnisse der Korrelationsanalysen sind im Anhang des Berichtes dargestellt.

Korrelationsanalysen Material 2020 – Oberflächenzustand 2020

Analog zu den im Jahre 2010 untersuchten Materialeigenschaften wurden die Korrelationsanalysen mit den in 2020 erhobenen Ergebnissen zum Schichtenverbund durchgeführt. Hierbei zeigte sich bei den Matrixwerten ein tendenzieller Zusammenhang zwischen dem Schichtenverbund und beobachteten Ausmagerungen sowie wilden Rissen in der Fahrbahnoberfläche. Die Ergebnisse der Korrelationsanalysen anhand der Matrixwerte sind in Abbildung 80 dargestellt.

Die Analyse der Schadensschwere zeigte Zusammenhänge zwischen dem Schichtenverbund zwischen Deck- und Binderschicht bzw. Binder- und Tragschicht und wilden Rissen in der Fahrbahnoberfläche. Die Ergebnisse der Korrelationsanalysen anhand der Schadensschwere sind in Abbildung 81 dargestellt.

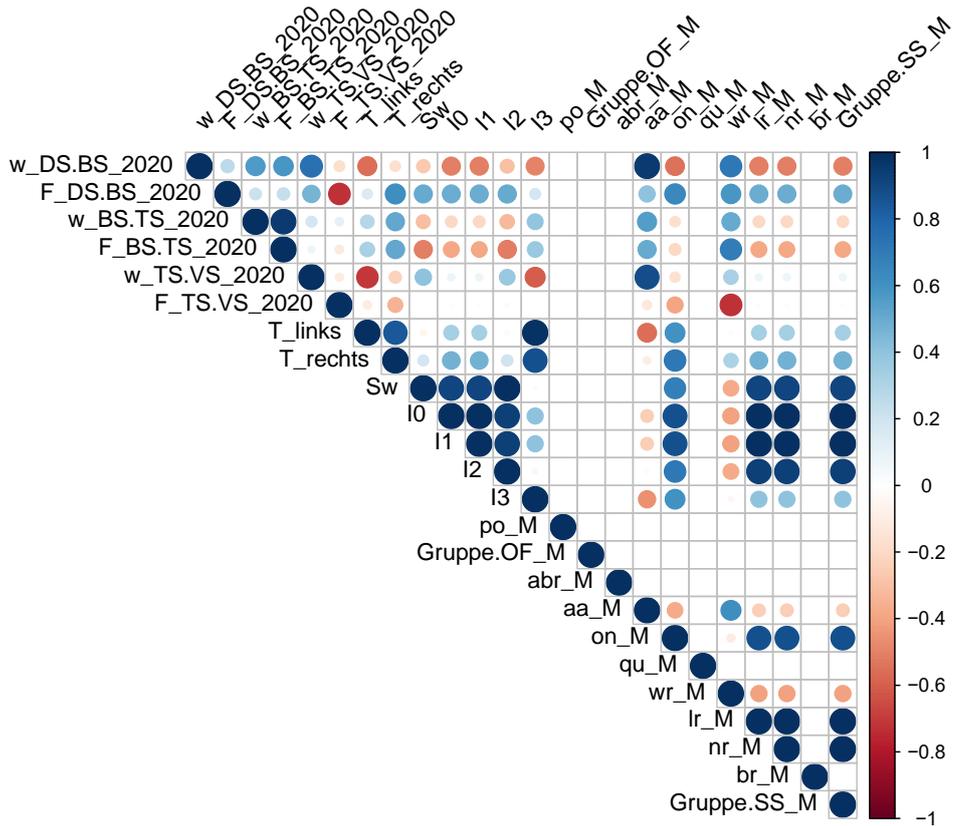


Abbildung 80: Korrelationsmatrix zwischen Kenngrößen des Schichtenverbunds und erfassten Matrixwerten der Oberflächenmerkmale in 2020

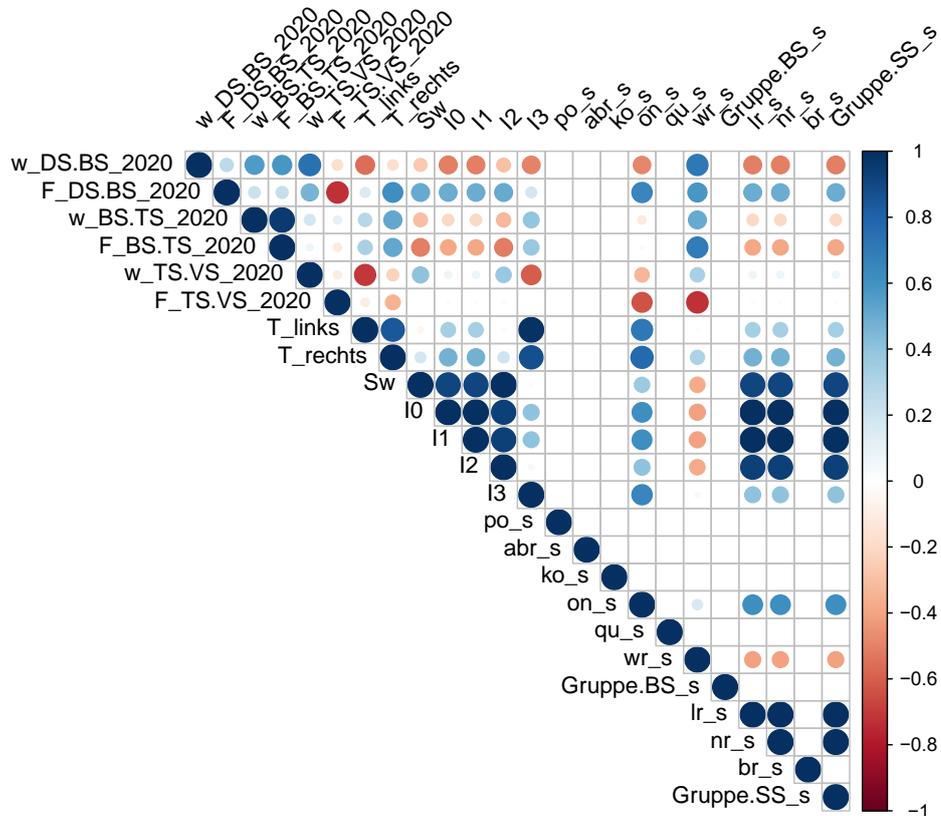


Abbildung 81: Korrelationsmatrix zwischen Kenngrößen des Schichtenverbunds und erfasster Schadensschwere der Oberflächenmerkmale in 2020

Zuletzt erfolgte die Korrelationsanalyse auf Basis der Schadensschwere der einzelnen Oberflächenmerkmale und dem Schichtenverbund. Hierbei konnten Zusammenhänge zwischen dem Schichtenverbund zwischen Deck- und Binderschicht und Ausmagerungen, Absanden, wilden Rissen, Spurrinnen und offenen Nähten beobachtet werden. Des Weiteren wurden Abhängigkeiten zwischen dem Schichtenverbund zwischen Tragschicht und Verfestigung und den Oberflächenmerkmalen Spurrinnentiefe, offene Nähte und wilden Rissen identifiziert. Die Ergebnisse der Korrelationsanalysen anhand der Ausmassschwere sind in Abbildung 82 dargestellt.

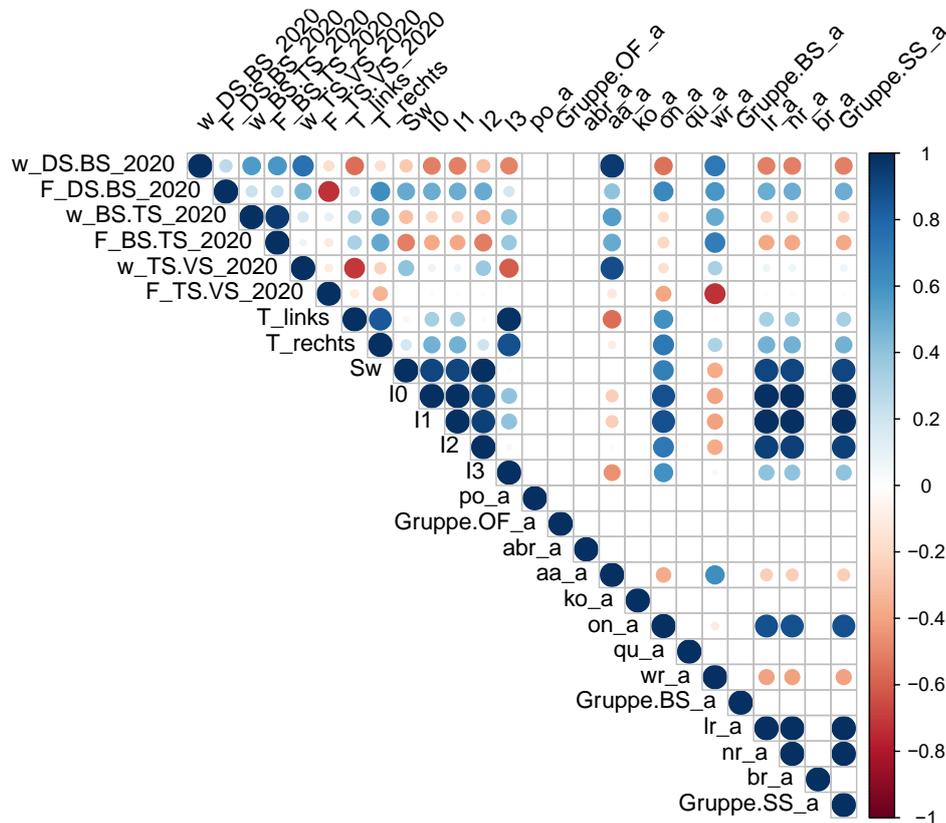


Abbildung 82: Korrelationsmatrix zwischen Kenngrößen des Schichtenverbunds und erfasster Ausmassschwere der Oberflächenmerkmale in 2020

7.6.3 Ergebnisse und Bewertung

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen anhand von Korrelationsanalysen können wie folgt zusammengefasst werden:

Zum Zeitpunkt der Abnahme gab es keine Auffälligkeiten in den Materialeigenschaften, die auf eine rasche Schadensentwicklung in einzelnen Bereichen des Streckenabschnittes schliessen lassen hätten können. Vereinzelt kam es zwar zu Überschreitungen der Grenzwerte im Rahmen der Kontrollprüfung, jedoch konnte kein Zusammenhang zur Zustandsentwicklung nachgewiesen werden. Gleichwohl ist die Entwicklung über die Zeit der Materialeigenschaften von Interesse. Problematisch ist zudem, dass oftmals nur ein Messwert zum Zeitpunkt des Einbaus vorliegt und nicht ein zeitlicher Verlauf abgeschätzt werden kann.

Aus statistischer Sicht ist es wenig überraschend, dass die hier dargestellten Korrelationsanalysen nur sehr geringe Zusammenhänge zwischen den Parametern liefern. Dies liegt darin begründet, dass Korrelationsanalysen den Standardfehler, d. h. die Standardabweichung des Mittelwerts als zentralen Aspekt beurteilen, ob ein Ergebnis zufällig ist. Dies bedeutet, dass je grösser die Stichproben, desto geringer die Streuung der Stichprobenmittelwerte um den Populationsmittelwert und desto mehr nähert sich die die Verteilungsform der Stichprobenmittelwerte einer Normalverteilung an. Da für die

untersuchten Einflussgrößen tendenziell geringe Effekte zu erwarten sind, muss die verwendete Stichprobe möglichst gross ausfallen. Bei einer zwei-gerichteten Prüfung mit einer zu erwartenden Effektgrösse von 0.3, einem Alphaniveau von 0.05 und einer Power von 0.8 wird bspw. eine Stichprobengrösse von 85 Elementen benötigt. Diese Anzahl an Messwerten konnte aufgrund der geringen Datengrundlagen der Versuchsstrecken durchgehend nicht erreicht werden. Aufgrund der vermuteten geringen direkten Einflüsse einzelner Materialeigenschaften auf die Zustandsentwicklung, der grossen Streuung der Materialparameter sowie der grossen Streuung der Oberflächenmerkmale und der geringen Teststärke konnten oftmals keine statistisch signifikanten Zusammenhänge ermittelt werden.

Bei dieser Variante wird zudem davon ausgegangen, dass die Liegezeit, d. h. das Alter des Strassenabschnittes bekannt ist. Dies ist in der Praxis leider oftmals nicht der Fall, d. h. diese Daten sind unsicherheitsbehaftet oder fehlen gänzlich. Das Wissen zum Alter des Strassenabschnittes ist jedoch für die Kalibrierung der Verhaltensfunktion essentiell. Es wäre daher zweckmässig mit Hilfe von erweiterten Materialuntersuchungen auf das Alter der Schichten zurückschliessen zu können. Dies kann ggf. mit Hilfe der Braunschweiger Untersuchungen umgesetzt werden (siehe Modellvariante 3).

7.7 Modellvariante 2 – Umsetzung von Anwendungsfall 3b und 3c

Basierend auf den bisherigen Erkenntnissen sollen im Folgenden die Ergebnisse der Material- bzw. Bindemitteluntersuchungen in die Modellbildung integriert werden. Grundlegend gilt es die mit Hilfe von Materialkenngrößen zu beschreibenden Eigenschaften späteren möglichen Schadensbildern zuzuordnen. Dazu werden die folgenden Materialeigenschaften als relevant angesehen:

1. **Ermüdungslastwechsel**
 - Infolge von Lastwiederholungen kommt es zu einem allmählichen Abfall der Materialsteifigkeit
 - Dies drückt sich in Form von Ermüdungsrissen und strukturellen Schäden aus
 - Für die Ermüdung gibt es bisher kein Laborverfahren, das diese Eigenschaften treffend abbildet.
 - Eine Annäherung zur Beschreibung dieser Eigenschaften kann über Spaltzug-Schwell-Versuche erfolgen
2. **Sprödigkeit**
 - Diese beschreibt die Alterungsneigung des Materials in Abhängigkeit der Liegezeit.
 - Für die Sprödigkeit liegt bisher kein geeignetes Laborverfahren vor, das diese Eigenschaften treffend abbildet.
3. **Widerstand gegen Verformungen**
 - Dieser beschreibt, wie anfällig ein Material zu Verformungen neigt.
4. **Widerstand gegen Rissbildung**
 - Dieser wird anhand der Spannungsrelaxation beschrieben. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass unterschiedliche Rissursachen aus den Zustandsdaten nicht zurückverfolgt werden können.
5. **Integration von Modellunsicherheit und Messunsicherheit**
 - Die Modellunsicherheit bildet den Einfluss an nicht berücksichtigten Parametern innerhalb des Modells ab.
 - Die Messunsicherheit bildet den Anteil an Ungewissheit bei der Erfassung von Eingangsdaten, wie z. B. Zustandsdaten, ab.

Nachfolgende Tabelle 24 fasst die beschriebenen Zusammenhänge zwischen Materialeigenschaft, im Labor messbarem Materialkennwert und beobachtbarem Schadensbild zusammen.

Tabelle 24: Zuordnung von Materialeigenschaften, Materialkennwerten und beobachtetes Schadensbild

Eigenschaft	Materialkenngrösse	Schadensbild
Ermüdung	Lastwechselzahl	Strukturelle Schäden, Rissbild
Sprödigkeit	–	Strukturelle Schäden, Rissbild
Widerstand gegen Verformung	Kriechrate	Unebenheit im Querprofil
Widerstand gegen Rissbildung	Spannungsrelaxation	Rissbild
Modellunsicherheit	–	betrifft alle Schadensarten

7.7.1 Laboruntersuchungen

Im Rahmen des Forschungsprojektes *mapFALKE* werden zwei 45/80-50 A PmB unterschiedlicher Hersteller (siehe Kapitel 5.2.2) in verschiedenen Alterungszuständen (siehe Tabelle 25) untersucht. Die Varianten O und P werden in den Zuständen frisch (Zustand 1), nach 8 Jahren (Zustand 6), nach 17 Jahren (Zustand 7) und nach 19 Jahren Liegedauer (Zustand 8) betrachtet. Des Weiteren wird die Laboralterung betrachtet, indem die Bitumen 1x – 4x RTFOT, 1x – 3x PAV und 1x RTFOT + 1x PAV gealtert werden.

Tabelle 25: Übersicht der verschiedenen Bitumen- und Alterungszustände

Kennzeichnung	Zustand
Zustand 1	Anlieferung
Zustand 6	Nach 8 Jahren
Zustand 7	Nach 17 Jahren
Zustand 8	Nach 19 Jahren
Zustand 1.1	1x RTFOT gealtert
Zustand 1.2	2x RTFOT gealtert
Zustand 1.3	3x RTFOT gealtert
Zustand 1.4	4x RTFOT gealtert
Zustand 1.0.1	1x PAV gealtert
Zustand 1.0.2	2x PAV gealtert
Zustand 1.0.3	3x PAV gealtert
Zustand 1.1.1	1x RTFOT + 1x PAV gealtert

Neben den beiden Bitumen aus der Probestrecke in Thüringen wurde zusätzlich eine weitere Variante betrachtet. Diese dritte Variante (Variante S) ist das Bitumen der Staffeleggstrasse in der Schweiz, ein 40/80-65 (CH-E) hochmodifiziertes Bitumen (siehe Kapitel 5.3). Dieses wird im Zustand nach 11 Jahren Liegedauer und zusätzlich nach Laboralterung (1x – 4x RTFOT, 1x – 3x PAV, 1x RTFOT + 1x PAV) untersucht.

Das Prüfprogramm umfasst verschiedene DSR-Prüfungen über den gesamten Gebrauchstemperaturbereich, die für alle Bitumen in allen vorhandenen Alterungszuständen durchgeführt wurden. Als Untersuchungsmethoden wurden das Bitumen-Typisierung-Schnell-Verfahren (siehe Kapitel 6.2.1) und die Performance Prüfungen (Relaxation, Ermüdung und Verformung, siehe Kapitel 6.2.2) zur näheren Untersuchung der Varianten ausgewählt.

Für jede Materialvariante stehen unterschiedliche Alterungsfortschritte aus Feld- und Laboralterung (RTFOT & PAV) zur Verfügung. Für eine Erweiterung der Datengrundlage werden Ergebnisse aus der Feldalterung mit der Laboralterung kombiniert. Dazu werden den unterschiedlichen Alterungszuständen im Labor einheitliche Jahreszahlen als simulierte Liegedauer zugeordnet.

Hierzu galt es ein einheitliches Vorgehen bei der Bewertung der Alterungsschritte der Alterungsverfahren RTFOT & PAV festzulegen. Als Kalibrierungspunkte wurden die ermittelten Ergebnisse der verschiedenen Laborprüfungen an den aus den Versuchsstrecken entnommenen Bindemitteln verwendet. Anschliessend wurde innerhalb eines iterativen Verfahrens diejenige Kombination an Alterungsschritten für RTFOT und PAV bestimmt, bei der die in der Laboralterung ermittelten Werte den besten Modellfit über alle vier Prüfverfahren aufwiesen. Es zeigte sich, dass die Abweichungen der Ergebnisse zwischen Feld- und Laboralterung mit folgender Kombination an Alterungsschritten erzielt werden konnte:

1 x RTFOT: 3 Jahre

1 x PAV: 4 Jahre

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Bindemittelprüfungen in Abhängigkeit der tatsächlichen (Versuchsstrecken) und der simulierten (Laboralterung) Liegezeit dargestellt.

BTSV

Das BTSV wird anhand der zwei Kennwerte Temperatur T_{BTSV} und dem Phasenwinkel δ_{BTSV} bei einem komplexen Schermodul von $G^* = 15 \text{ kPa}$ ausgewertet (siehe Kapitel 6.2.1). In Abbildung 83 ist die Temperatur T_{BTSV} über die Liegezeit dargestellt. Im Diagramm sind zum einen für Variante O (rot) und P (grün) Daten aus einem vorherigen Forschungsprojekt (2016, Probe 1) und zum anderen Daten, die im Rahmen von diesem Projekt (2020, Probe 2) erzielt wurden, aufgetragen. Für die Variante S (blau) steht der Ausgangszustand nicht zur Verfügung, deshalb beginnen die Datenpunkte bei einer Liegezeit von 11 Jahren. Die Punkte stellen die Laboralterung dar und die Dreiecke die Feldalterung. Es ist zu sehen, dass mit zunehmender Alterung/Liegezeit die Temperatur T_{BTSV} ansteigt. Die Werte für O und P aus 2016 (Probe 1) und 2020 (Probe 2) weisen jeweils nur geringe Abweichungen auf.

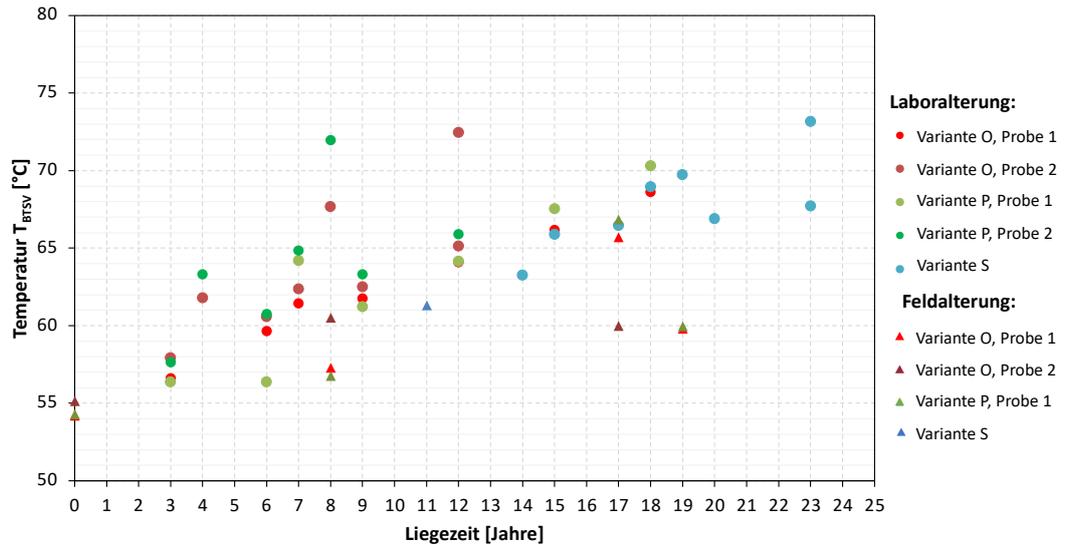


Abbildung 83: Ergebnisse der BTSV Prüfungen der Varianten O, P und S dargestellt mithilfe der Temperatur T_{BTSV} über die Liegezeit.

Abbildung 84 zeigt den zweiten Kennwert des BTSV den Phasenwinkel δ_{BTSV} in Abhängigkeit der Liegezeit. Hier ist erkennbar, dass für die Varianten O und P der Phasenwinkel δ_{BTSV} infolge Alterung immer kleiner wird. Bei der Variante S hingegen steigt der Phasenwinkel δ_{BTSV} mit zunehmender Alterung leicht an. Wie auch bei der Temperatur T_{BTSV} sind nur geringe Abweichungen der Werte für O und P aus den Jahren 2016 (Probe 1) und 2020 (Probe 2) zu beobachten.

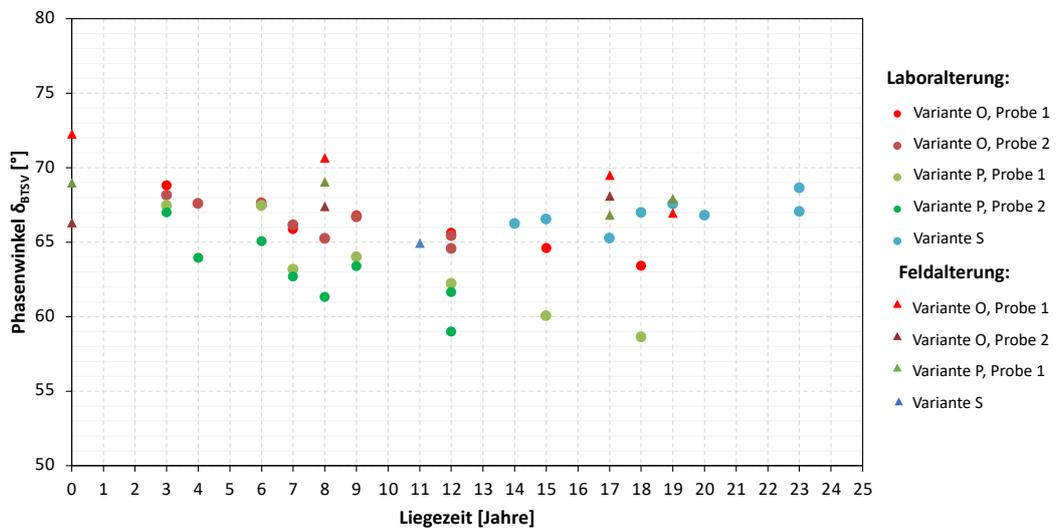


Abbildung 84: Ergebnisse der BTSV Prüfungen der Varianten O, P und S dargestellt mithilfe des Phasenwinkels δ_{BTSV} über die Liegezeit.

Ermüdung

In Abbildung 85 sind die Ermüdungslastwechsel N_{Rowe} (siehe Kapitel 6.2.2) der Varianten O (rot), P (grün) und S (blau) in Abhängigkeit der Liegezeit bei einer Prüftemperatur von 20 °C dargestellt, wobei die Feldalterung als Dreiecke und die Laboralterung als Punkte abgebildet sind. Es ist zu sehen, dass mit steigender Liegezeit die Ermüdungslastwechselzahl N_{Rowe} im Vergleich zum frischen Zustand (bei Variante S im Vergleich zu nach 11 Jahren Liegezeit) zunimmt.

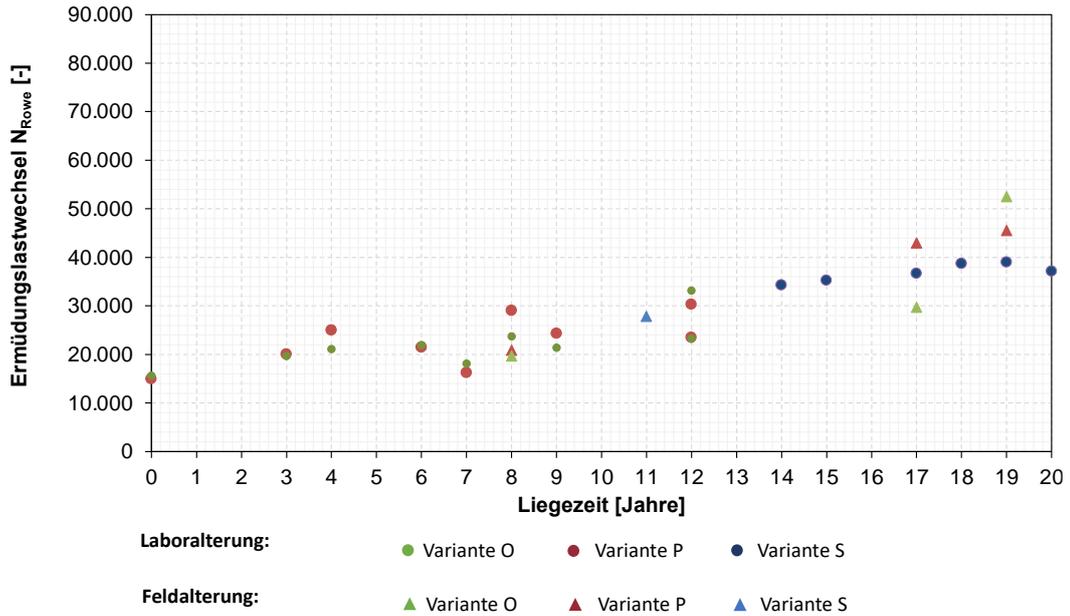


Abbildung 85: Ermittelte Ermüdungslastwechsel bei einer Temperatur von 20 °C der Varianten O, P und S in Abhängigkeit der Liegezeit.

Widerstand gegen Verformungen

Die Kriechraten (siehe Kapitel 6.2.2) der Variante O (rot), P (grün) und S (blau) in Abhängigkeit der Liegezeit sind in Abbildung 86 dargestellt. Hierbei ist zu sehen, dass die Kriechraten, verglichen mit dem frischen Zustand (bei Variante S im Vergleich zu nach 11 Jahren Liegezeit), für alle Varianten mit zunehmender Alterung immer kleiner werden. Hervorzuheben ist, dass nach 8 Jahren Liegedauer die Kriechrate der feldgealterten Bitumenproben der Varianten O und P noch deutlich höhere Werte aufweist als die laborgealterten Proben.

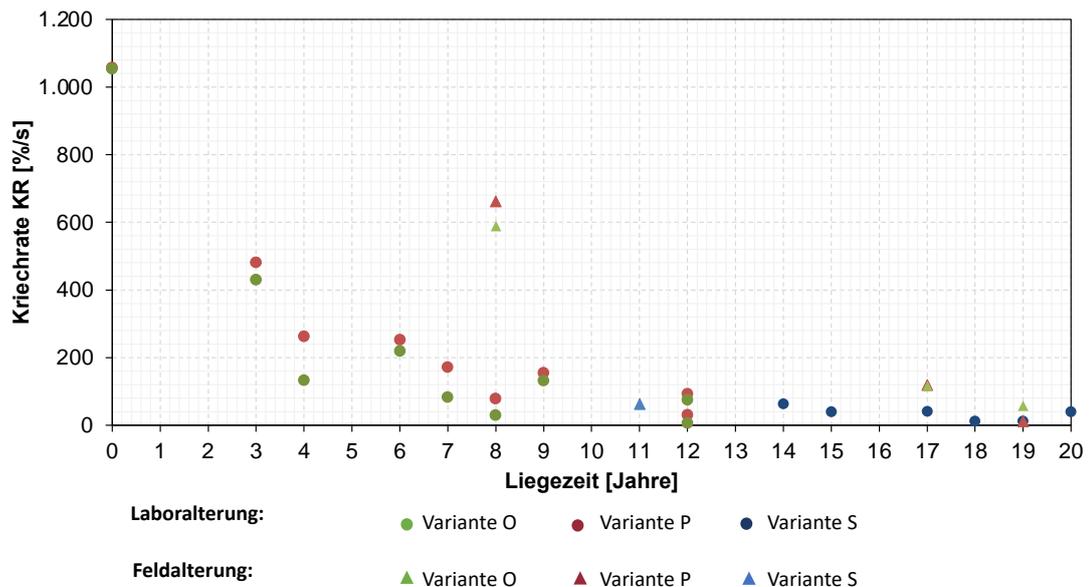


Abbildung 86: Ermittelte Kriechrate bei einer Temperatur von 60 °C der Varianten O, P und S in Abhängigkeit der Liegezeit.

Widerstand gegen Rissbildung

Die Spannungsrelaxation nach 60 min (siehe Kapitel 6.2.2) in Abhängigkeit der Liegezeit bei einer Temperatur von -15 °C ist in Abbildung 87 für die Varianten O (rot), P (grün) und S (blau) dargestellt. Es ist festzustellen, dass die Spannungsrelaxation nach 60 min mit zunehmender Liegezeit im Vergleich zum frischen Zustand (bei Variante S im Vergleich zu nach 11 Jahren Liegezeit) kontinuierlich abnimmt.

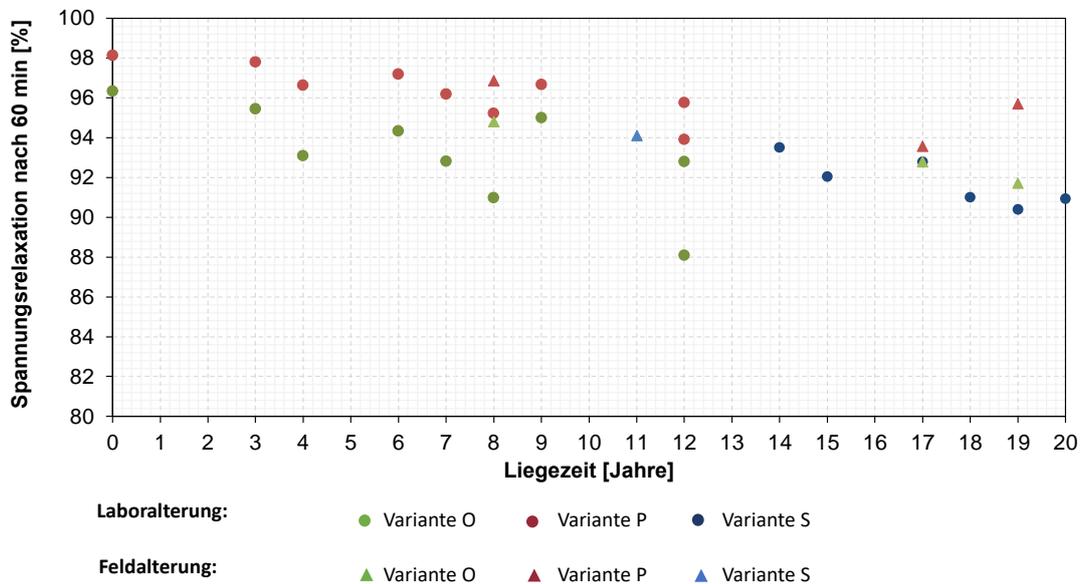


Abbildung 87: Ermittelte Spannungsrelaxation nach 60 min bei einer Temperatur von -15 °C der Varianten O, P und S in Abhängigkeit der Liegezeit.

7.7.2 Ergebnisse und Bewertung

BTSV

Die Ergebnisse des BTSV zeigen eine Zunahme der Temperatur T_{BTSV} (siehe Abbildung 83), welche darauf zurückzuführen ist, dass die Bindemittel infolge Alterung immer härter und spröder werden. Im Gegensatz dazu wird der Phasenwinkel δ_{BTSV} , ein Maß für das visko-elastische Materialverhalten, in der Regel mit zunehmender Alterung immer kleiner, die Bitumen werden also elastischer ($\delta = 0^\circ \rightarrow$ rein elastisches Materialverhalten, $\delta = 90^\circ \rightarrow$ rein viskoses Materialverhalten). Für die Varianten O und P ist genau dieses Verhalten zu sehen (siehe Abbildung 84). Für die Variante S hingegen steigt der Phasenwinkel mit zunehmender Alterung an. Dieses Verhalten ist vermutlich auf den höheren in der Schweiz üblichen Modifikationsgrad zurückzuführen. (PmB in der Schweiz meist höher modifiziert sind als PmB in Deutschland).

Ermüdung

Die in Abbildung 85 dargestellten steigenden Ermüdungslastwechselzahlen N_{Rowe} infolge Alterung zeigen, dass der Ermüdungswiderstand aufgrund der Steifigkeitszunahme der Bindemittel zunimmt. Die längere Liegedauer wirkt sich somit positiv auf das Ermüdungsverhalten aus. Des Weiteren ist festzustellen, dass ein Trend unabhängig eines bestimmten Materials erkennbar ist, indem die Werte der Ermüdungslastwechselzahl mit zunehmender Alterung ansteigen.

Widerstand gegen Verformungen

Die abnehmende Kriechrate im Rahmen der Verformungsprüfungen (siehe Abbildung 86) geht einher mit der Abnahme der Verformungsneigung infolge der Steifigkeitszunahme der Bitumen. Wie auch bei der Ermüdungsprüfung wirkt sich die längere Liegedauer daher

positiv auf das Verformungsverhalten aus. Es ist ebenfalls ein Trend zu erkennen, der unabhängig von einem bestimmten Material ist, da die Werte der Kriechrate prinzipiell mit zunehmender Alterung abnehmen.

Die Kriechrate kann grundsätzlich ein Indikator der Anfälligkeit für plastische Verformungen in der Strasse sein. Je höher die Kriechrate, umso weniger Verformungswiderstand und umso höher die Gefahr von Spurrinnen.

Widerstand gegen Rissbildung

Die Ergebnisse der Relaxationsprüfung (siehe Abbildung 87) zeigen, dass sich die zunehmende Liegedauer negativ auf den Widerstand gegen Rissbildung auswirkt, da die Fähigkeit der Bitumen Spannungen abzubauen infolge der Versprödung abnimmt. Wie auch bei den anderen beiden Performance Prüfungen ist ein Trend unabhängig vom Material erkennbar, indem tendenziell für alle Werte der Spannungsrelaxation nach 60 min eine Abnahme mit zunehmender Alterung erkennbar ist.

Das Relaxationsvermögen eines Materials kann direkt mit dem Rissbild aus der Zustandserfassung verknüpft werden. Eine niedrige Spannungsrelaxation entspricht dabei einem geringen Widerstand gegen Kälterisse.

7.7.3 Bestimmung von Alterungsfunktionen

Im Folgenden werden für jedes Laborverfahren die Alterungsfunktionen separat mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt. Zusätzlich werden die Häufigkeiten der Abweichungen zwischen Regressionsfunktion und Messwerten als Dichtefunktion ausgewertet und deren Standardabweichung als Mass für die Präzision des Laborverfahrens angesetzt. Die Abbildung 88 zeigt die Alterungsfunktion für das Merkmal Ermüdungslastwechsel nach Rowe bei einer Prüftemperatur von 10°C.

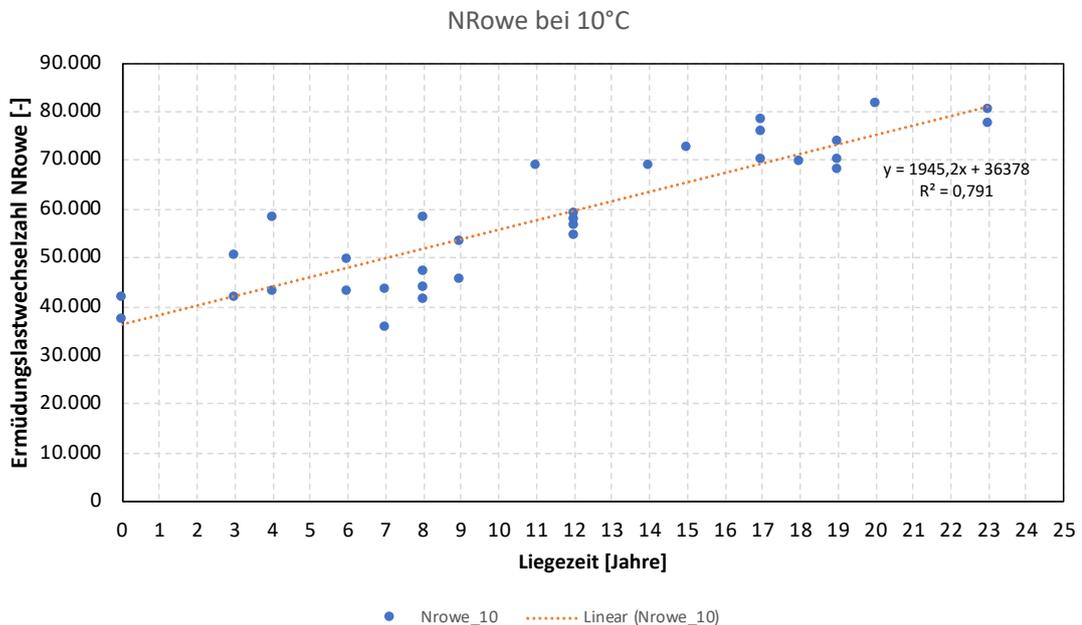


Abbildung 88: Ermittelte Alterungsfunktion für das Merkmal Ermüdungslastwechsel nach Rowe

Bei der Kriechrate wurde für die Alterungsfunktion eine Exponentialfunktion angesetzt. Abbildung 89 zeigt die Alterungsfunktion für das Merkmal Kriechrate.

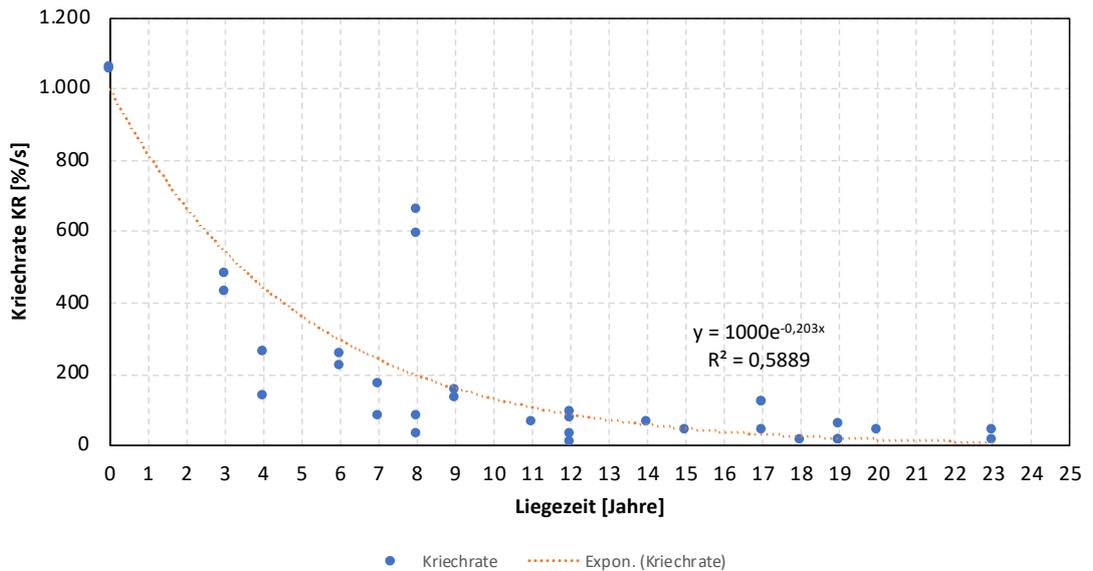


Abbildung 89: Ermittelte Alterungsfunktion für das Merkmal Kriechrate

Für die Alterungsfunktion der Spannungsrelaxation wurde ein linearer Funktionsverlauf angesetzt. Abbildung 90 zeigt die Alterungsfunktion für die Spannungsrelaxation bei einer Prüftemperatur von 20°C.

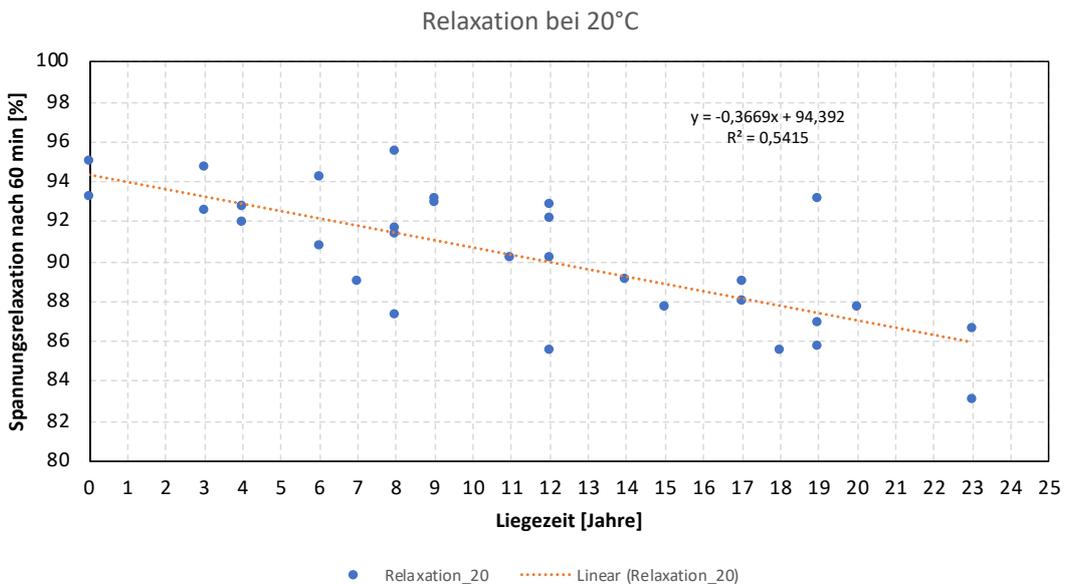


Abbildung 90: Ermittelte Alterungsfunktion für das Merkmal Spannungsrelaxation nach 60 min

Nachfolgende Tabelle 26 fasst die ermittelten Koeffizienten der Alterungsfunktionen zur Beschreibung der zeitlichen Änderung der Ermüdung, der Kriechrate und der Spannungsrelaxation zusammen, zusätzlich sind das Bestimmtheitsmass und die empirische Standardabweichung angegeben.

Tabelle 26: Koeffizienten der Alterungsfunktionen

Merkmal	Prüftemperatur [°C]	a	b	c	R ²	SD _{emp}
Ermüdung	10	1.945,2	36.378,0	–	0,7910	6.393,0
	20	1.327,1	13.69	–	0,7809	4.548,5
Kriechrate	–	1.000	-0,203	–	0,5889	140,3
Spannungsrelaxation	10	-0,2758	96,918	–	0,4727	1,9
	20	-0,3669	94,392	–	0,5415	2,2

Die nachfolgende Abbildung 91 bis Abbildung 93 zeigen die kumulierten Häufigkeiten der Abweichungen zwischen Messwerten und der aus allen Messwerten gemittelten Alterungsfunktion.

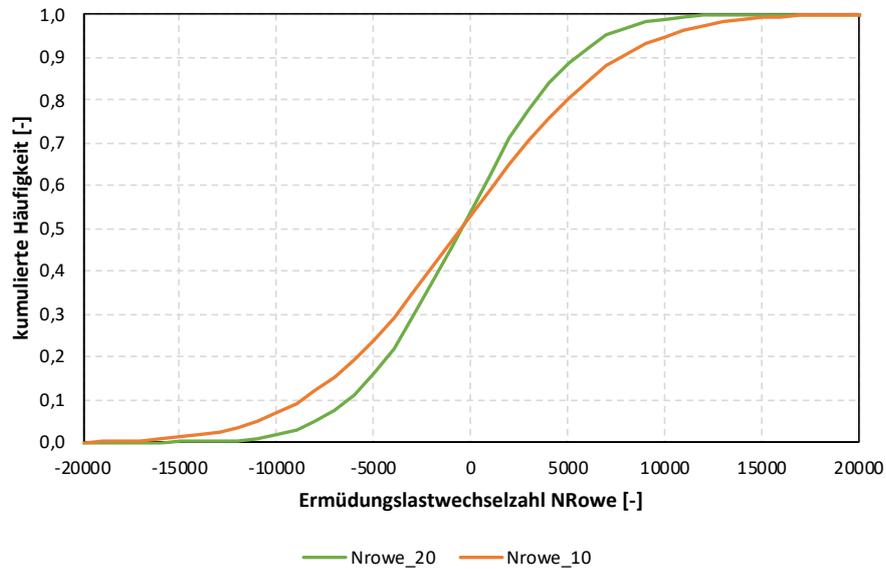


Abbildung 91: Kumulierte Abweichungen der Ermüdungslastwechsel zwischen Messwerten und mittlerer Alterungsfunktion

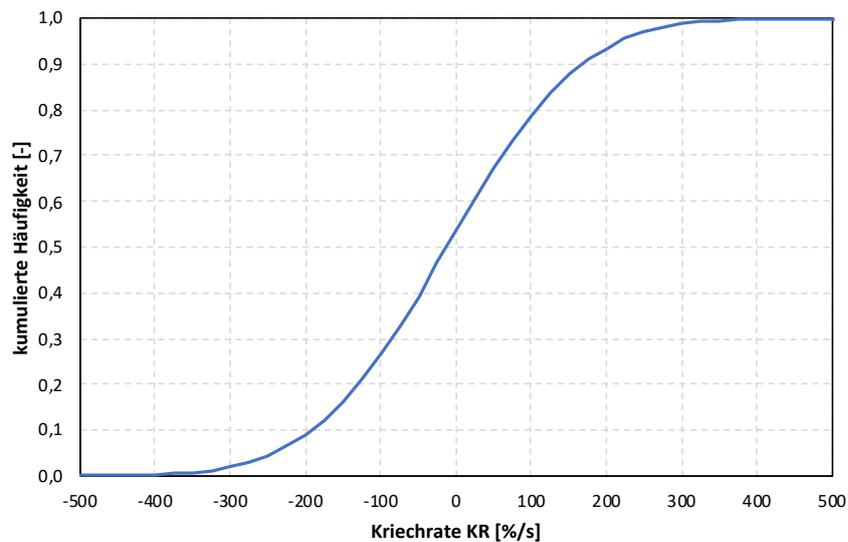


Abbildung 92: Kumulierte Abweichungen der Kriechrate zwischen Messwerten und mittlerer Alterungsfunktion

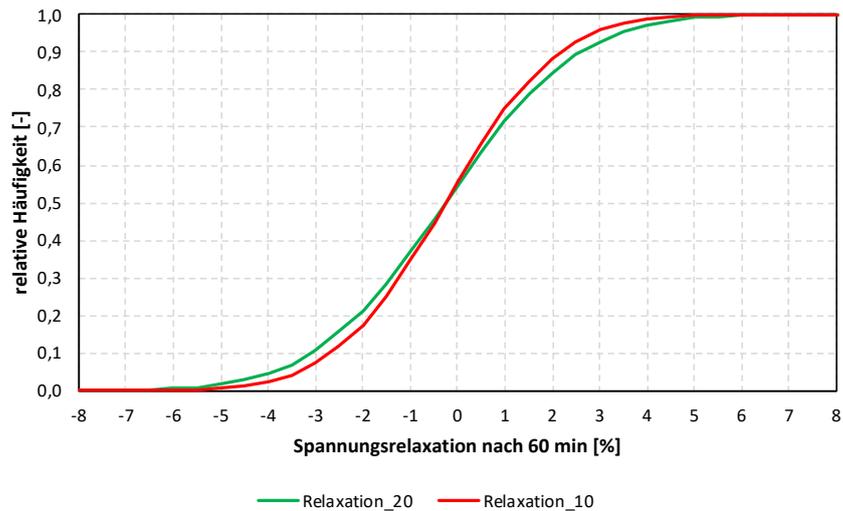


Abbildung 93: Kumulierte Abweichungen der Spannungsrelaxation zwischen Messwerten und mittlerer Alterungsfunktion

7.7.4 Integration der Alterungsfunktionen in die Zustandsprognose

Die zuvor ermittelten Alterungsfunktionen spiegeln das Alterungsverhalten von Bindemittleigenschaften sowohl im Feld als auch im Labor sehr gut wider. Demnach können diese dazu verwendet werden, das Alter- bzw. das Alterungsverhalten des Bindemittels aus entnommenen Proben zu bestimmen. Entsprechend der Prüftemperaturen der Prüfverfahren wird vorgeschlagen das BTSV sowie die Ermittlung der Kriechrate zur Alterungsbestimmung im Sinne der Prognose von Verformungen zu verwenden. Die im Tieftemperaturbereich ermittelten Alterungsfunktionen der Spannungsrelaxation und der Ermüdung sollten hingegen für die Ermittlung der Alterungseigenschaften in Hinblick auf die Rissbildung verwendet werden. Obgleich für die Zustandsprognose des Rissbildes die Sprödigkeit von Bedeutung ist, existiert derzeit kein Prüfverfahren zur Beschreibung des Alterungsverhaltens der Sprödigkeit, das dieses unter Laborbedingungen abbilden kann. Weiterhin lassen sich keine direkten Zusammenhänge zwischen Alterungsverhalten des Bindemittels und Oberflächenschäden sowie der Längsebenheit konstatieren. Vielmehr werden diese beiden Oberflächenmerkmale als Folge einer vorherigen Rissbildung betrachtet. Abbildung 94 zeigt die Zuordnung der Prüfverfahren zu den Oberflächenmerkmalen.

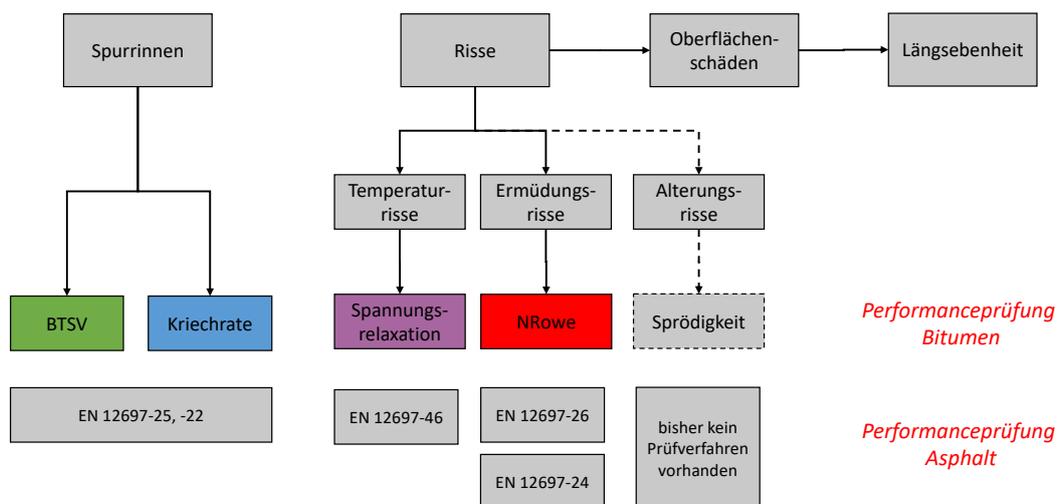


Abbildung 94: Zuordnung von Bindemittel-Prüfverfahren zur Prognose von Oberflächenmerkmalen

Deterministische Modellierung

Bei der deterministischen Modellierung wird in Abhängigkeit des ermittelten Ergebnisses aus dem Prüfverfahren ein Alter des Bindemittels bestimmt. Dies erfolgt über die zuvor entwickelten Alterungsfunktionen je Prüfverfahren. Abbildung 95 zeigt dazu die funktionale Zuordnung zwischen Prüfergebnis und resultierendem Alter der Bindemittelprobe.

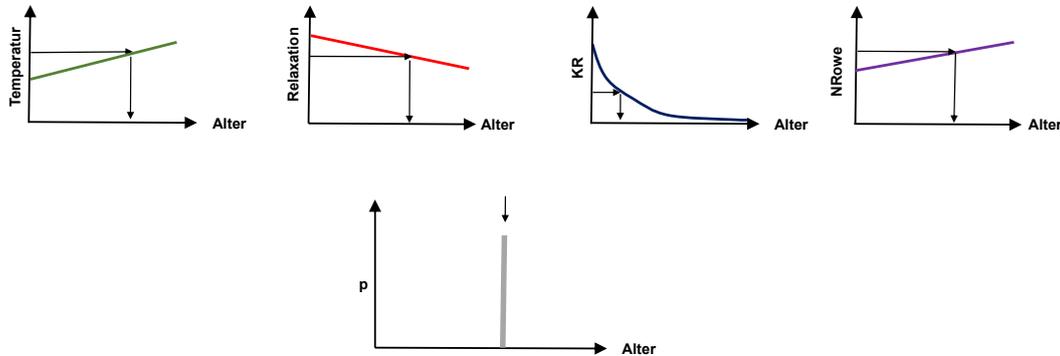


Abbildung 95: Deterministische Verknüpfung von Ergebnissen aus Bindemitteluntersuchungen zu einer Gesamtschätzung des Alters

Die Bestimmung des Alters kann ggf. durch eine kombinierte Anwendung der Prüfverfahren erfolgen. Die Ergebnisse der Alterungsbestimmungen aus den Bindemitteluntersuchungen werden gemittelt. Hierbei kann auch eine Gewichtung der einzelnen Verfahren vorgenommen werden, falls vermutet wird, dass eines der Verfahren eine höhere Aussagekraft für die Bestimmung des Alters aufweist.

Probabilistische Modellierung

Die bisherige deterministische Modellierung unterliegt der Annahme, dass entweder die Ergebnisse aus der Zustandserfassung und/oder die Ergebnisse aus den Laboruntersuchungen „wahr“ sind und keine Messfehler bzw. Unsicherheiten bei der Ermittlung dieser auftreten. Dies spiegelt jedoch nicht die Praxiserfahrung wider. Um die Unsicherheiten der Eingangsparameter abzubilden und Aussagen treffen zu können, welche Information aus Zustandserfassung oder Laborversuch verlässlicher ist, sollte die Auswertung probabilistisch umgesetzt werden. Dabei können die Unsicherheiten der einzelnen Versuche direkt in das Modell miteinfließen und bei der Ermittlung genutzt werden.

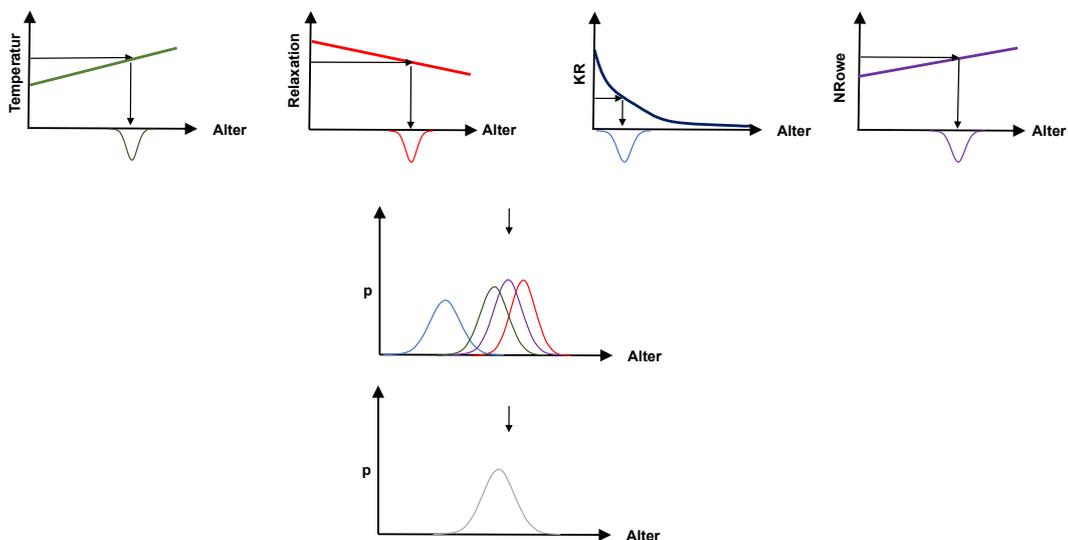


Abbildung 96: Probabilistische Verknüpfung von Ergebnissen aus Bindemitteluntersuchungen zu einer Gesamtschätzung des Alters

Abbildung 96 zeigt hierzu die probabilistische Auswertung von Prüfergebnissen zur Altersbestimmung einer Bindemittelprobe. Dabei wird jedem Prüfergebnis anhand der Alterungsfunktion und der Streuung dieser Funktion eine Verteilung der Altersschätzung zugewiesen. Analog zur deterministischen Modellierung können hierbei auch mehrere Prüfverfahren zur Altersbestimmung genutzt werden und deren Ergebnisse anhand ihrer Streuungen gewichtet werden.

Diese aus den Prüfverfahren gemittelte Altersverteilung kann schliesslich in die Zustandsprognose eines Oberflächenmerkmals integriert werden. Das Ergebnis ist anhand der unten dargestellten Abbildung 97 aufgezeigt, die die vorhandenen Unsicherheiten aus Zustandserfassung und Altersbestimmung in der Zustandsprognose quantifizieren kann. Die Umsetzung der probabilistischen Lösung ist mit der vorhandenen Methodik aus [34] durch die Verwendung des Extended Kalman-Filters jedoch nicht möglich. Durch das Vorhandensein von zwei Zufallsvariablen mit Zustand und Zeit ist hier eine Erweiterung notwendig, die bspw. mit Hilfe eines Partikelfilters umgesetzt werden kann. Dieses ist jedoch deutlich komplexer und verursacht mathematisch und modellierungstechnisch einen wesentlich höheren Aufwand. Dies muss somit einer weiteren Forschung vorbehalten bleiben.

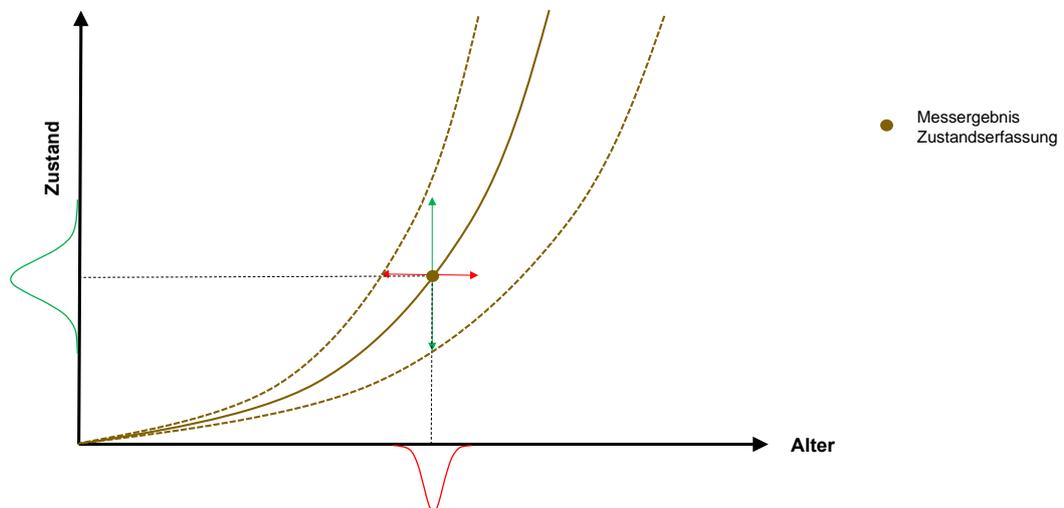


Abbildung 97: Zustandsprognose eines Oberflächenmerkmals mit den beiden streuenden Eingangsgrössen Alter und Zustand

7.8 Kapitelzusammenfassung

In diesem Kapitel wurden methodische Ansätze vorgestellt, die eine Integration von unterschiedlichen Materialuntersuchungen in die Modellbildung zur Zustandsprognose ermöglichen. Hierzu wurden zunächst verschiedene Kalibrierungsstufen der Modelle vorgestellt, die sich in Abhängigkeit der verwendeten Eingangsdaten differenzieren lassen. Dies beinhaltet zunächst die Ermittlung einer den jeweiligen Randbedingungen zugeordnete Masterkurve. Dies erfolgt durch Clusterung der Eingangsdaten und der anschliessenden clusterspezifischen Ermittlung der Funktionskoeffizienten der Masterkurve.

Ziel der Clusterung ist es hierbei, den Anteil an Streuungen innerhalb der Daten mit Hilfe der gefitteten Verhaltenskurve je Cluster zu minimieren. Zu diesem Zwecke wurde im Rahmen von auf Korrelationsanalysen basierenden Voruntersuchungen der potentielle Einfluss einzelner Materialkennwerte auf die Zustandsentwicklung der Oberflächeneigenschaften untersucht. Aufgrund einer verhältnismässig geringen Datengrundlage sowie vermuteten geringen Effektstärken konnten nur vereinzelt statistisch signifikante Abhängigkeiten festgestellt werden.

In einem nächsten Schritt erfolgte die abschnittsbezogene Kalibrierung mit Hilfe von Messergebnissen der Zustandserfassung. Eine Erweiterung der bestehenden Ansätze

erfolgte schliesslich durch die Integration von Bindemitteluntersuchungen in die Modellierung der Zustandsprognose. Hierzu wurden parameterspezifische Alterungskurven aus den Laboruntersuchungen zur Bestimmung der Ermüdungs-, Verformungs- und Rissbildungseigenschaften hergeleitet und aufgezeigt, wie diese in die bestehenden, sowohl deterministischen als auch probabilistischen, Ansätze zur Prognosemodellierung integriert werden können. Im folgenden Kapitel 8 wird anhand einer Prototyp-Anwendung die Anwendung der entwickelten Ansätze exemplarisch aufgezeigt.

8 Prototyp und exemplarische Anwendung

8.1 Allgemeines

Im Folgenden werden im Rahmen eines Realisierbarkeitstests anhand von Fallbeispielen unterschiedliche Varianten der Eingangsdaten zur Zustandsprognose durchgerechnet und visualisiert. Dabei werden die verschiedenen Stufen der Kalibrierung durchlaufen. Zunächst erfolgt eine Erläuterung der Grundstruktur des entwickelten Prototyps. Anschliessend werden die theoretischen und mathematischen Grundlagen der Kalibrierungsschritte erörtert. Zuletzt erfolgt die exemplarische Anwendung der beschriebenen Kalibrierungsschritte.

8.2 Grundstruktur des Prototyps

Mit einem Prototyp werden die erarbeiteten Modellansätze zur Anwendung gebracht. Die Implementierung des im Projekt entwickelten Modellierungsansatzes erfolgt als WEB-Anwendung unter Verwendung von Open Source Programmbibliotheken. Als Grundlage dient die von der IMC GmbH entwickelte Infrastructure Development Plattform (infDP), welche für das Prototyping in Forschungsprojekten und für die Entwicklung von Infrastruktur-Management-Systemen erfolgreich eingesetzt wird. Dies erfolgt in Form einer agilen bzw. iterativen Entwicklungsmethode, d. h. in enger Zusammenarbeit zwischen Programmierer und Fachanwender. Der dadurch entstehende Prototyp mit den implementierten Algorithmen wird anhand von Testdaten validiert. Im Folgenden werden Datenstruktur, Datengrundlage, Modellierungsparameter und Grundfunktionen innerhalb des Prototyps erläutert.

8.2.1 Datenstruktur

In Abbildung 98 sind die verschiedenen Datengrundlagen und ihre Verknüpfung untereinander skizziert, die zu einer schrittweisen Kalibrierung (Stufen 0 bis 2) von abschnittsbezogenen Verhaltenskurven angewendet werden. Nach Anwendung aller Teilschritte liegt je Abschnitt – sofern die entsprechenden Datengrundlagen netzweit vorliegen – eine zustands- und materialkalibrierte Verhaltensfunktion vor.

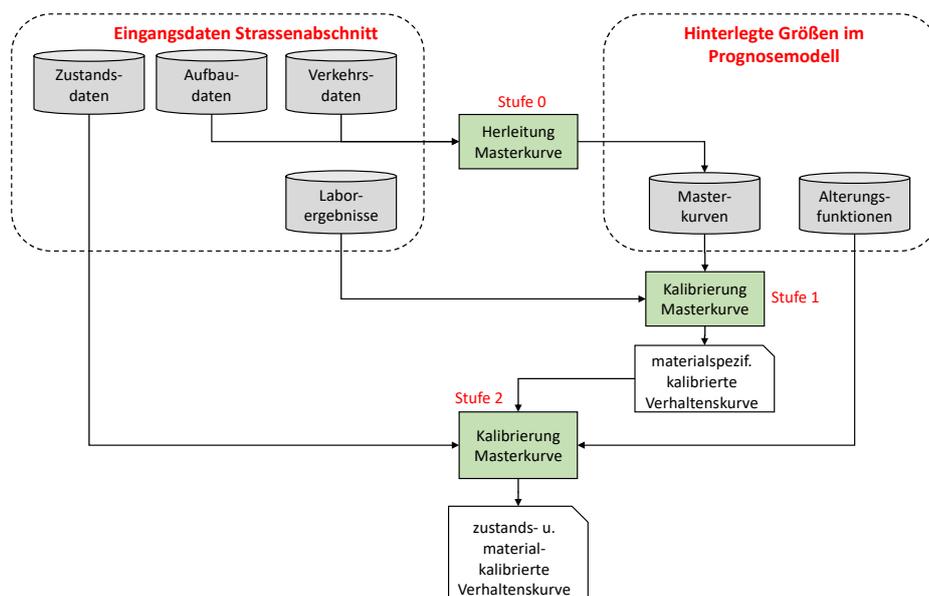


Abbildung 98: Teilschritte zur Kalibrierung einer Verhaltenskurve

8.2.2 Datengrundlage

Als Datengrundlage sind derzeit Inventar- und Zustandsdaten der Nationalstrassen des Bundesamts für Strassen (ASTRA) sowie Kantonstrassen des Kantons Uri enthalten. Dies umfasst die Grunddaten, Zustandsdaten, Aufbaudaten, Verkehrsdaten sowie Daten zu den Materialeigenschaften.

Die Ansicht zu einer ausgewählten Datenmenge im Prototyp ist exemplarisch in Abbildung 99 dargestellt. Dem Nutzer wird eine Tabelle der vorhandenen Eingangsdaten dargestellt. Da den Daten keine Georeferenzierung zugeordnet ist, werden diese nicht auf einer Karte dargestellt. Die Daten sind durch die Referenzierung im Netzknotenstationierungssystem für Deutschland in ihrer Lage eindeutig. In Österreich werden anstatt des Netzknotens die Attribute «Von_KM» und «Nach_KM» verwendet. In der Schweiz wird zusätzlich zum Netzknoten die Achsposition angefordert. Dies liegt im jeweiligen vorherrschenden linearen Bezugssystem begründet. Die Daten sind bereits in der internen Datenbank des Prototyps hinterlegt. Anpassungen der Datengrundlage sind nicht möglich. Durch Auswahl eines Objektes werden die entsprechenden Aufbau- und Zustandserfassungsinformationen in separaten Tabellen auf der rechten Seite dargestellt.

The screenshot shows the 'mapFalke' application interface. The main table displays road data with columns: ID, Land, Strasse, Achs..., Lage, Fahrtr..., Von_NK, Bis_NK, Von_St..., Bis_St..., Laenge, Anzahl..., and Jahr_le... The table contains 20 rows of data. On the right, there are two sidebars: 'Inspektionsdaten' and 'Eigenschaften'. The 'Inspektionsdaten' sidebar shows a table with columns: Zustandsmerkmal, Jahr, and Wert. The 'Eigenschaften' sidebar shows a table with columns: Cluster, Cluster Kategorie, Cluster, and Wert. Below the main table, there are navigation controls and a 'Netzanalyse' section with a 'Prognosezeitraum' of 20 and a 'Wahl Cluster Kombinationen' button.

ID	Land	Strasse	Achs...	Lage	Fahrtr...	Von_NK	Bis_NK	Von_St...	Bis_St...	Laenge	Anzahl...	Jahr_le...
003978	CH	N13	-	-1	1	1330	1330	627.617	593.387	6.318	-99	2010
018951	CH	N16	+	1	1	240	250	999.174	86.028	14.999	2	2016
036163	CH	N13	=	-1	1	2940	2940	751.184	757	26.152	2	2017
306608	CH	N12	-	-1	2	10	10	55.066	85.571	88.364	2	2007
271140	CH	N5	-	-1	2	40	40	653.999	625.46	14.971	-99	1995
069864	CH	N2	-	-1	2	2190	2190	600	599.103	6.566	2	1999
218973	CH	N1	-	-1	1	520	520	140.985	199.976	44.362	-99	1993
235935	CH	N9	+	1	1	900	900	499.775	502.91	13.351	2	1993
106050	CH	N1	+	1	3	35	35	499.999	516.999	53.036	3	1978
295749	CH	N8	=	1	1	10	10	55.066	85.571	0.931	2	1989
049034	CH	N2	+	1	1	1190	1190	397.612	400.006	7.592	2	2013
279586	CH	N5	-	-1	1	68	68	100	99.877	15.966	-99	2001
099074	CH	N1	+	1	2	3000	3000	198.741	214.263	2.207	2	2007
293411	CH	N8	=	1	1	10	10	55.066	85.571	59.572	2	2000
305584	CH	N12	-	-1	2	10	10	55.066	85.571	6.537	-99	2007
216538	CH	N1	-	-1	2	830	830	900.486	966.214	1.37	2	2014
292296	CH	N8	=	1	1	10	10	55.066	85.571	4.71	4	1997
253174	CH	N9	-	-1	1	930	930	467.99	432	6.924	2	1986
092683	CH	N2	-	-1	1	3710	3710	99.909	121.316	45.746	2	2014
013090	CH	N16	-	-1	1	290	290	399.279	397.143	1.06	-99	2005
016727	CH	N16	-	-1	1	620	620	414	422	5.412	-99	2013
124012	CH	N1	+	1	2	350	350	162.325	170.862	18.007	2	2000

Abbildung 99: Überblick zur Datengrundlage innerhalb des Prototyps

Folgende Attribute zu den Grunddaten sind im Prototyp enthalten:

Tabelle 27: Übersicht der Grunddaten

Attribut	Bedeutung	Anmerkung
ID	ID	Eindeutige Kennzeichnung eines Abschnittes
Land	Strassennetz	CH, Kanton Uri
Strasse / Achse	Strassen-/Achsennummer	z. B. "N13"
Achsposition	Strassenachsenlage	
Lage	Lage	
Fahrstreifen	Fahrstreifen	Beschreibt, ob das Strassenobjekt als eine innere, mittlere oder äussere Fahrspur gilt. Die Nummer «1» weist auf eine Hauptfahrspur hin, die «2» auf die Fahrspur links von der Hauptfahrspur und so weiter.
Von_NK	Von Netzknoten (Bezugspunkt)	Knoten-Stationierung wird in der Schweiz (als Bezugspunkt) verwendet.
Nach_NK	Nach Netzknoten (Bezugspunkt)	
Von_Station	Von Station (CH: U-Wert)	
Bis_Station	Bis Station (CH: U-Wert)	
Laenge	Länge	
AnzahlIFS	Anzahl Fahrstreifen	Gibt die Gesamtzahl an Fahrstreifen eines Abschnittes wieder.
Jahr_LetzteMassnahme	Jahr der letzten Massnahme	Anhand des Jahres der letzten Massnahme wird die Liegezeit des Abschnittes ermittelt.

Folgende Attribute zu den Zustandsdaten sind im Prototyp enthalten:

Tabelle 28: Übersicht der Zustandserfassungsdaten

Attribut	Bedeutung	Anmerkung
ZG_I1/I0_####	Belagsschäden	
ZG_IA2_####	Belagsschäden	Einzelindex IA2 des I1/I0
ZG_IA3oT_####	Verformungen ohne Spurrinnen	Einzelindex IA3 des I0
ZG_IA3mT_####	Verformungen mit Spurrinnen	Einzelindex IA3 des I1
ZG_IA4_####	Strukturelle Schäden	Einzelindex IA4 des I1/I0
ZG_I2_####		
ZG_LAE-sW_####	Standardabweichung der Winkelwerte	Längsebenheit mit Winkelmessgerät/Goniograph
ZG_I3_####		
ZG_Tmax_####	Spurrinentiefe	
ZG_I4_####		
ZG_GRI-SKM_####	Griffigkeit	Wird in CH mit dem Seitenkraftmessverfahren (SKM) erhoben. _#### bezeichnet das Jahr der Erfassung
ZG_I5_####	Tragfähigkeit	
Anmerkung: _####	Jahr der Erfassung	

Folgende Attribute zu den Aufbaudaten können im Prototyp abgebildet werden:

Tabelle 29: Übersicht der Aufbaudaten

Attribut	Bedeutung
d_s1	Dicke Schicht 1
Material_s1	Material Schicht 1
bj_s1	Baujahr Schicht 1
d_s2	Dicke Schicht 2
Material_s2	Material Schicht 2
bj_s2	Baujahr Schicht 2
d_s3	Dicke Schicht 3
Material_s3	Material Schicht 3
bj_s3	Baujahr Schicht 3
d_s4	Dicke Schicht 4
Material_s4	Material Schicht 4
bj_s4	Baujahr Schicht 4

Folgende Attribute zu den Verkehrsdaten können im Prototyp abgebildet werden:

Tabelle 30: Übersicht der Verkehrsdaten

Attribut	Bedeutung	Anmerkung
DTV	Durchschnittlicher täglicher Verkehr	Kfz/24h
SV	Durchschnittlicher täglicher Schwerverkehr	Kfz/24h
SV_FS	SV_FS	Der auf Fahrstreifen aufgeteilte Schwerverkehr.
VLK	Verkehrslastklasse	belastungsbezogenes Attribut für Daten des Kanton Uri

Folgende weitere Attribute können im Prototyp abgebildet werden:

Tabelle 31: Übersicht zu weiteren im Prototyp enthaltenen Attributen

Attribut	Bedeutung	Anmerkung
Bindemittel		materialbezogenes Attribut
Schichtsorte		materialbezogenes Attribut
Bauweise		materialbezogenes Attribut
ausserorts / innerorts		lagebezogenes Attribut
Region	Berg / Tal	lagebezogenes Attribut
Erschliessungsqualität	EQS-Klassen A bis E	verkehrstechnisches Attribut

8.2.3 Grundfunktionen

Der Prototyp verfügt über die beiden Grundfunktionen Netzanalyse und Objektanalyse.

Netzanalyse

Die Netzanalyse ermöglicht die vorhandene Datengrundlage in Abhängigkeit vom Anwender festgelegten Kriterien auszuwerten (vgl. Kapitel 8.3.2).

Objektanalyse

Die Objektanalyse ermöglicht, aufbauend auf den ermittelten Ergebnissen der Netzanalyse eine objektspezifische Kalibrierung einer Verhaltensfunktion anhand von Messergebnissen der Zustandsinspektion und/oder von weiteren Materialuntersuchungen durchzuführen (vgl. Kapitel 8.3.3 und 8.3.4).

8.2.4 Modellparameter und Randbedingungen

Als Funktionstyp wurde für alle Zustandsgrößen und -werte folgende Ansatz verwendet:

$$y = a \cdot t^b + c$$

Durch Festlegung von Randbedingungen für die jeweiligen Parameter können beliebige Funktionsverläufe modelliert werden. Der Funktionstyp sollte jedoch zunächst basierend auf einem phänologischen Modell gewählt werden. Für die Modellierung sind die nachfolgenden Modellparameter innerhalb des Prototyps hinterlegt. Folgende Funktionstypen und Randbedingungen je Zustandsgröße bzw. -wert sind für die zu ermittelnden Masterkurven im Prototyp hinterlegt:

Tabelle 32: Gewählte Randbedingungen der Funktionsparameter je Zustandsgröße bzw. -wert

Zustandsmerkmal	Zustandsgröße /-wert	a _{min}	a _{max}	b _{min}	b _{max}	c _{min}	c _{max}	Q
Längsebenheit	S _w	0	3	1	1	0	0	0.500
	I2	0	3	1	1	0	2	0.500
Querebenheit	T _{max}	0	5	0	0.5	0	0	0.100
	I3	0	5	0	1	0	0	0.100
	IA3	0	5	1	10	0	0	0.100
Griffigkeit	μ _{SKM}	-2	0	1	1	0.4	0.8	0.0005
	I4	-2	0	1	1	0	4	0.0005
	IA4	0	5	1	10	0	0	0.1000
Belagsschäden	I0/I1	0	5	1	10	0	0	0.100
	IA2	0	5	1	10	0	0	0.500
Tragfähigkeit	I5	-2	0	1	1	0	4	0.0025

Folgende Werte für die Standardabweichung unter Vergleichsbedingungen sind für die Abbildung der Messpräzision der Oberflächenmerkmale im Prototyp hinterlegt:

Tabelle 33: Hinterlegte Standardabweichungen unter Vergleichsbedingungen je Zustandsgrösse bzw. -wert

Zustandsmerkmal	Beschreibung	Zustandsgrösse /-wert	Einheit	Standardabweichung unter Vergleichsbedingungen
Längsebenheit	Standardabweichung der Winkelwerte	S_w	[‰]	0.3
	Längsebenheit	I2	[-]	0.3
Querebenheit	Spurrinnentiefe	T_{max}	[mm]	0,982
	Querebenheit	I3	[-]	0.9
	Querebenheit	IA3	[-]	0.2
Griffigkeit	Reibungskoeffizient	μ_{SKM}	[-]	0.042
	Griffigkeit	I4	[-]	0.0005
	Griffigkeit	IA4	[-]	0.2
Belagsschäden	Belagsschäden	I0/I1	[-]	0.2
		IA2	[-]	0.2
Tragfähigkeit	Tragfähigkeit	I5	[-]	0.008

8.3 Theoretische Grundlagen und Berechnungsschritte

8.3.1 Allgemeines

Im Folgenden werden die theoretischen und mathematischen Grundlagen, die innerhalb des Prototyps implementiert wurden, vorgestellt. Dies beinhaltet die Erläuterung der einzelnen Kalibrierungsstufen von Verhaltensfunktionen zur Zustandsprognose von Fahrbahnen anhand von Anwendungsfällen. Folgende Anwendungsfälle sollten prototypisch in Anlehnung an [42] umgesetzt werden:

- Fall 0:** Erstellung von clusterspezifischen Masterkurven (Stufe 0 und 1)
- Fall 1:** Kalibrieren der Verhaltensfunktion anhand eines Messergebnisses aus der Zustandserfassung (Stufe 2)
- Fall 2:** Kalibrieren der Verhaltensfunktion anhand von Ergebnissen aus Laboruntersuchungen (Stufe 3)

Grundsätzlich gilt, dass alle Anwendungsfälle sowohl mit Hilfe von deterministischen als auch probabilistischen Methoden umgesetzt werden können. Im Rahmen dieser Forschung wurden die Fälle 0 und 2 mit Hilfe von deterministischen Methoden umgesetzt. Für die zustandsbasierte Kalibrierung im Rahmen des Falls 1 erfolgte eine probabilistische Umsetzung der Methodik.

8.3.2 Fall 0: Erstellung von clusterspezifischen Masterkurven (Stufe 0 und 1)

Zu Erstellung von clusterspezifischen Masterkurven kann der Anwender zu Beginn festlegen, nach welchen Kriterien bzw. Einflussfaktoren eine Clusterung der Daten vorgenommen werden soll. In Abhängigkeit von der gewählten Clusterung werden clusterspezifische Masterkurven erstellt. Unabhängig von jeglichen Randbedingungen sind zudem im Prototyp Masterkurven für jedes Zustandsmerkmal hinterlegt, die aus der Literatur entnommen wurden. Als Funktionstyp wird folgende Grundgleichung verwendet:

$$y(t) = a \cdot t^b + c$$

Für jedes Cluster werden die Funktionskoeffizienten der Masterkurven mit Hilfe des statistischen Analyseverfahrens Methode der kleinsten Quadrate (Least-Squares) ermittelt.

Der Anwender wählt zunächst das zu analysierende Zustandsmerkmal aus und bestimmt die Art und Anzahl an Kombinationen an Attributen, die bei der Clusterung berücksichtigt werden sollen.

Nach dem Durchlaufen des Algorithmus erhält der Anwender die Ergebnisse für jedes Cluster. Hierzu zählen die folgenden statistischen Kenngrößen:

- Funktionskoeffizienten der Masterkurven
- Bestimmtheitsmass der Masterkurve
- Stichprobengröße

Des Weiteren kann sich der Anwender durch Auswählen der einzelnen Cluster die jeweils ermittelten Masterkurven und die den Berechnungen zugrundeliegenden Datenpunkte grafisch anzeigen lassen. *Abbildung 100* zeigt exemplarisch die ermittelte Masterkurve der Spurrinntiefen für ein zuvor ausgewähltes Cluster mit Angabe der Stichprobengröße (N) und dem Bestimmtheitsmass (R^2).

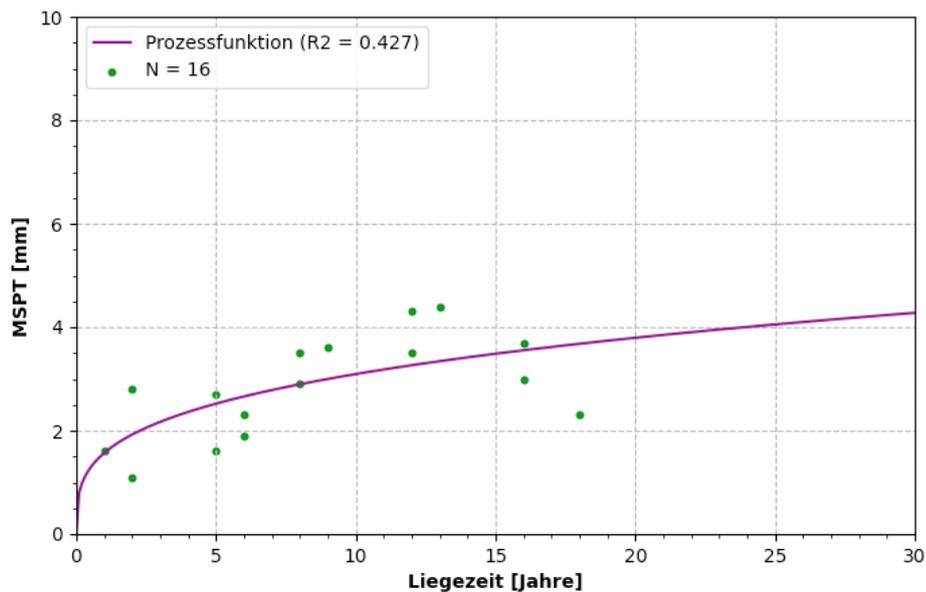


Abbildung 100: Grafische Ausgabe einer Masterkurve für ein Cluster mit Angabe der Stichprobengröße ($N=16$) und Bestimmtheitsmass ($R^2=0.427$)

8.3.3 Fall 1: zustandsbasierte Kalibrierung (Stufe 2)

Im Rahmen dieses Anwendungsfalls liegt bereits eine (materialspezifische) Masterkurve aus Kalibrierungsstufe 0 bzw. 1 vor. Diese wird auf Basis des Messergebnisses der aktuellen Zustandserfassung zustandsbezogen kalibriert. Dieses Verfahren spiegelt die aktuelle Praxis zur zustandsbasierten Kalibrierung von Verhaltensfunktionen wider.

Als Eingangsdaten dienen folgende Informationen:

- kalibrierte (materialspezifische) Masterkurve aus Kalibrierungsstufe 1:
 - o Funktionstyp (z. B. linear, degressiv, progressiv)
 - o kalibrierte Funktionskoeffizienten (z. B. a , b , c)
- Messergebnis der letzten Zustandserfassung:

- Zustandsgrösse
- Jahr der Zustandserfassung
- Einbaudatum des Strassenabschnittes

Anschliessend werden die folgenden Berechnungsschritte umgesetzt:

Berechnung des Alters des Strassenabschnittes

Zunächst muss das Alter des Strassenabschnittes zum Zeitpunkt der letzten Zustandserfassung berechnet werden:

$$t_i = t_{ZEB} - t_{\text{Jahr der letzten Massnahme}}$$

mit: t_i Alter bzw. Liegezeit des Strassenabschnittes
 t_{ZEB} Jahr der Zustandserfassung
 t_{Einbau} Jahr der letzten Erhaltungsmassnahme

Für die Anpassung der Masterkurve stehen die beiden Methoden „Koeffizientenanpassung“ und „Curve-Shifting-Verfahren“ zur Auswahl:

Koeffizientenanpassung (Curve-Bending-Verfahren)

Das Verfahren der Koeffizientenanpassung ist in den RPE-Stra 01 [93] beschrieben. Bei diesem Verfahren werden die Koeffizienten b und c beibehalten und der Koeffizient a mit folgender Formel neu berechnet:

$$a_{neu} = \frac{(ZG - c)}{t_i^b}$$

mit: ZG Zustandsgrösse zum aktuellen Messzeitpunkt
 t_i Liegezeit bzw. Alter
 a, b, c spezifische Verlaufskoeffizienten

Die Koeffizientenanpassung ermöglicht sowohl eine Variation der Geschwindigkeit der Zustandsverschlechterung als auch eine Variation der Form des Funktionsverlaufs. Durch die Anpassung des Koeffizienten wird der Funktionsverlauf so angepasst, dass dieser durch das letzte Messergebnis der Zustandserfassung verläuft. Bei der Anwendung der Koeffizientenanpassung innerhalb des EKF wird jedoch anstelle des letzten Messergebnisses die letzte Schätzung des Zustands verwendet. In *Abbildung 101* ist die Kalibrierung einer Verhaltenskurve mit Hilfe der Koeffizientenanpassung exemplarisch dargestellt.

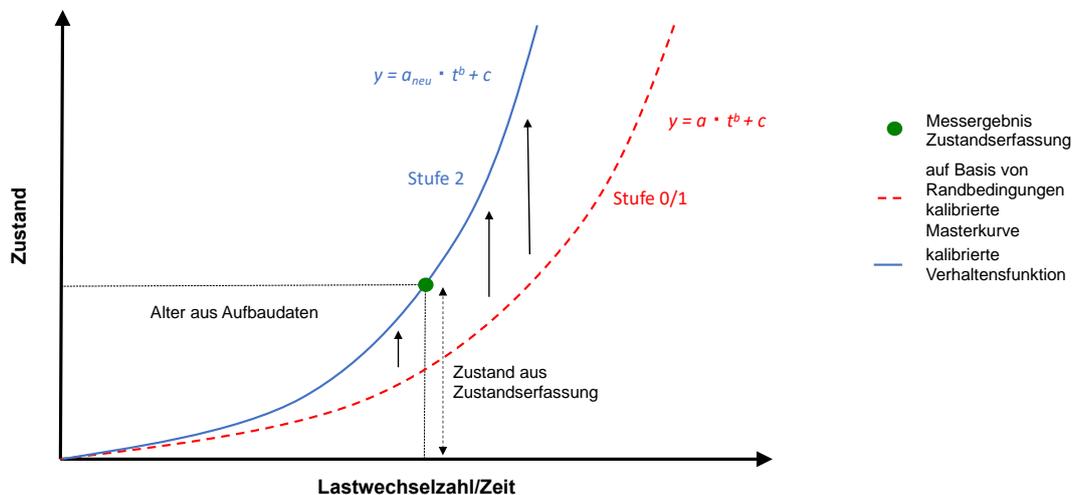


Abbildung 101: Aktualisierung einer Verhaltenskurve mit Hilfe der Koeffizientenanpassung

Als Ergebnis der Koeffizientenanpassung liegt eine anhand eines Messergebnisses kalibrierte Verhaltensfunktion mit zugehörigen Funktionskoeffizienten vor:

$$y_{(t)} = a_{neu} \cdot t^b + c$$

Curve-Shifting-Verfahren

Das in Maerschalk & Socina (2008) dokumentierte Curve-Shifting-Verfahren beinhaltet eine Verschiebung der ursprünglichen Verhaltensfunktion entlang der Ordinate. Dazu wird anhand des Deckschichtalters und der theoretischen Verhaltensfunktion der SOLL-Wert für die Zustandsgrösse im aktuellen und vorherigen Jahr bestimmt. Die Differenz dieser beiden Werte wird anschliessend zu dem tatsächlichen IST-Wert des Vorjahres hinzuaddiert:

$$ZG_{(t)} = ZG_{(t-1)} + (ZG_{SOLL(t)} - ZG_{SOLL(t-1)})$$

mit:

$ZG_{(t)}$	IST-Zustand im aktuellen Jahr
$ZG_{(t-1)}$	tatsächlicher Zustand im vorherigen Jahr
$ZG_{SOLL(t)}$	SOLL-Wert für den Zustand im aktuellen Jahr
$ZG_{SOLL(t-1)}$	SOLL-Wert für den Zustand im vorherigen Jahr

Demnach berechnet sich der neu kalibrierte Funktionskoeffizient c_{neu} zu:

$$c_{neu} = c + (ZG_{SOLL(t)} - ZG_{SOLL(t-1)})$$

In *Abbildung 102* ist die Kalibrierung einer Verhaltenskurve mit Hilfe dem Curve-Shifting-Verfahren exemplarisch dargestellt.

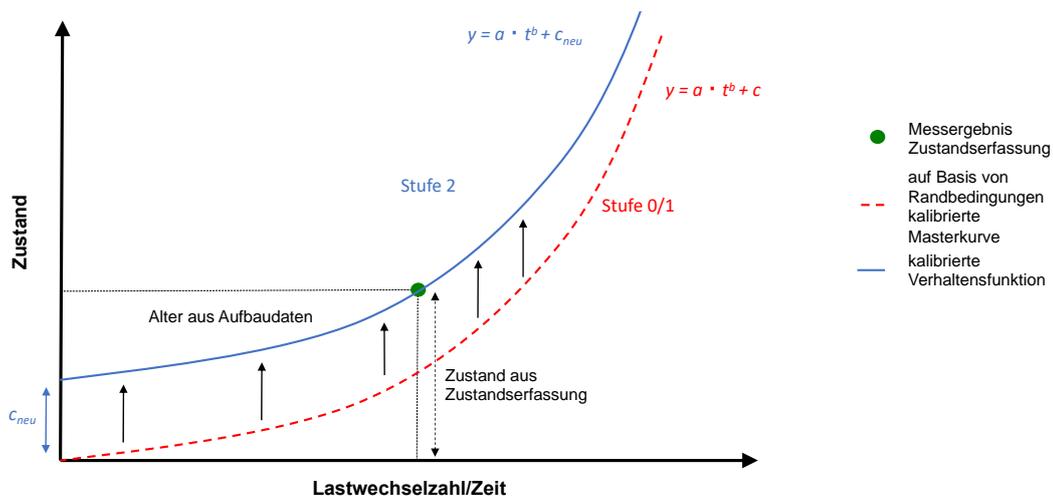


Abbildung 102: Aktualisierung einer Verhaltenskurve mit Hilfe der Koeffizientenanpassung

Als Ergebnis des Curve-Shifting-Verfahrens liegt eine anhand eines Messergebnisses kalibrierte Verhaltensfunktion mit zugehörigen Funktionskoeffizienten vor:

$$y_{(t)} = a \cdot t^b + c_{neu}$$

8.3.4 Fall 2: materialspezifische Kalibrierung – Integration der Bindemittelalterung (Stufe 3)

Im Rahmen des zweiten Anwendungsfalls wird auf Basis einer zusätzlichen Laboruntersuchung eine materialbezogene Masterkurve kalibriert. In diesem Anwendungsfall werden die Ergebnisse aus Laboruntersuchungen mit dem dynamischen

Scherrheometer (DSR) zur Ermittlung der Bindemittelalterung verwendet, um die Verhaltensfunktion für Oberflächenschäden in Form von z. B. Rissen (IA2) anzupassen.

Als Ausgangslage liegt ein Ergebnis einer Materialuntersuchung zur Ermittlung des Alterungsverhaltens eines Bindemittels vor, für dessen Berücksichtigung eine quantitative Interpretation bzw. Umrechnung der Laborergebnisse notwendig ist.

Als Eingangsdaten dienen die folgenden Informationen:

- kalibrierte Masterkurve aus Anwendungsfall 1:
 - Funktionstyp (z. B. linear, degressiv, progressiv)
 - Kalibrierte Funktionskoeffizienten (z. B. a , b , c)
- Messergebnis der letzten Zustandserfassung:
 - Zustandsgrösse
 - Jahr der Zustandserfassung
- Informationen zur Bindemitteluntersuchung (bisher ausserhalb des Prototyps)
 - Ergebnisparameter ($N_{Rowe,10}$, $N_{Rowe,20}$, KR , SR_{10} , SR_{20})
 - Messreihe zum Alterungsverhalten des Bindemittels
 - Jahr der Bindemitteluntersuchung
- Einbaudatum des Strassenabschnittes

Die Kalibrierung des Funktionskoeffizienten b erfolgt anhand einer quantitativen Bewertung einer Messreihe der Bindemitteluntersuchung im Vergleich zum Referenzbindemittel. Hierbei ist zu beachten, dass b vor allem den qualitativen Kurvenverlauf bestimmt. Daher ist b nur innerhalb eines zu definierenden Wertebereichs so anzupassen, dass der ursprüngliche qualitative Zustandsverlauf erhalten bleibt. Abbildung 103 zeigt hierzu exemplarisch unterschiedliche qualitative Schadensverläufe in Abhängigkeit von der Variation des Koeffizienten b zwischen 1,0 und 2,2. Während entlang der Abszisse das Alter eines Strassenabschnittes dargestellt ist, wird auf der Ordinate der Zustand eines Oberflächenmerkmals, z. B. das Ausmass an Rissen bezogen auf eine Referenzfläche, abgebildet.

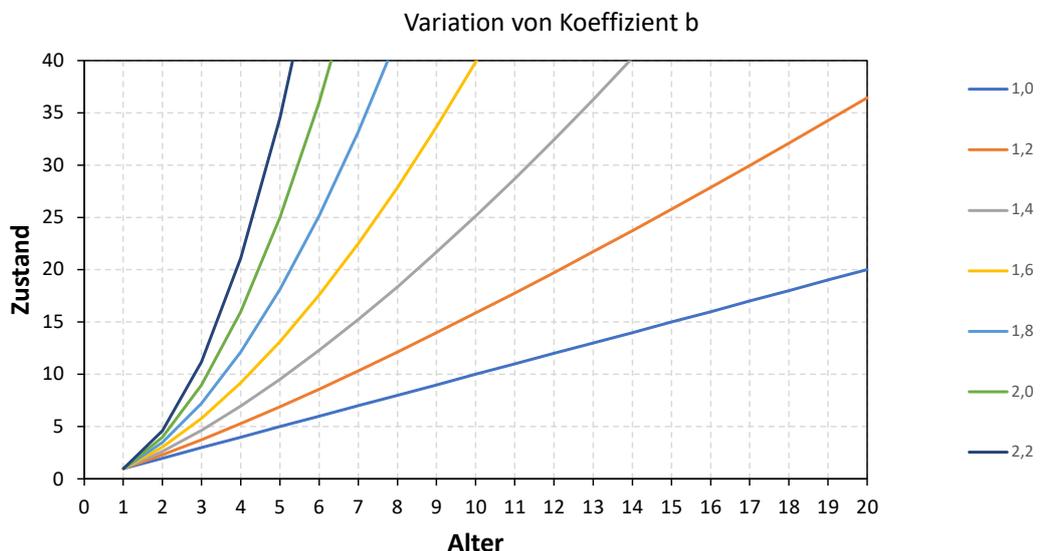


Abbildung 103: Qualitative Schadensverläufe in Abhängigkeit von der Variation des Koeffizienten b

Im Falle, dass ein Alterungsverfahren im Labor angewendet wird, kann das Verhältnis der Steigungen der Alterungskurven ermittelt werden und ein Kalibrierfaktor für die Ermittlung des Parameter b bestimmt werden. Im vorliegenden Fall wurde bei einer Liegezeit von 6 Jahren eine Bindemittelprobe entnommen und diese anschliessend gealtert. Aus den Messergebnissen zur Spannungsrelaxation im betrachteten Abschnitt konnte eine mittlere Abnahme von 0,15 ermittelt werden. Der Parameter b berechnet sich dann aus dem

Verhältnis zwischen der Steigung des Referenzbindemittels $m_{SR,Ref}$ und des untersuchten Bindemittels $m_{SR,Abschnitt}$:

$$b_{neu,m} = b_{alt} \cdot \frac{m_{SR,Abschnitt}}{m_{SR,Ref}} \cdot kf_{Alterung} = b_{alt} \cdot \frac{-0,15}{-0,45} = b_{alt} \cdot 0,333 \cdot kf_{Alterung}$$

Der in der Gleichung enthaltene Kalibrierfaktor $kf_{Alterung}$ beschreibt den Einfluss der Alterung auf die Änderung des Oberflächenzustands. Dieser muss noch mit realen Daten bei der Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Alterung, Belastung und Oberflächenzustand ermittelt werden (vgl. Kapitel 9.4.2). Abbildung 104 veranschaulicht die Auswertung einer Messreihe an Laborergebnissen zur Integration in die Zustandsprognose eines Oberflächenmerkmals.

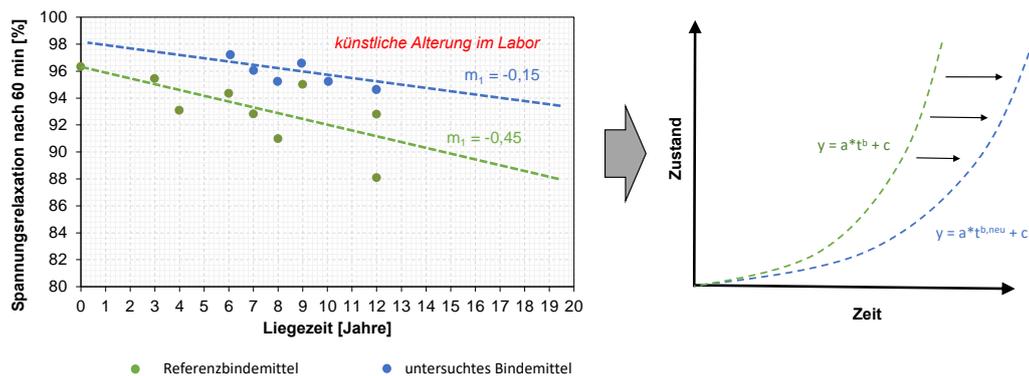


Abbildung 104: Aktualisierung des Parameters b in Abhängigkeit der Ergebnisse der künstlichen Bindemittelalterung

Im Ergebnis wurde der Parameter b der Masterkurve anhand der Bindemitteluntersuchung neu ermittelt und kann als Eingangsgröße für die zustandsbasierte Kalibrierung genutzt werden.

8.4 Anwendungsbeispiele

8.4.1 Allgemeines

Im Folgenden werden die zuvor beschriebenen theoretischen Grundlagen bzw. Berechnungsschritte am Beispiel von konkreten prototypischen Anwendungsfällen aufgezeigt. Dabei werden die einzelnen Schritte, die vom Anwender durchzuführen sind, detailliert beschrieben und anhand von Screenshots dargestellt. Die Darstellung der Anwendungsfälle erfolgt hierbei exemplarisch am Beispiel der Zustandsmerkmale Belagsschäden I0/I1 sowie Spurrinntiefe T.

Zu Beginn der Untersuchung kann der Anwender das zu analysierende Zustandsmerkmal per Dropdown-Menü auswählen. Für die Durchführung einer netzweiten Kalibrierung (Anwendungsfall 0) muss der Anwender auf der linken Seite des Bildschirms die Funktion „Netzanalyse“ auswählen. Für die Anwendung der abschnittsbezogenen zustands- und materialbezogenen Kalibrierung ist die Funktion „Objektanalyse“ entsprechend auszuwählen (vgl. Abbildung 105).

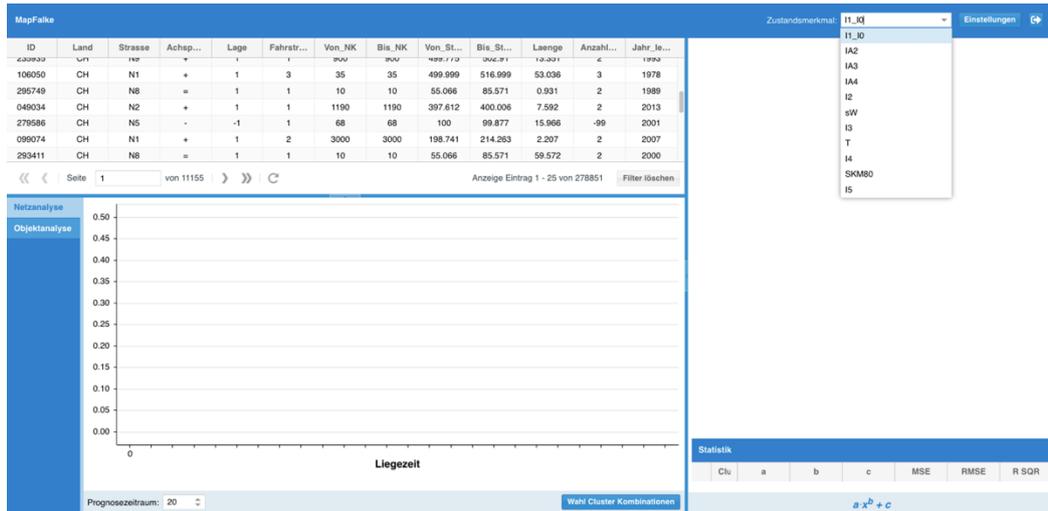


Abbildung 105: Auswahl des zu analysierenden Zustandsmerkmals innerhalb des Prototyps

8.4.2 Fall 0: Netzweite materialspezifische Kalibrierung der Masterkurve

Für eine netzweite materialspezifische Kalibrierung von Masterkurven kann der Anwender zunächst eine Kombination an Kategorien auswählen, die für die Clusterung angewendet wird. Er kann hierbei eine Auswahl von bis zu drei Kategorien treffen (vgl. Abbildung 106).

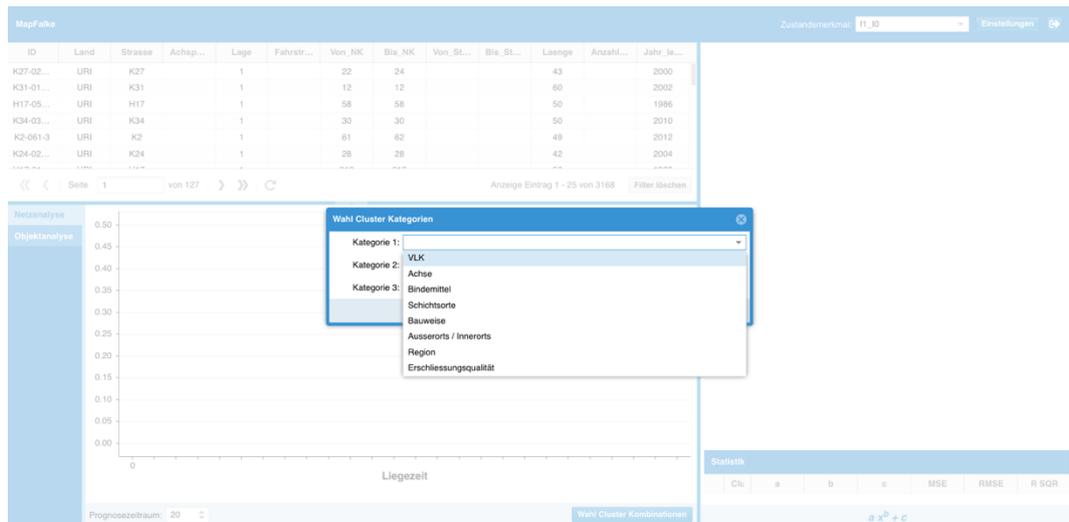


Abbildung 106: Auswahl der Clusterkategorien und -kombinationen

Nach Auswahl der Clusterkombinationen und dem auszuwertenden Zustandsmerkmal erfolgt die Ermittlung der Masterkurven für alle ausgewählten Clusterkombinationen. Nachfolgende Abbildung 107 zeigt exemplarisch das Ergebnis für eine clusterspezifische Masterkurve für das Zustandsmerkmal Spurrinntentiefe T und Abschnitte in Asphaltbetonbauweise.

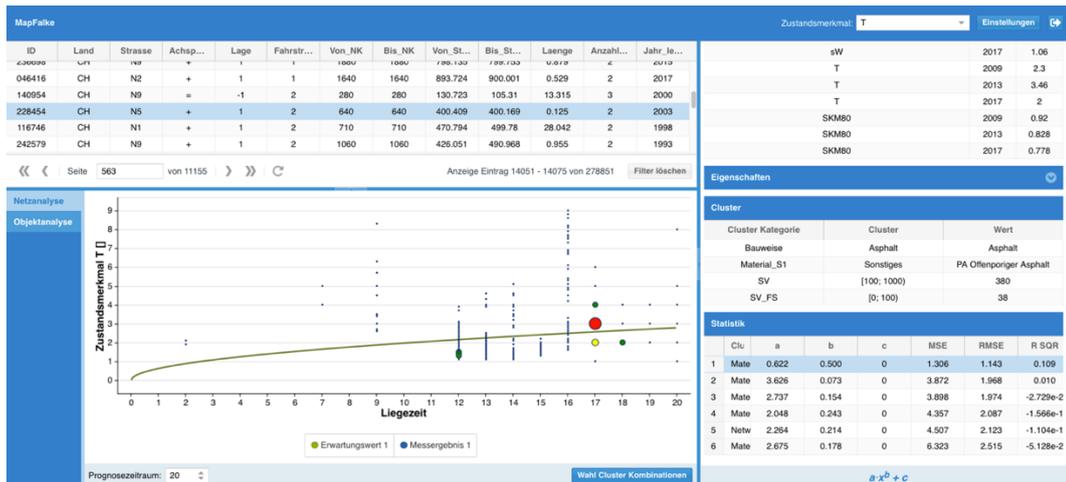


Abbildung 107: Anzeige einer Masterkurve des Zustandsmerkmals T für Abschnitte in Asphaltbeton-Bauweise

In der rechten unteren Ecke des Bildschirms werden dem Anwender die statistischen Kenngrößen je Clusterkombination tabellarisch zur Verfügung gestellt. Dies beinhaltet die Bezeichnung des Clusters, die ermittelten Funktionskoeffizienten der Masterkurve sowie die statistischen Kenngrößen Mean Squared Error (MSE), Root Mean Squared Error (RMSE), Bestimmtheitsmass (R SQR) und die Stichprobengröße (N). Damit wird dem Anwender die Möglichkeit gegeben zu untersuchen, durch welche Clusterung eine grösstmögliche Reduzierung der Streuung erfolgen kann.

In Abbildung 108 ist ein weiteres Beispiel zu einer clusterspezifischen Masterkurve gegeben. Hierbei wurde die zeitliche Entwicklung des Zustandsmerkmals I0/I1 in Abhängigkeit vom vorhandenen Bindemittel geclustert. Das Diagramm im linken Bildschirmbereich zeigt hierzu die netzweite Zustandsentwicklung des Merkmals I0/I1 für Abschnitte in Betonbauweise mit Portlandzement.

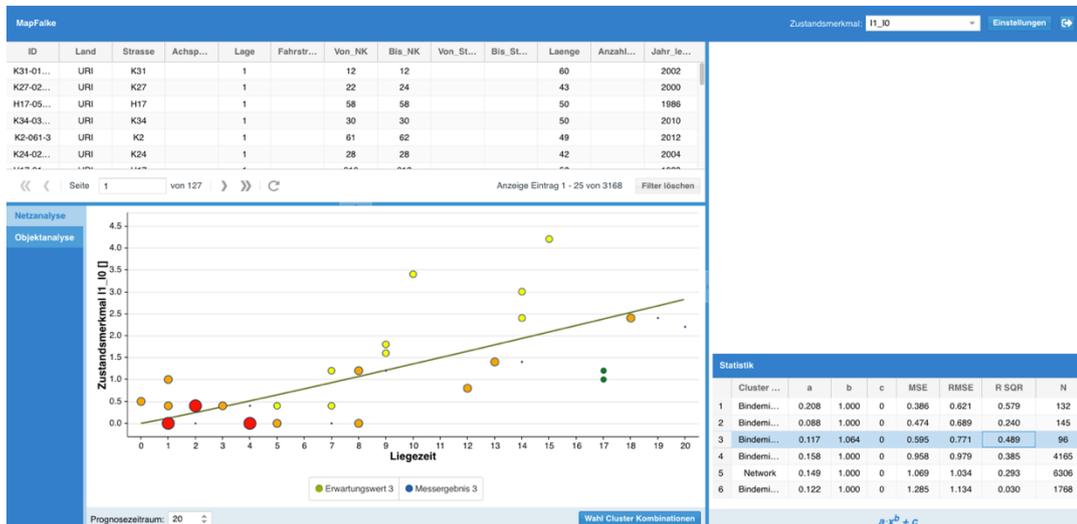


Abbildung 108: Anzeige einer Masterkurve des Zustandsmerkmals I0/I1 für Abschnitte in Betonbauweise (CEM Portlandzement)

8.4.3 Fall 1: Abschnittsbezogene zustandsbasierte Kalibrierung der Verhaltensfunktion

Im Rahmen des Anwendungsfalls 2 kann der Anwender eine abschnittsspezifische Anpassung der Masterkurve anhand von Messergebnissen der Zustandserfassung

vornehmen. Dies erfolgt mit Hilfe des probabilistischen Verfahrens eines Extended Kalman-Filters. Der Anwender kann hierbei auswählen, ob er die Anpassung der Funktion an die Messergebnisse der Zustandserfassung mit Hilfe des Curve-Shifting-Verfahrens oder der Koeffizientenanpassung vornehmen möchte.

Für die Objektanalyse eines einzelnen Abschnittes kann zusätzlich die zuvor anhand der netzweiten Kalibrierung ermittelte Masterkurve als Eingangsgrösse genutzt werden (vgl. *Abbildung 109*). Diese ist über das Dropdown-Menü am unteren Bildschirm auszuwählen.

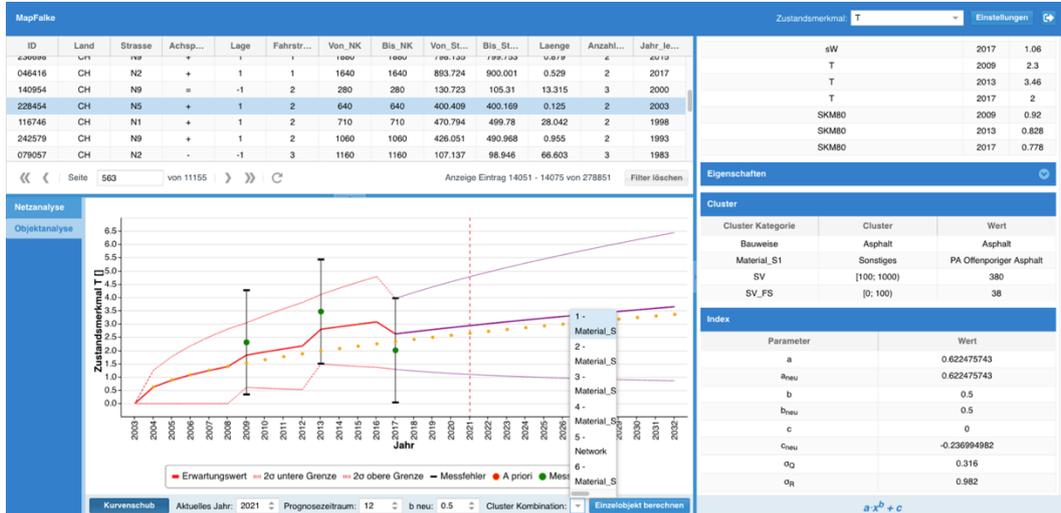


Abbildung 109: Ergebnis einer abschnittsbezogenen zustandsbasierten Kalibrierung einer Verhaltensfunktion für das Zustandsmerkmal T mit Hilfe eines Extended Kalman-Filters

In der rechten unteren Ecke des Bildschirms werden dem Anwender die Indizes für die abschnittsbezogene Kalibrierung der Verhaltensfunktion angezeigt. Dies beinhaltet die ursprünglichen Funktionskoeffizienten a , b und c der Masterkurve sowie die anhand der Messergebnisse der Zustandsinspektion angepassten Funktionskoeffizienten a_{neu} und c_{neu} der kalibrierten Verhaltensfunktion. Weiterhin werden die probabilistischen Kennwerte Q und R angegeben, die das angenommene Prozessrauschen der Verhaltensfunktion sowie die Messunsicherheit der Zustandsmerkmale wiedergeben.

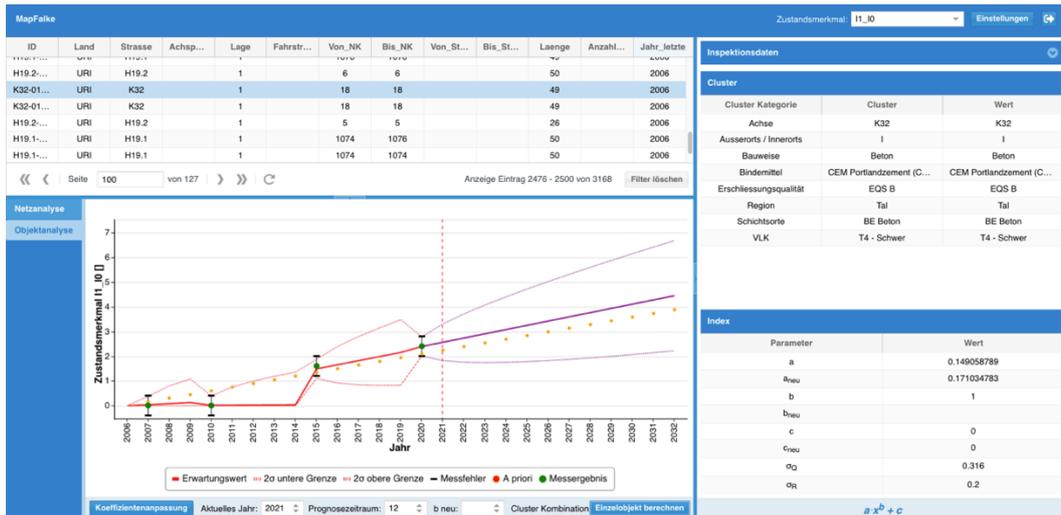


Abbildung 110: Ergebnis einer abschnittsbezogenen zustandsbasierten Kalibrierung einer Verhaltensfunktion für das Zustandsmerkmal IO/1 mit Hilfe eines Extended Kalman-Filters

8.4.4 Fall 2: Abschnittsbezogene materialspezifische Kalibrierung

Eine materialspezifische Kalibrierung der Verhaltensfunktion kann schliesslich im Rahmen des Anwendungsfalls 3 erfolgen. Aufbauend auf vorliegenden Ergebnissen aus DSR-Untersuchungen zum Alterungsverhalten des Bindemittels des betrachteten Abschnittes kann eine weitere Anpassung des Funktionskoeffizienten b gemäss vorherigem Kapitel vorgenommen werden. Dazu kann der Anwender im unteren Bereich des Bildschirms eine manuelle Anpassung des Koeffizienten b durch Eingabe eines Wertes vornehmen (vgl. Abbildung 111). Im vorliegenden Beispiel wurde zunächst im Rahmen der Netzanalyse nach der Bindemittelsorte geclustert und eine clusterspezifische Masterkurve ermittelt. Abbildung 111 zeigt hierzu das Ergebnis der abschnittsbezogenen Kalibrierung der Verhaltensfunktion bei der die clusterspezifische Masterkurve für Abschnitte mit polymermodifiziertem Bindemittel als Eingangsgrösse genutzt wurde.

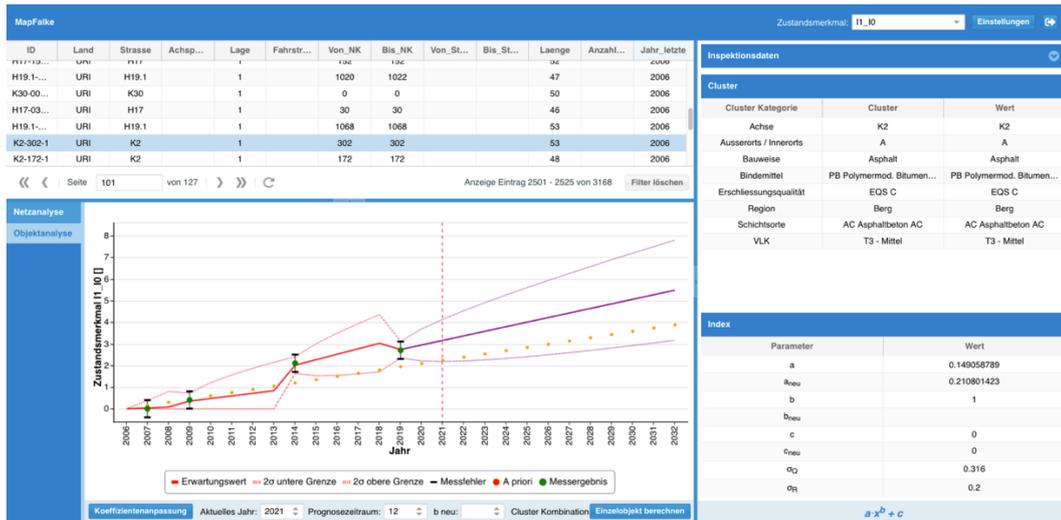


Abbildung 111: Abschnittsbezogene Verhaltensfunktion für das Zustandsmerkmal I0/I1 mit clusterspezifischer Masterkurve

Aus weiterführenden Bindemitteluntersuchungen wurde schliesslich ein neuer Wert von 1,15 für den b -Koeffizienten der Verhaltensfunktion ermittelt und in die Kalibrierung der Verhaltensfunktion mit Hilfe des Extended Kalman-Filters integriert. Die entsprechenden neuen Werte aller Funktionsparameter werden weiterhin am rechten Bildschirmrand dem Anwender tabellarisch dargestellt. Die aktualisierte Verhaltensfunktion wird dem Anwender im linken Bereich des Bildschirms angezeigt (vgl. Abbildung 112).

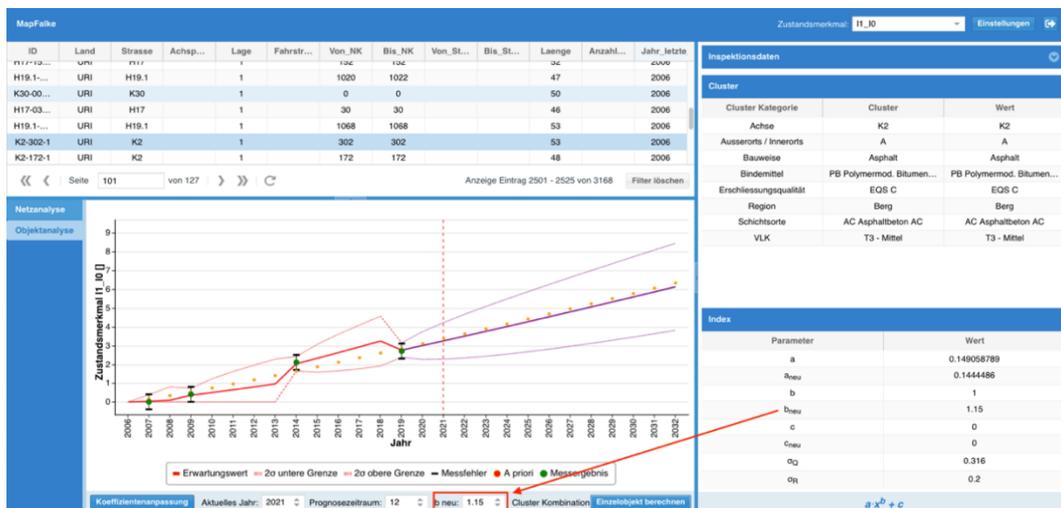


Abbildung 112: Abschnittsbezogene Verhaltensfunktion für das Zustandsmerkmal I0/I1 mit clusterspezifischer Masterkurve und Anpassung des b -Koeffizienten

8.5 Kapitelzusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen des entwickelten Prototyps und dessen Funktionalität vorgestellt. Der Prototyp ermöglicht eine probabilistische Zustandsprognose von einzelnen Strassenabschnitten sowie eine Analyse der Zustandsentwicklung auf der Netzebene. Im Prototyp wurden die Analysemöglichkeiten der vorhandenen Strasseninfrastrukturdaten exemplarisch getestet und entsprechende Visualisierungen erstellt. Die Zustandsprognose basiert auf vorgegebenen *a priori* Prozessfunktionen, merkmalsbezogenen Zustandserhebungen sowie Ergebnissen aus Materialuntersuchungen im Labor, im gegenständlichen Fall von Bindemitteluntersuchungen. Mit Hilfe des entwickelten Prototyps können die *a priori* festgelegten Prozessfunktionen durch Clusterung verfeinert und in die abschnittsbezogene Kalibrierung von Verhaltensfunktionen integriert werden. Damit wird eine Methodik zur Verfügung gestellt, die durch Berücksichtigung von Materialeigenschaften eine Verfeinerung der Zustandsprognose ermöglicht.

9 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Ausgehend von den Grundlagen der Entscheidungsfindung im Erhaltungsmanagement und den Anforderungen an den Strassenoberbau erfolgte die Einführung in den aktuellen Stand der unterschiedlichen Ansätze zur Zustandsprognose der Fahrbahnoberfläche. Für die Zustandsentwicklung sind Schäden an der Fahrbahnoberfläche ein Hinweis auf ein Defizit des Strassenoberbaus. Zur Identifizierung der Schadensursache können jedoch nur weitere Kennzahlen des Strassenoberbaus resp. der Substanz Aufschluss geben. Für die Entscheidungsfindung ist es deshalb notwendig, auch Informationen zur Struktur bzw. Substanz und zu den geforderten Materialeigenschaften der gebundenen Oberbauschichten zu betrachten.

Aus diesem Grund erfolgte im Anschluss an die Beschreibung der verschiedenen Modelle der Zustandsentwicklung eine Zusammenstellung der empirischen Datengrundlage der in der Forschung berücksichtigten Teststrecken. Dabei wurde versucht, umfassende Zustands-, Aufbau-, Material- und Verkehrsdaten für die jeweiligen Teststrecken in die Datengrundlage zu integrieren, um Zusammenhänge innerhalb des Schichtenaufbaus erkennen zu können. Anschliessend wurden Methoden zur Nutzung von Materialuntersuchungen (im Rahmen von Laborversuchen) bei der Zustandsprognose vorgestellt und analysiert.

Aufbauend auf diesen Grundlagen erfolgte eine Erarbeitung eines Ansatzes zur Integration von diesen Materialuntersuchungen in die Prognosemodellbildung der Zustandsentwicklung. Dieser Ansatz wurde im Rahmen eines Proof-of-Concepts mit Hilfe eines Prototyps exemplarisch überprüft.

Im folgenden Kapitel werden abschliessend Schlussfolgerungen gezogen, Empfehlungen für die Praxis und Normierung gegeben und weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt.

9.1 Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts konnten anhand der Bearbeitung und der erzielten Ergebnisse verschiedene Erkenntnisse gewonnen und daraus entsprechende Schlussfolgerungen gezogen werden. Diese betreffen die vorhandene Datenlage und -qualität der Zustandsdaten der Fahrbahnoberfläche sowie die Daten zum Schichtenaufbau und die dazugehörigen Materialprüfungen. Die vorhandenen Informationen sind zum Teil heterogen und nicht im Strasseninformationssystem integriert, d. h. dadurch nicht netzweit auswertbar.

Es zeigt sich, dass Daten einerseits nicht vollständig erfasst und Daten zum Teil vor der Integration in die Strassendatenbank unzureichend validiert sowie auf ihre Plausibilität hin nicht überprüft werden. Dies lässt auf eine fehlende Qualitätssicherung schliessen. Die vorhandenen Strassendaten stellen jedoch die Grundlage für das Erhaltungsmanagement dar, (z. B. für die Erarbeitung von Modellen der Zustandsentwicklung) und ihr effektiver Nutzen im Erhaltungsmanagement lässt sich nur durch eine hohe Qualität der Daten und deren Verknüpfung realisieren.

Andererseits erweisen sich die Zusammenhänge unterschiedlicher Ursachen der Zustandsentwicklung innerhalb des Schichtensystems als sehr komplex. Statistische Analysen sind aktuell aufgrund der fehlenden Möglichkeit zur netzweiten Auswertung nicht sinnvoll, da die Stichprobe für eine aussagekräftige Analyse zu klein ist. Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Bindemitteluntersuchungen sind jedoch durchaus gut interpretierbar, auch wenn ein direkter Zusammenhang zu den Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche im Rahmen dieses Projekts noch nicht hergestellt werden konnte.

9.1.1 Zustandsdaten der Fahrbahnoberfläche

In Bezug auf die Zustandsdaten zeigte sich im Rahmen des Projekts, dass bei den meisten Strassenbetreibern bereits Zustandsdaten von mehreren netzweiten Messkampagnen über unterschiedliche Zustandsmerkmale der Fahrbahnoberfläche mit einheitlicher Referenzierung über das Strassennetz vorhanden sind. Diese Daten bilden die Grundlage für die Modellbildung.

Bei der Bearbeitung der Datengrundlage zeigte sich, dass die in drei Messkampagnen ermittelten Zustandsdaten in Bezug auf mehrere Zustandsmerkmale eine sehr grosse Streuung und Inkonsistenz aufwiesen. Dies konnte für Daten der Längsebenheit zum Teil auf eine fehlerhafte Bewertung zurückgeführt werden. Für Daten der Querebenheit zeigte sich ebenfalls ein inkonsistenter Verlauf über drei Messkampagnen. Aufgrund fehlender Dokumentation konnte diese Inkonsistenz nur mit einem vermutlich stattgefundenen Wechsel der Erfassungsmethode erklärt werden.

Eine standardisierte Qualitätssicherung bei der Zustandserfassung, durch welche sich Fehler dieser Art minimieren liessen, fehlt aktuell in der Schweiz. Zusätzlich ist bekannt (vgl. auch [34]), dass bei der Zustandserfassung der Fahrbahnoberfläche ein statistischer von der Erfassungsmethode abhängiger Messfehler vorhanden ist und in der Modellierung berücksichtigt werden sollte.

9.1.2 Daten des vorhandenen Schichtensystems

Die erhobenen Bohrkerndaten der Teststrecken, welche Hinweise auf die Struktur des Oberbaus geben, zeigen eine grosse Heterogenität. Die grundsätzliche Annahme, dass in der Schweiz stets von einem strukturell ausreichend vorhandenem Strassenoberbau ausgegangen werden darf (vgl. [19]), muss gerade mit Blick auf die Zustandsentwicklung in Frage gestellt werden. Zudem muss bei einer Änderung der Verkehrsbelastung und einer eventuell entstehenden Unter- bzw. Überdimensionierung das Modell angepasst werden können. Hierfür sind die Daten des vorhandenen Schichtensystems notwendig.

Diese Daten werden aktuell von einer Vielzahl von Strassenbetreibern in Strasseninformationsbanken erfasst und sind in unterschiedlichem Ausmass und Umfang zumindest für die Deckschicht meist vorhanden. Die netzweite Erfassung dieser Daten wird von verschiedenen Betreibern als notwendig erachtet, jedoch ist eine solche Erfassung aktuell gerade erst im Aufbau befindlich. Einzelne Betreiber verfügen zumindest für einen Teil ihres Strassennetzes über referenzierte Daten zum Schichtenaufbau. Es fehlen aber schweizweit noch Prozesse zur Qualitätssicherung, um fehlerhafte Daten zu identifizieren und diese zu korrigieren sowie fehlende Daten zu ergänzen.

9.1.3 Daten von ausgeführten Erhaltungsmassnahmen

Einen zusätzlichen Input liefern Informationen zu ausgeführten Erhaltungsmassnahmen. Hierbei zeigte sich, dass vorhandene Informationen aus dem Projektmanagement hinsichtlich durchgeführter Bohrkernentnahmen vor der Durchführung einer Massnahme und Kontrollprüfungen nach Einbau des Schichtensystems nicht auf das Strassennetz analog zum Erhaltungsmanagement referenziert werden. Zudem sind diese Daten oftmals nur in Papierform vorhanden und somit für einen digitalen Bearbeitungs- und Analyseprozess nur mit sehr hohem Aufwand, wenn überhaupt, verwendbar. Eine Schnittstelle zum Strasseninformationssystem besteht aktuell nicht. Gleiches gilt für die Mischgut- und Bindemittelprüfungen. Werden im Rahmen der Ausführung von Erhaltungsmassnahmen diese Untersuchungen durchgeführt, ist eine Referenzierung auf das bestehende Strasseninformationssystem aktuell nicht gegeben. Der österreichische Autobahnbetreiber ASFINAG hat 2020 damit begonnen, eine umfassende Bohrkerndatenbank zu erstellen, bei der auch die Eingabe der Ergebnisse von Abnahme- und Gewährleistungsprüfungen geplant ist. Vergleichbare Entwicklungen werden derzeit auch in Deutschland seit Beginn 2020 im Rahmen eines Pilotprojekts des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) gestartet, das als Ziel die Digitalisierung von Prüfdaten im Strassenbau hat. Mit Hilfe einer Prüfdatenbank (EQUBAR)

[94] soll die Erzeugung und Weiterverarbeitung von Ergebnissen aus Kontrollprüfungen und Eignungsnachweisen auf Grundlage eines bundesweit standardisierten Datenformats erfolgen.

9.1.4 Ursachen und Wirkungen bei der Zustandsentwicklung

Im Rahmen dieser Untersuchung, wie auch schon in ähnlichen Studien (vgl. z. B. [7, 8, 34, 42, 95]), wurde festgestellt, dass durch das sehr komplexe Materialverhalten die Zusammenhänge zwischen der Zustandsentwicklung der Fahrbahnoberfläche und den Einflüssen des vorhandenen Schichtenaufbaus sehr schwierig zu beschreiben sind. Eine Abstützung auf einen physikalischen Zusammenhang war aufgrund der Komplexität des Systems «Strassenoberbau», der im Oberbau verwendeten unterschiedlichen Materialien und Materialkomponenten und der Einflüsse im Rahmen des Einbaus und während des Betriebs (Verkehr, Klima, etc.) nicht möglich und es wurde deshalb ein empirischer Ansatz gewählt.

Die durchgeführten Korrelationsanalysen zwischen dem Zustand der Fahrbahnoberfläche und den vorhandenen Schichtendaten bzw. den Materialkennwerten wiesen nur wenig aussagekräftige Ergebnisse auf. Die Datengrundlage konnte dabei nur aus den vorhandenen Daten der Teststrecken gebildet werden. Der Datenumfang war hierbei für eine statistische Analyse zu gering. Zudem zeigten sich bei den Teststrecken grosse Schwankungen bei den ermittelten Kennwerten an den entnommenen Bohrkernen. Bei den durchgeführten Bindemitteluntersuchungen konnten durchaus gut interpretierbare Ergebnisse erzielt werden, wodurch sich jedoch kein direkter Zusammenhang zu den Oberflächeneigenschaften herstellen liess.

9.1.5 Modellbildung der Zustandsentwicklung

Für die Modellbildung der Zustandsentwicklung sollten die vorhandenen Strassendaten des zu erhaltenden Strassennetzes Verwendung finden. Das Vorgehen stützt sich einerseits auf eine netzweite Analyse zur Ermittlung von mathematischen Funktionen der Zustandsentwicklung ausgehend von einer Masterkurve. Diese sollte auf einem physikalischen Hintergrund basieren, welcher jeweils für die bestimmten Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche (z. B. die Entwicklung der Spurrinntiefe) bekannt ist oder mehrheitlich Verwendung findet. Bei dieser Analyse können netzweit vorhandene Daten, z. B. Klimadaten, Verkehrsdaten, Materialkennwerten u.a., oder aber Attribute, wie z. B. geografische Lage, Verkehrslastklasse oder Strassentyp, für eine Clusterung verwendet werden.

In einem zweiten Schritt erfolgt eine abschnittsbezogene Kalibrierung unter Verwendung eines Kalman-Filters. Hierbei wird eine Kalibrierung aufgrund neuer Zustandsdaten oder zusätzlicher Materialdaten ermöglicht. Diese kann einerseits zur Bildung eines probabilistischen Modells verwendet oder durch Annahme des Erwartungswerts bzw. eines Quantils in ein deterministisches Modell umgewandelt werden.

9.2 Empfehlungen für die Praxis

Im Folgenden werden verschiedene aus den Schlussfolgerungen resultierende Empfehlungen für die Praxis gegeben. Diese betreffen folgende Bereiche:

- Einsatz von Modellen der Zustandsentwicklung
- Anforderungen an die Durchführung der Zustandserfassung
- Einführung von neuartigen Bindemittel- und/oder Mastixprüfungen mit dem Dynamischen Scherrheometer (DSR)
- Datenmanagement und Digitalisierung

9.2.1 Einsatz von Modellen der Zustandsentwicklung

Es wird empfohlen, im Rahmen der Entscheidungsfindung für die Ermittlung des Finanzbedarfs und das Aufstellen von Erhaltungsprogrammen Modelle der Zustandsentwicklung im Rahmen von PMS-Rechnungen einzusetzen.

In der Schweiz werden aktuell nur bei einzelnen Strassenbetreibern Modelle der Zustandsentwicklung für die Entscheidungsfindung im Erhaltungsmanagement im Rahmen von Simulationen der netzweiten Zustandsentwicklung unter Berücksichtigung von geplanten und technisch notwendigen Erhaltungsmassnahmen eingesetzt. Dafür stehen grundsätzlich Pavement-Management-Systeme (PMS) zur Verfügung, welche auf der Grundlage von Lebenszykluskostenanalysen (engl.: Life cycle cost analysis LCCA) die (quasi) optimale Erhaltungsstrategie bzw. ein Erhaltungsprogramm unter den definierten Randbedingungen, wie z. B. Budgetbegrenzungen oder angestrebte Zustandsverteilung, ermitteln.

Im Rahmen solcher LCCA sollte jedoch nicht nur ein einziges Szenario für die Erhaltungsplanung in einem definierten Zeitraum simuliert werden. Der Nutzen mehrerer Simulationen unter Verwendung der Modelle der Zustandsprognose liegt vielmehr in dem Aufzeigen verschiedener Massnahmooptionen, deren Konsequenzen auf die netzweite jährliche Zustandsverteilung, deren Entwicklung über die nächsten Jahre sowie die dazugehörigen jährlichen Kosten bzw. erforderlichen Investitionen (Finanzbedarf) mit dazugehörigem Arbeitsprogramm (Erhaltungsbedarf).

Beim Einsatz dieser Modelle wird auch deutlich, warum die unterschiedlichen Daten benötigt werden. Zudem erlaubt der Einsatz der Modelle zur transparenten Entscheidungsfindung, das Aufzeigen einerseits der Notwendigkeit zur Verbesserung dieser Modelle und andererseits des Datenbedarfs, welcher im Rahmen einer Kalibrierung zu einer Verbesserung der Modelle führen kann.

9.2.2 Anforderungen an die Durchführung der Zustandserfassung

Es wird empfohlen, die Zustandserfassung der Fahrbahnoberfläche standardisiert und regelmässig in einem definierten Rhythmus zwischen 3 und 5 Jahren durchzuführen. Bei der Ausschreibung der Erfassung sollten Massnahmen zur Qualitätssicherung der Erfassungsmethode definiert und während der Ausführung kontrolliert werden. Zudem sind die Ergebnisse der Zustandserfassung zu analysieren und zu plausibilisieren.

Weiterhin sollten die Methoden der Zustandserfassung beständig festgelegt und bei einem Wechsel von Erfassungsmethoden, eine Übergangszeit mit paralleler Erfassung von bestehender und neuer Methode eingeführt werden, begleitet von einer Analyse und Validierung der Erfassungsergebnisse.

Modelle der Zustandsentwicklung sollen die Realität möglichst nah abbilden. Dennoch beinhalten Modelle immer eine gewisse Ungenauigkeit oder statistisch ausgedrückt eine gewisse «Reststreuung». Durch eine regelmässige und standardisierte Durchführung der Zustandserfassung liegen für die unterschiedlichen Zustandsmerkmale immer wieder aktuell erhobene Daten vor. Diese führen auch bei den Simulationen dazu, dass eine Kalibrierung der Ausgangslage für die PMS-Berechnung stattfindet und die Ungenauigkeit der Modelle und die damit einhergehenden Ergebnisse der Analysen nicht zu gross werden.

9.2.3 Einführung von neuartigen Bindemittel- und/oder Mastixprüfungen mit dem Dynamischen Scherrheometer (DSR)

Um eine wesentlich präzisere Aussage über das Materialverhalten und somit auch einer darauf basierenden Zustandsprognose zu erhalten, wird empfohlen, für die Beurteilung gerade von neu entwickelten Bindemitteln die rheologischen Materialeigenschaften zu ermitteln. Diese rheologischen Prüfungen im Dynamischen Scherrheometer (DSR) dienen als Ergänzung zu den klassischen Bindemitteluntersuchungen.

Die aktuellen Entwicklungen zur Optimierung von neuen bituminösen Bindemitteln im Strassenbau zeigen, dass die klassischen Bindemittelprüfungen keine klaren Rückschlüsse auf die Bindemittelqualität mehr zulassen. Rheologische Untersuchungen mit dem DSR stellen eine kostengünstige und aussagekräftige Alternative zu umfangreichen Mischgutuntersuchungen dar und können somit auch effizient für eine laborgestützte Kalibrierung von Zustandsprognosemodellen herangezogen werden.

Die Beurteilung von Bindemittel- und Mastixseigenschaften werden anhand von physikalischen Kennziffern zum Relaxationsverhalten, Ermüdungsverhalten und Kriechverhalten durchgeführt. Hierbei wird das gesamte Temperaturspektrum zwischen -20°C bis 60°C abgedeckt. Insbesondere bei neuentwickelten bitumenhaltigen Bindemitteln lassen sich anhand dieser Performanceprüfung Aussagen zum Widerstand gegen Kälterissbildung, Widerstand gegen Ermüdung und Verformung treffen.

Die Ergebnisse dieser Prüfungen an eingebauten bitumenhaltigen Belägen von definierten Strassenabschnitten resp. Einbaulosen müssen zwingend analog anderer Strassendaten auf das Ortungssystem des Strasseninformationssystem im Erhaltungsmanagement referenziert werden und können somit direkt in einer Kalibrierung von Zustandsprognosemodellen für einzelne Straßenabschnitte Berücksichtigung finden.

9.2.4 Datenmanagement und Digitalisierung

Es wird empfohlen, im Rahmen des Datenmanagements für das Strasseninformationssystem verschiedene Prozesse zur Qualitätssicherung der Strassendaten zu definieren. Dies betrifft im Fall der Zustandsentwicklung vor allem Inventar-, Inspektions- bzw. ZEB- und Erhaltungsmassnahmendaten. Dafür sollte ein Konzept erarbeitet werden, wobei die Korrektur fehlerhafter Daten, die Erhebung fehlender Daten und die Aktualisierung veralteter Daten von besonderer Bedeutung sind.

In diesem Zusammenhang sollten auch Papierunterlagen in einem längeren und fortlaufenden Prozess maschinenlesbar digitalisiert werden. Für die Strassendaten sind vor allem die Kontrollprüfungen nach Einbau gemäss Prüfplan für Walzasphalte (vgl. [5]) und weitere durchgeführte Bohrkernuntersuchungen während der Lebensdauer, z. B. vor Durchführung einer Erhaltungsmassnahme, von Bedeutung. Diese Daten müssen analog zu den bereits bestehenden Strassendatenbanken linear auf das Strassennetz referenziert und mit einem Zeitstempel historisiert in Datenbanken abgelegt werden.

9.3 Empfehlungen für die Normierung

Abgeleitet aus den Schlussfolgerungen und im Zusammenhang mit den Empfehlungen für die Praxis ergeben sich im Folgenden ergänzende Empfehlungen für die Normierung. Diese betreffen:

- Anforderungen und Qualitätsstandards der Zustandserfassung und -bewertung für Strassen
- Revision der VSS 40925/40926 Zustandserfassung und -bewertung von Fahrbahnen
- Erarbeitung der VSS 40920 Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen

Damit soll die Umsetzung in der Praxis zusätzlich durch eine Standardisierung unterstützt werden.

9.3.1 Anforderungen und Qualitätsstandards der Zustandserfassung und -bewertung für Strassen

Es wird empfohlen, für die Zustandserfassung und -bewertung von Fahrbahnen im Rahmen der Normung oder in einem Leitfadens die notwendigen Anforderungen und Qualitätsstandards für die Durchführung der Erfassung verschiedener Zustandsmerkmale

präzise zu definieren. Dies betrifft vor allem die Wiederholbarkeit der Ergebnisse von täglichen Datenerhebungen aus Messfahrten.

Zusätzlich sind Mindestanforderungen an die Dateninhalte für die Implementierung in die Strasseninformationssysteme festzulegen. Unter anderem ist z. B. die Erfassungsmethode in den Daten zu spezifizieren. Je nach Zustandsmerkmal sind zusätzliche Attribute zur Validierung und Plausibilisierung notwendig. Zudem ist der Umgang mit den von den Messfahrzeugen erzeugten Rohdaten zu definieren.

9.3.2 Revision der VSS 40925/40926 Zustandserfassung und -bewertung von Fahrbahnen

Es wird empfohlen, bei der Revision der VSS 40925/40926 «Zustandserfassung und -bewertung von Fahrbahnen» die Modellbildung der Zustandsentwicklung von Merkmalen der Fahrbahnoberfläche zu berücksichtigen. Eine Modellierung eines Einzelindex auf der Grundlage von Ausmass und Schwere ist mit der aktuellen Normendefinition aufgrund der groben Unterteilung in drei Bewertungsniveaus nicht sinnvoll und zielführend und sollte für beide Kennwerte grundsätzlich überdacht werden. Dabei zeigt sich vor allem in den Nachbarländern Deutschland und Österreich, dass mit einer Präzisierung von Ausmass und Schwere auch eine deutlich bessere Prognose und somit Massnahmenzuordnung möglich ist.

Zusätzlich sollte die Berücksichtigung von Kennwerten des Schichtensystems in den beiden Normen geprüft werden. In Deutschland existieren hierfür zwei Kennwerte. Einerseits der Substanzwert (Oberfläche), welcher im Rahmen der Zustandserfassung und -bewertung ZEB standardisiert gebildet wird (vgl. [39]). Und andererseits der Substanzwert (Bestand), welcher aus den vorhandenen Aufbau- resp. Schichtendaten der Strassenbetreiber gebildet wird (vgl. [96]).

Österreich hat bereits zu Beginn der 2000er Jahre eine zu Deutschland sehr ähnliche Bewertung für das PMS implementiert (vgl. [43]) und überarbeitet derzeit die Substanzbewertung auf Basis der aktuellen Schichtgestaltung von flexiblen Oberbaukonstruktionen entsprechend den nationalen RVS-Richtlinien.

9.3.3 Erarbeitung der VSS 40920 Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen

Es wird empfohlen, bei der Erarbeitung der neuen Grundnorm VSS 40920 «Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen» die in den vorherigen Kapiteln erwähnten Defizite in Praxis und Normung aufzugreifen und z. B. bei der Definition von grundlegenden Prozessen zu berücksichtigen. Dies betrifft vor allem die Aspekte des Datenmanagements und der Qualitätssicherung.

9.4 Forschungsbedarf

Bei der Erarbeitung zeigten sich verschiedene Grenzen bzw. Probleme, welche im Rahmen der Bearbeitung dieses Forschungsprojekts nicht gelöst werden konnten und somit einen Forschungsbedarf darstellen. Hierzu zählen:

9.4.1 Genauigkeit von Messverfahren der Zustandserfassung und Kennzahlen des Strassenoberbaus nach Einbau

Die Messmethoden der Zustandserfassung und -bewertung sind natürlichen Unsicherheiten bzw. Streuungen unterworfen, welche die Ergebnisse der Einzelmessungen beeinflussen. Für die Berücksichtigung der Messgenauigkeit beim Einsatz eines Kalman-Filters sind je nach Messmethode diese Werte mit einzubeziehen. In [34] konnten anhand einer Literaturanalyse einige Anhaltspunkte gegeben werden. Es zeigte sich aber, dass mehrheitlich Annahmen für zufällige Messabweichungen getroffen werden mussten.

Die Anforderungen an die Genauigkeit von Messverfahren zur Zustandserfassung und Kennzahlen des Strassenoberbaus nach Schichteinbau sollten in einem Forschungsprojekt analysiert und bewertet werden. Damit stünde eine entsprechende Grundlage für eine mögliche normative Festlegung zur Verfügung, die auch von Messsystemanbietern erfüllt werden kann. Hierbei wäre auch eine Berücksichtigung der anfallenden Kosten sinnvoll, um die Genauigkeit und Kosten in einem Zusammenhang stellen zu können.

9.4.2 Zusammenhänge zwischen der Zustandsentwicklung der Fahrbahnoberfläche und Material- und Schichtendaten

Die im Rahmen dieses Forschungsprojekts festgestellten Defizite in der Datenhaltung, vor allem bei den Material- und Schichtendaten, erlaubten keine repräsentative statistische Analyse der Zusammenhänge zwischen Zustandsentwicklung der Fahrbahnoberfläche und vorhandenen Material- und Schichtendaten. Dieses Defizit soll durch die gegebenen Empfehlungen für die Praxis (vgl. Kap. 9.2) geschlossen werden. Eine systematische Digitalisierung der Schicht- und Materialinformationen ist dabei unumgänglich, bedeutet jedoch zunächst einen Mehraufwand. Der daraus ableitbare Nutzen einer umfassend digitalisierten Infrastruktur und die Verwendung der Daten in einem Erhaltungsmanagementprozess rechtfertigt auf jeden Fall diesen Aufwand, da die Prognosen wesentlich genauer durchgeführt und damit der Erhaltungsbedarf ermittelt werden kann.

Beim Vorhandensein einer grösseren und vor allem qualitativ verbesserten Datengrundlage sollten die Zusammenhänge erneut untersucht und bewertet werden. Bei einer nachweisbaren Korrelation liessen sich so die Ergebnisse aus Materialuntersuchungen direkt mit den Zustandsdaten in Verbindung setzen. Die Ergebnisse aus den Untersuchungen können dann bei der Kalibrierung der Modelle zusätzlich genutzt werden. Hierzu zählen auch die Zusammenhänge zwischen Alterung und Belastung des Schichtenaufbaus sowie zum Zustand der Fahrbahnoberfläche.

9.4.3 Erweiterung der Kalibrierung unter Verwendung eines Partikelfilters

Die beispielhaft durchgeführten DSR-Prüfungen für Relaxation, Ermüdung und Verformung zeigten für die Beschreibung des Alterungsverhaltens ein sehr grosses Potential für den Einsatz bei der Kalibrierung von probabilistischen Modellen der Zustandsentwicklung. Dabei wird die zeitliche Komponente ebenfalls zu einer Zufallsvariable. Dies kann mit dem eingesetzten Kalman-Filter nicht mehr modelliert werden.

Durch das Vorhandensein von zwei Zufallsvariablen mit Zustand und Zeit ist hier eine Erweiterung notwendig. Diese mathematisch und programmiertechnisch komplexere Aufgabe sollte in einer weiteren Forschung, z. B. durch den Einsatz eines Partikelfilters, untersucht und gelöst werden.

Anhänge

I	Voruntersuchungen	170
I.1	Korrelationsanalysen.....	170
I.1.1	Korrelationsanalyse anhand von Indizes	170
I.1.2	Korrelationsanalyse anhand von Matrixwerten der Schäden	171
I.1.3	Korrelationsanalyse anhand von Schwere der Schäden	172
I.1.4	Korrelationsanalyse anhand von Ausmass der Schäden	173
II	Bewertung des Potentials von Prüfverfahren	174
II.1	Konventionelle Bindemitteluntersuchungen.....	174
II.2	Performance-orientierte Bindemitteluntersuchungen	174
II.3	Konventionelle Asphaltuntersuchungen.....	175
II.4	Performance-orientierte Asphaltuntersuchungen	176

I Voruntersuchungen

I.1 Korrelationsanalysen

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Korrelationsanalysen zwischen Materialkenngrößen und den Merkmalen der Fahrbahnoberfläche dargestellt. Die Analysen wurden für die zusammengesetzten Indizes sowie getrennt nach den einzelnen Teilwerten (Schadenschwere, Schadensausmass und Matrixwert) durchgeführt.

I.1.1 Korrelationsanalyse anhand von Indizes

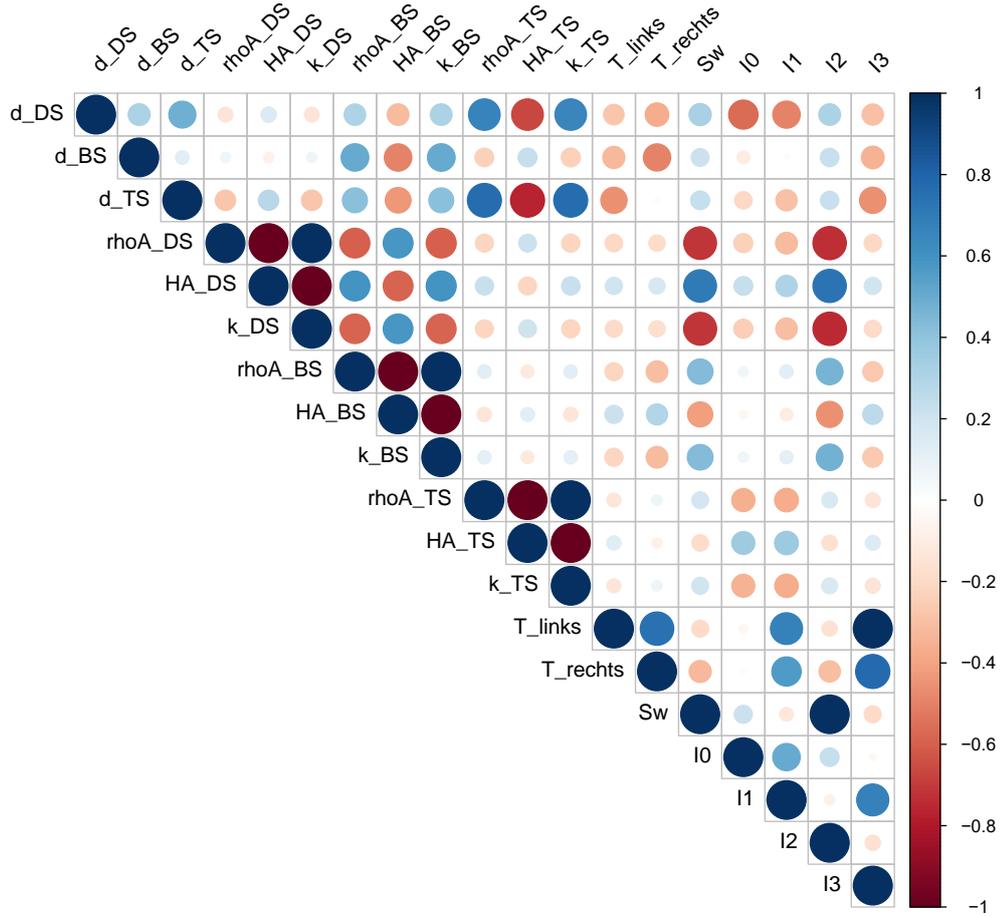


Abbildung 113: Korrelationsmatrix basierend auf Indizes

I.1.2 Korrelationsanalyse anhand von Matrixwerten der Schäden

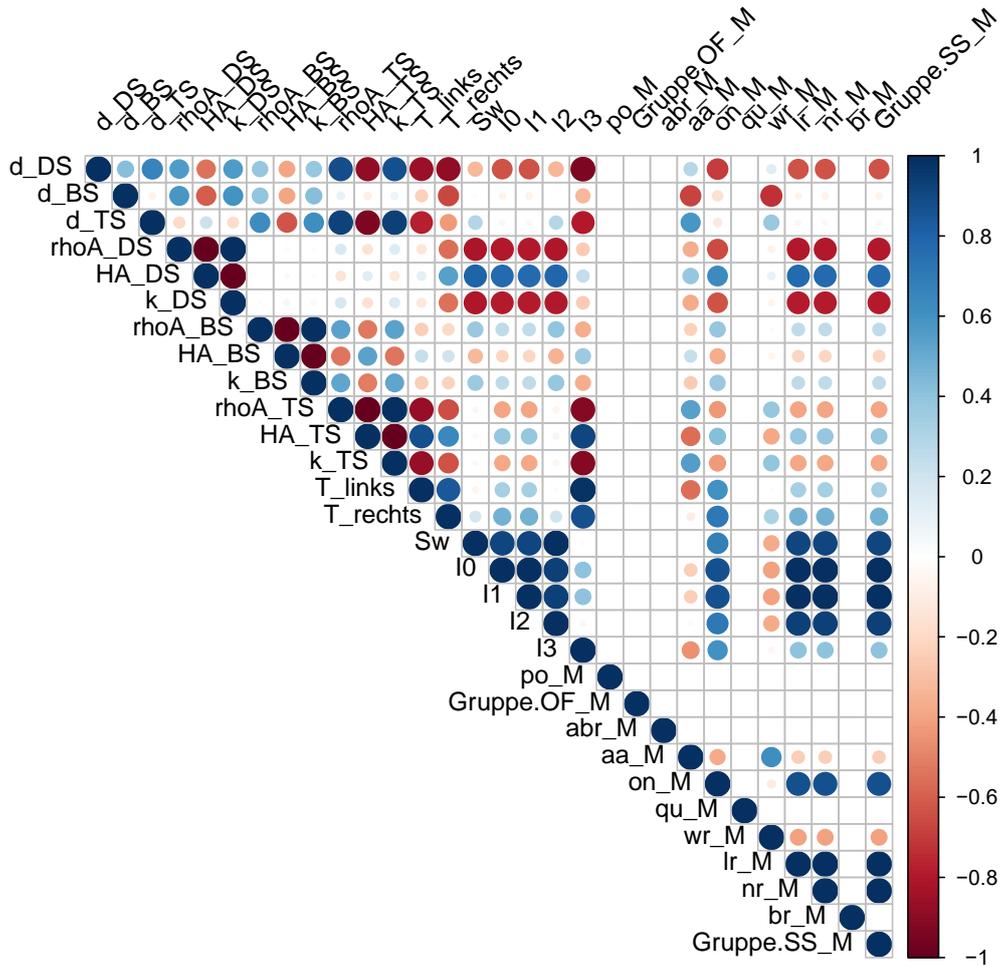


Abbildung 114: Korrelationsmatrix basierend auf Matrixwerten

I.1.3 Korrelationsanalyse anhand von Schwere der Schäden

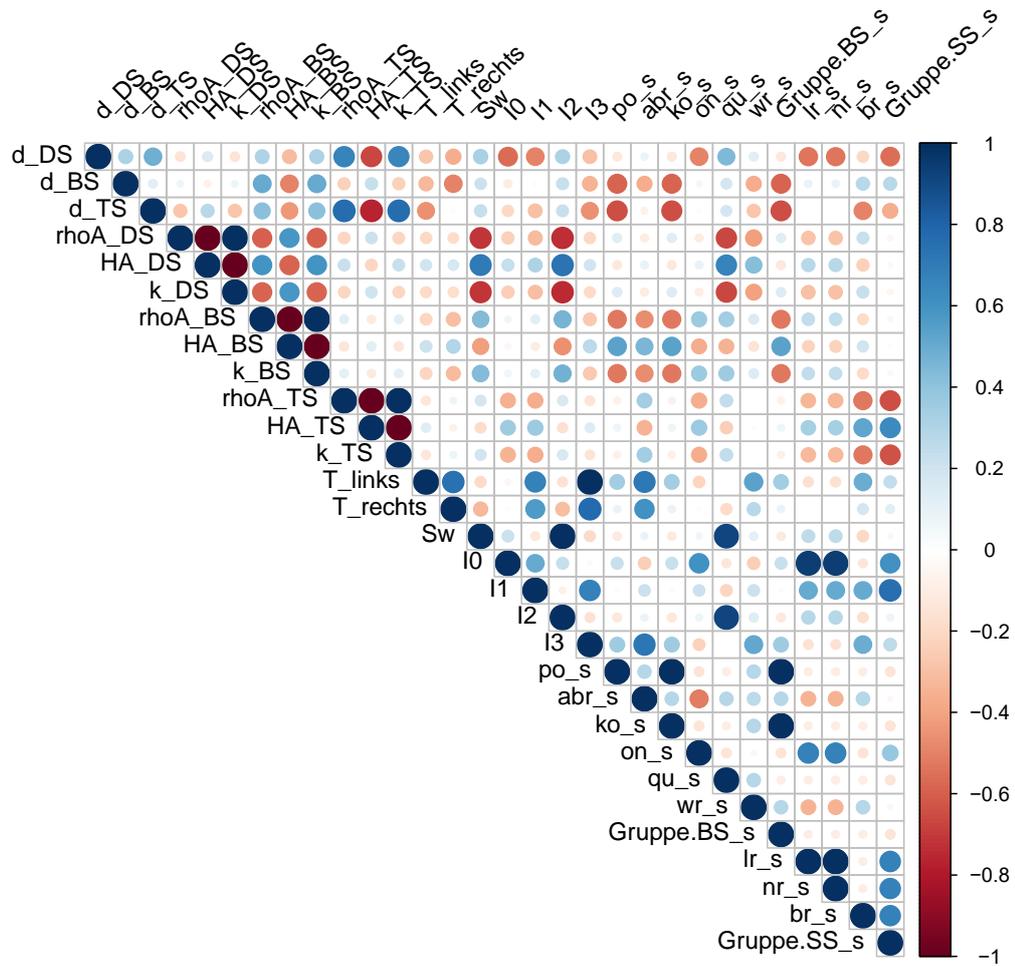


Abbildung 115: Korrelationsmatrix basierend auf der Schadensschwere

I.1.4 Korrelationsanalyse anhand von Ausmass der Schäden

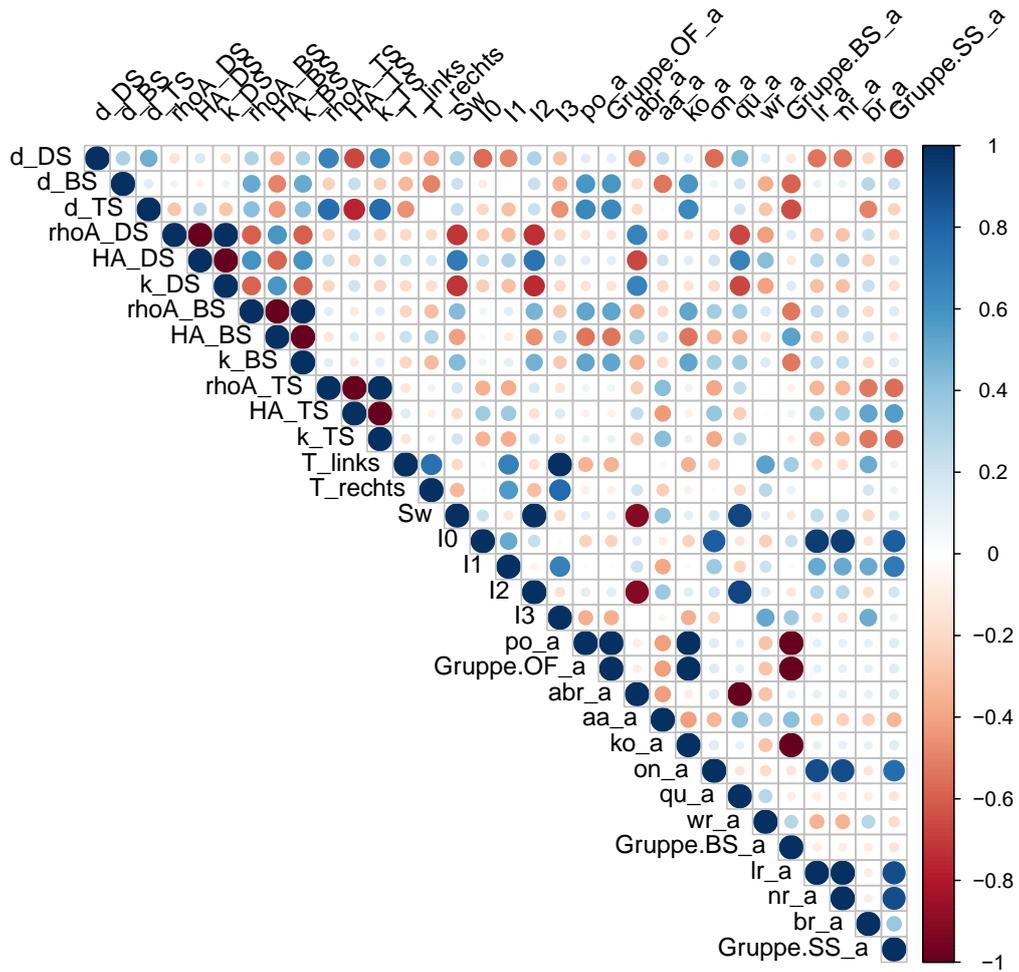


Abbildung 116: Korrelationsmatrix basierend auf dem Schadensausmass

II Bewertung des Potentials von Prüfverfahren

II.1 Konventionelle Bindemitteluntersuchungen

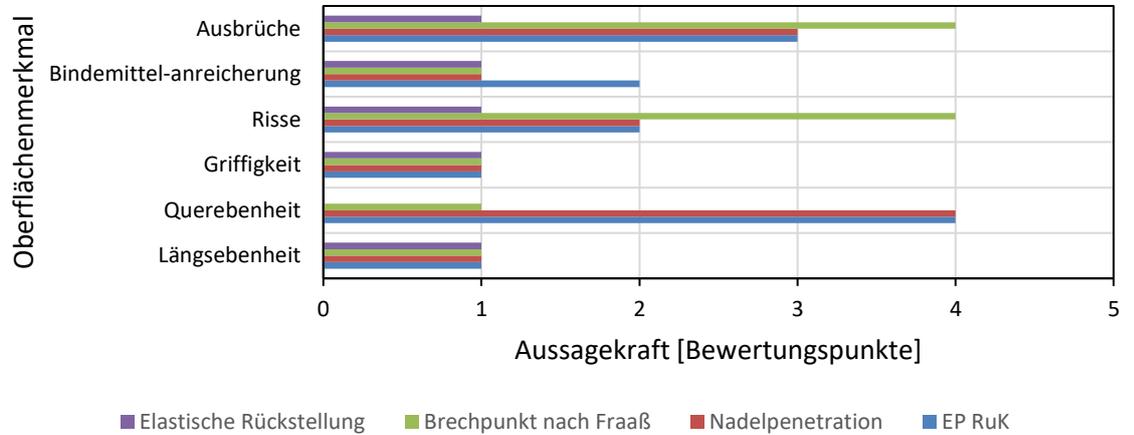


Abbildung 117: Bewertung der Aussagekraft konventioneller Bindemitteluntersuchungen zur Abschätzung der Entwicklung von Oberflächeneigenschaften

II.2 Performance-orientierte Bindemitteluntersuchungen

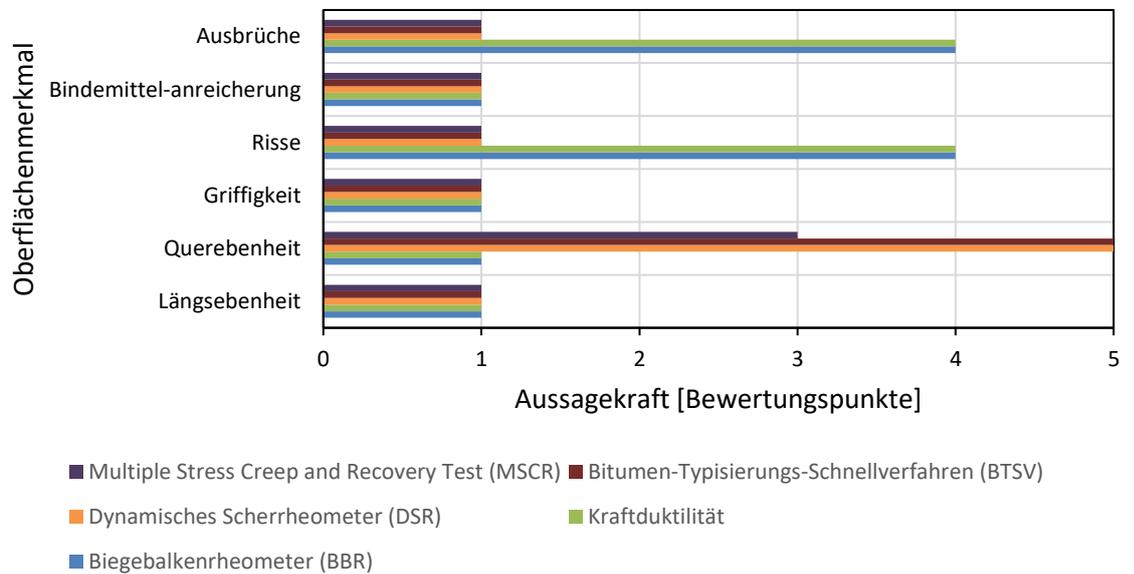
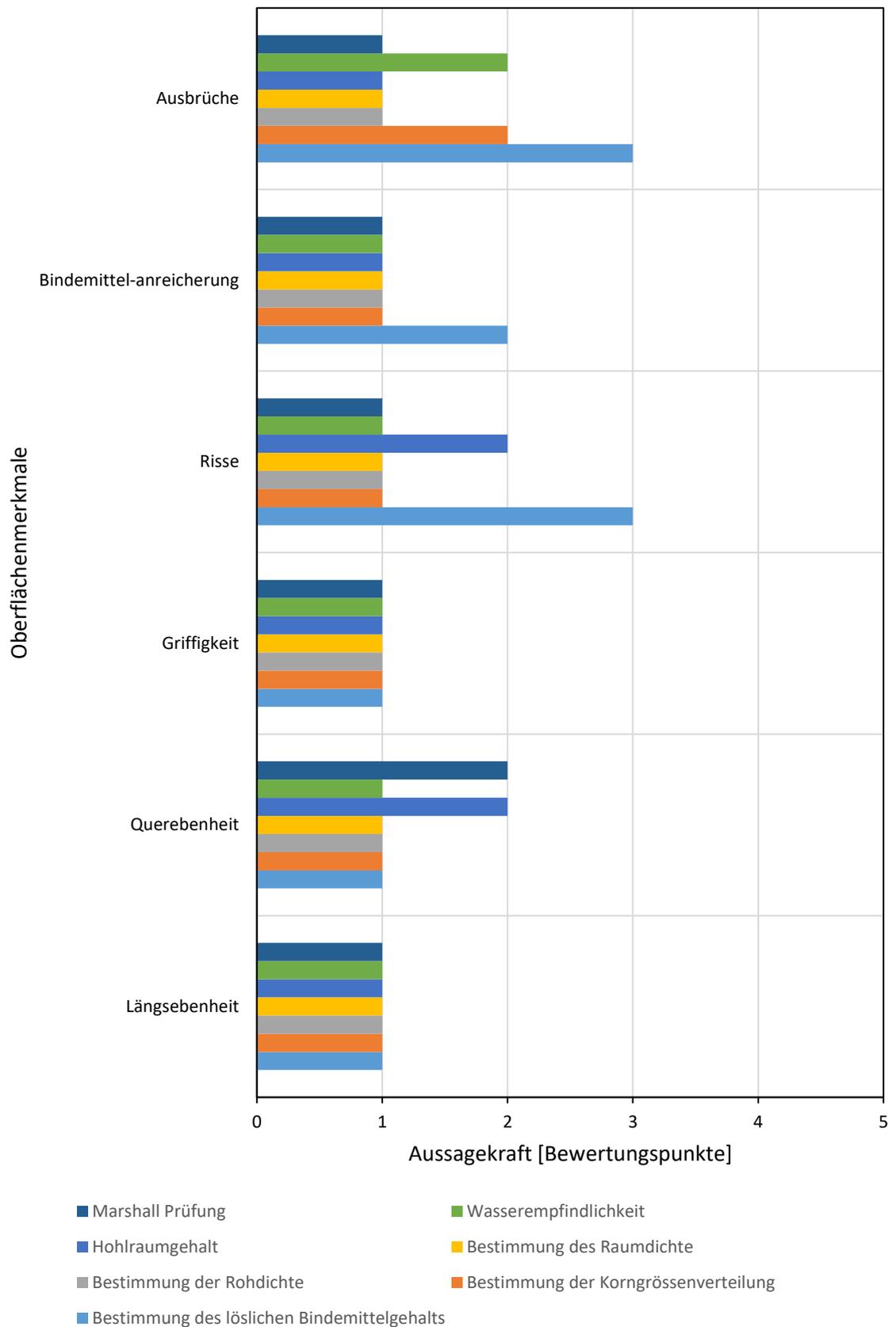


Abbildung 118: Bewertung der Aussagekraft performance-orientierter Bindemitteluntersuchungen zur Abschätzung der Entwicklung von Oberflächeneigenschaften

II.3 Konventionelle Asphaltuntersuchungen



II.4 Performance-orientierte Asphaltuntersuchungen

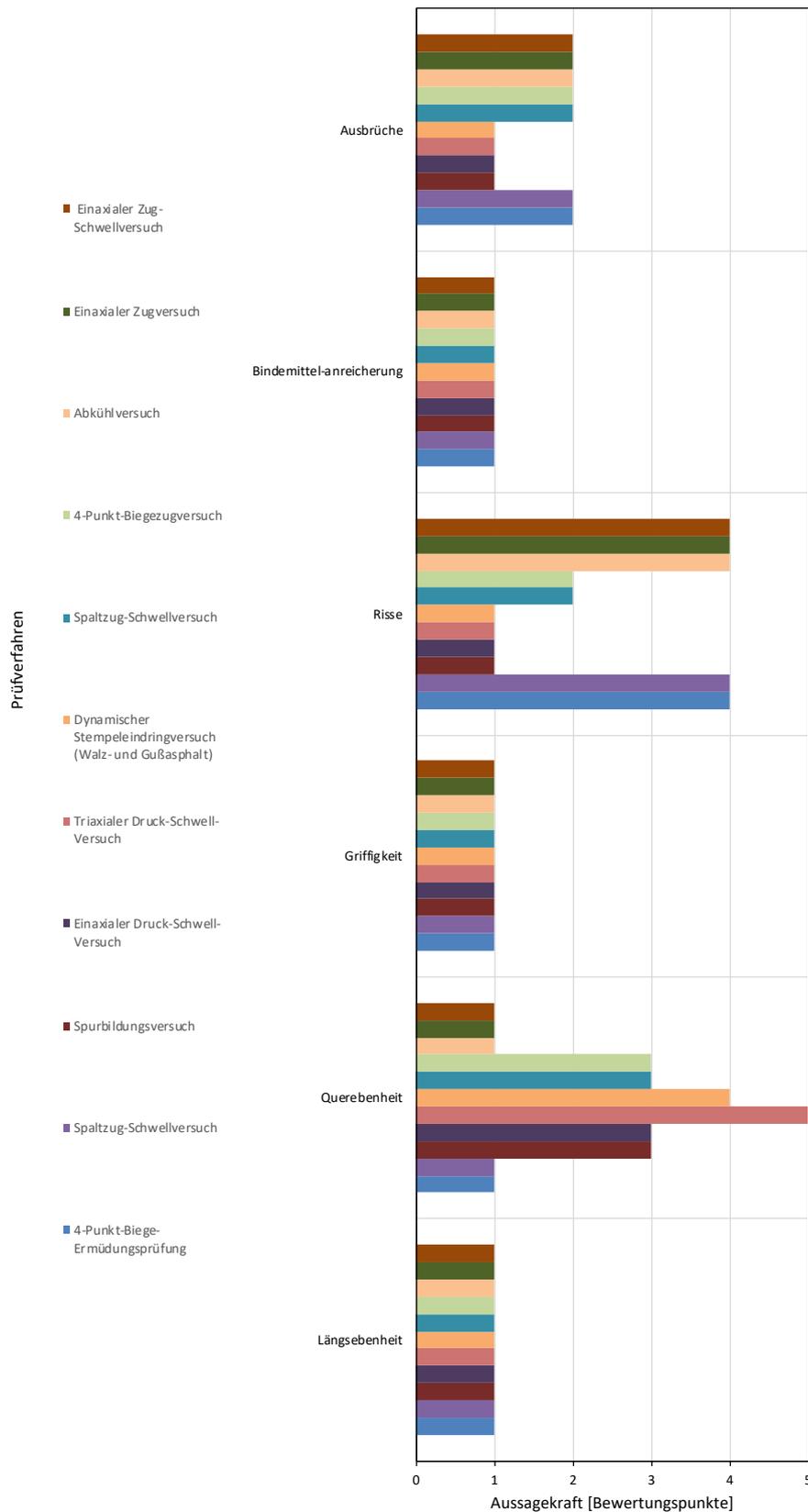


Abbildung 119: Bewertung der Aussagekraft performance-orientierter Asphaltuntersuchungen zur Abschätzung der Entwicklung von Oberflächeneigenschaften

Glossar

Begriff	Bedeutung
Abnahmeprüfung	Prüfung des Auftraggebers, mit der die Qualität der vertraglich vereinbarten Leistung überprüft wird.
Eignungsprüfung/ Erstprüfung	Prüfung, mit der die tatsächliche Eignung des Baustoffs nachgewiesen wird. (vgl. [5])
Konformitätsprüfung/ Kontrollprüfung	Prüfung, mit der der Zustand des angelieferten Mischguts und der eingebauten Schichten am Einbautag nachgewiesen wird (vgl. [5])
ASTRA	Bundesamt für Strassen
BTSV	Bitumen-Typisierung-Schnell-Verfahrens (BTSV)
CEN	Europäisches Komitee für Normung (CEN)
DSR	Dynamisches Scherrheometer
DIN	Eine DIN-Norm ist ein unter Leitung des DIN Deutschen Instituts für Normung erarbeiteter freiwilliger Standard.
DTV	Durchschnittlicher Tagesverkehr (DTV) Beim durchschnittlichen Tagesverkehr wird der Mittelwert des 24-Stundenverkehrs aus allen Tagen des Jahres gebildet.
DWV	Durchschnittlicher Werktagverkehr (DWV) Beim durchschnittlichen Werktagverkehr wird der Mittelwert des 24-Stundenverkehrs aus allen Werktagen des Jahres gebildet.
ESAL	Äquivalente Standard-Achslast (= 8,16 t)
MLS10	mobile Grossversuchsanlage der EMPA für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen (full-scale mobile load simulator)
PMS	Pavement-Management System
PW	Personenwagen
PAV	Simulation der Langzeitalterung im Labor für Bindemittels im Strassenbau nach dem Einbau des Asphalts (Pressure Aging Vessel)
RStO	Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, Technisches Regelwerk für Straßenoberbau in Deutschland
RTFOT	Simulation des Alterungsverhaltens im Labor für Bindemittels im Strassenbau während der Herstellung, der Lagerung, des Transports und der Verarbeitung (Rolling-Thin-Film-Oven-Test)
SN	Schweizer Norm (SN)
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)
ZEB	Zustandserfassung und -bewertung der Fahrbahnoberfläche

Literaturverzeichnis

-
- [1] SN 588469 (1997) Erhaltung von Bauwerken: Verständigung, Erhaltungsziele, Erhaltungsmaßnahmen und -tätigkeiten, Bauwerksakten. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich
-
- [2] VSS 40731 (2019) Erhaltung des Oberbaus: Reparatur, Instandsetzung und Erneuerung von Asphaltsschichten. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [3] VSS 40925b (2019) Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF): Zustandserhebung und Indexbewertung. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [4] VSS 40925b - Anhang (2019) Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF): Anleitung zur visuellen Zustandserhebung und Indexbewertung mit dem Schadenkatalog. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [5] VSS 40434 (2019) Prüfplan für Walzasphalt; Festlegung der durchzuführenden Prüfungen. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [6] Lindenmann, H. P., Baumgartner, F. u. Schiffmann, F. (2008) Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement Fahrbahnen: Synthesebericht. Schlussbericht VSS 2004/710. Schriftenreihe Nr. 1259, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Strassen. Bern 2008
-
- [7] Scazziga, I. (2008) Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen: Schadensprozesse und Zustandsverläufe. Schlussbericht VSS 2004/712. Schriftenreihe Nr. 1304, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Strassen. Bern 2008
-
- [8] Scazziga, I. (2000) Evaluation des Strassenzustandes. Schlussbericht VSS 12/99. Schriftenreihe Nr. 1040, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Strassen. Bern 2000
-
- [9] SN 640900 (2021) Erhaltungsmanagement: Grundnorm. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [10] AASHTO Pavement management guide, 2nd edition. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO 2012
-
- [11] Lipke, S. u. Münscher, F. (2010) Veränderung der Eigenschaften polymermodifizierter Bindemittel während der Nutzungsdauer. AP Projekt 07 351/S5, Schlussbericht, Bundesanstalt für Straßenwesen BAST 2010
-
- [12] Staube, E., Beckedahl, H. u. Krass, K. Straßenbau und Straßenerhaltung. Berlin: Erich Schmidt Verlag 2004
-
- [13] Nakkell, E. (1988) Funktionsqualität - Strukturqualität - Umweltqualität, Erreichen und Erhalten der Qualitätsstandards, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen FGSV. Köln 1988
-
- [14] Wüst, W. (1991) Langzeitverhalten von Asphaltstraßen - Eine Untersuchung mit statistischen und wahrscheinlichkeitstheoretischen Methoden. Dissertation TU München, . München 1991
-
- [15] Rosauer, V. (2010) Abschätzung der herstellungsbedingten Qualität und Lebensdauer von Asphaltdeckschichten mit Hilfe der Risikoanalyse. Dissertation TU Darmstadt, TU Darmstadt. Köln 2010
-
- [16] Hehenberger, F. u. Schmuck, A. Mängelursachen, Erhaltungsmaßnahmen und Auswirkungen auf das Zustandsniveau - Entwicklung einer Systematik für das Management der Strassenerhaltung. Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 652. Bonn-Bad Godesberg: Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Strassenbau 1993
-
- [17] Wistuba, M. Straßenbaustoff Asphalt. Braunschweig: TU Braunschweig, ISBS 2019
-
- [18] Wellner, F. Bestimmung des Alterungsverhaltens von Asphaltgemischen als Grundlage für die Dimensionierung und Prognose der Lebensdauer und Schadensentstehung. Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 1091. Bremen: Fachverl. NW in der Carl Schünemann Verl.-GmbH 2013
-
- [19] Richmond, C., Adey, B. T. u. Achilles, F. Ermöglichung eines realistischen Benchmarkings des baulichen Unterhalts der Kantonsstrassen (BORMAC). = Permettre une évaluation réaliste de la rénovation des routes cantonales (BORMAC) = Enabling realistic benchmarking of the renewal maintenance of cantonal roads (BORMAC). Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen, Bd. 1658. Bern: Eidgenössisches Departement für Umwelt, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Strassen 2019
-
- [20] Rübensam, J. u. Schulze, F. Auswertung von Langzeitbeobachtungsdaten zur Beantwortung von Fragestellungen des Managements der Strassenerhaltung. Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 712. Bonn-Bad Godesberg: Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Strassenbau 1994
-
- [21] Schmuck, A. (1987) Strassenerhaltung mit System, Grundlagen des Managements, . Bonn 1987
-
- [22] Dröge, C. Systematische Nutzung von Bestandsdaten. Straße und Autobahn 68 (2017) 4, Seiten 279-286
-
- [23] Wistuba, M., Mollenhauer, K. u. Walther, A. Unvermeidliche Schwankungen in den Asphalteigenschaften und ihre Auswirkungen auf die Lebensdauerprognose der Straße. Straße und Autobahn 65 (2014) 5, Seiten 347-353
-
- [24] Abed, A., Thom, N. u. Neves, L. Probabilistic prediction of asphalt pavement performance. Road Materials and Pavement Design 20 (2019) sup1, S247-S264
-
- [25] Dragon, I. u. Reinhardt, U. Weiterentwicklung der Ansätze für die Spurrinnenprognose von Asphaltbefestigungen. Straße und Autobahn 66 (2015) 4, Seiten 262-272

- [26] Valle, P. D. u. Thom, N. Pavement layer thickness variability evaluation and effect on performance life. *International Journal of Pavement Engineering* 21 (2020) 7, S. 930–938
- [27] Maschauer, D., Hofko, B., Eberhardsteiner, L., Grothe, H., Koyun, A. N., Wistuba, M., Büchner, J., Patzak, J. u. Weise, C. (2021) Optimales Asphaltmischgut-Alterungsverfahren zur Berücksichtigung in der rechnerischen Dimensionierung (OptiMAL). Ergebnisbericht zum Werkvertrag, FFG-Programm: D-A-CH Kooperation Verkehrsinfrastrukturforschung. Berlin / Wien / Bern 2021
- [28] Hase, M., Beyersdorf, W., Hase, A. u. Rademacher, K. (2019) Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt. *Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen S129, Bundesanstalt für Straßenwesen BAST, Bergisch-Gladbach* 2019
- [29] SN 640925 [ungültig] (1990) Zustandserfassung und Bewertung von Strassen. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
- [30] SN 640510 (2021) Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche: Grundnorm. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
- [31] Litzka, J., Leben, B., La Torre, F., Weninger-Vycudil, A., Antunes, M. d. L., Kokot, D., Mladenovic, G., Brittain, S. u. Viner, H. (2008) The way forward for pavement performance indicators across Europe, COST Action 354 - Performance Indicators for Road Pavements, Final Report, . Wien 2008
- [32] Schiffmann, F. u. Hajdin, R. (2017) Verfahren zur Erhaltungsplanung von Strassennetzen in der Praxis. Schlussbericht VSS 2009/706. Schriftenreihe Nr. 1624, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Strassen. Bern 2017
- [33] ASTRA (2019) Netzzustandsbericht der Nationalstrassen 2018. Schlussbericht, 2019
- [34] Blumenfeld, T., Elvarsson, A., Schiffmann, F., Grund, C., Kempf, D., Balck, H., Bald, S. u. Hajdin, R. (2021) Multi-kriterielle probabilistische Prognose der Zustandsentwicklung (ProZEnt). Ergebnisbericht zum Werkvertrag, FFG-Programm: D-A-CH Kooperation Verkehrsinfrastrukturforschung. Berlin / Wien / Bern 2021
- [35] VSS 40525 (2017) Eigenschaften der Fahrbahnoberflächen, Anforderungen. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
- [36] VSS 40430 (2019) Walzasphalt - Konzeption, Ausführung und Anforderungen an die eingebauten Schichten. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
- [37] VSS 40324 (2019) Dimensionierung des Strassenaufbaus; Unterbau und Oberbau. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
- [38] 2.04 (2018) Anweisung StraßeninformationsBank (ASB). Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur BMVI
- [39] FGSV Arbeitspapier zur Systematik der Strassenerhaltung AP9/ Reihe M: Zustandserfassung und – bewertung der Fahrbahnoberflächen von Straßen (ZEB) 430 AP9/M. Köln: Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen FGSV 2019
- [40] (2006) RVS 13.01.15 Beurteilungskriterien für messtechnische Zustandserfassung mit dem System RoadSTAR. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene - Verkehr, Wien
- [41] Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau (2012) RVS 13.01.16: Bewertung von Oberflächenschäden und Rissen auf Asphalt- und Betondecken. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene - Verkehr, Wien
- [42] Weninger-Vycudil, A., Litzka, J., Brozek, B., Wistuba, M. P., Walther, A. u. Hajdin, R. (2016) Zustandsprognose und Materialtechnologie PROMAT, Bundesministerium für Verkehr 2016
- [43] Weninger-Vycudil, A., Brozek, B., Simanek, P., Rohringer, T. u. Haberl, J. (2016) Handbuch Pavement Management in Österreich. Strassenforschung, . Wien 2016
- [44] Bennett, C. u. Paterson, W. (2000) HDM-4: A guide to Calibration and Adaptation, PIARC 2000
- [45] Molzer, C., Felsenstein, K., Vierti, R., Litzka, J. u. Weninger-Vycudil, A. (2000) Statistische Methoden zur Auswertung von Straßenzustandsdaten. *Strassenforschung Heft 499*, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie BMVIT. Wien 2000
- [46] Weninger-Vycudil, A. Entwicklung von Systemelementen für ein österreichisches Pavement Management System. Publication 14. Vienna: Vienna university of technology 2003
- [47] Wistuba, M. P., Weninger-Vycudil, A., Mladenovic, G., Alisov, A. u. Litzka, J. (2013) InteMat4PMS - Integration of material-science based performance models into life-cycle analysis processed in the frame of pavement management systems, ERA-NET ROAD II – Coordination and Implementation of Road Research in Europe within the 7th Framework Program of the European Community, European Commission ERA-NET ROAD II – Coordination and Implementation of Road Research in Europe within the 7th Framework Program of the European Community 2013
- [48] Leary, R. A., Hahn, J. T. u. Buchmann, R. G. A Generalized Forest Growth Projection System Applied to the Lake States Region. *Gen. Tech. Rep. (1979) NC-49*, pp. 79-89
- [49] Lounis, Z. u. Mirza, S. Reliability-based service life prediction of deteriorating concrete structures 2 (2010)
- [50] Socina, M. (2007) Erweiterung der Nutzung von Straßenzustandsdaten in der systematischen Straßenerhaltung. Dissertation TU Wien, Technische Universität Wien. Wien 2007
- [51] Blumenfeld, T. (2020) Analyse und Prognose von Straßenzustandsdaten mit Hilfe von probabilistischen Methoden und der Strukturgleichungsmodellierung. Dissertation TU Darmstadt D17, Technische Universität Darmstadt. Darmstadt 2020
- [52] Roelfstra, G., Hajdin, R., Adey, B. T. u. Brühwiler, E. Condition evolution in bridge management systems and corrosion-induced deterioration. *Journal of Bridge Engineering, ASCE* 9 (2004) 3, S. 268–277

- [53] Hajdin, R. KUBA 4.0 - The Swiss Road Structure Management System. Transportation Research Circular E-C128: International Bridge and Structure Management, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C. (2008), S. 47-62
- [54] Hajdin, R. u. Peeters, L. Bridging Data Voids: Advanced Statistical Methods for Bridge Management in KUBA. 10th International Bridge and Structure Management Conference. Buffalo, N.Y. 2008
- [55] Wunderlich, J., Schiffmann, F. u. Hajdin, R. Bereichsübergreifende Bedarfsplanung. Kommunalmagazin Nr. 4 August/September (2012), S. 70–72
- [56] Martin, T., Choumanivong, L., Thoresen, T. u. Kadar, P. Further Development of Probabilistic Road Deterioration Modelling: Pilot Application. Sydney 2015
- [57] Klinghammer, S., Huber, T. u. Nagel, M. Methodenstudie zur Verbesserung des Prognoseinstrumentariums für die langfristige Erhaltung der Bundesfernstrassen. Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Ingenieurbüro ASTRA. Bonn-Bad Godesberg
- [58] Mašović, S. u. Hajdin, R. Modelling of bridge elements deterioration for Serbian bridge inventory. Structure and Infrastructure Engineering 10 (2014) 8, S. 976–987
- [59] Vanclay, J. Modelling Forest Growth and Yield: Applications to Mixed Tropical Forests. 1994
- [60] Koch, R. (1992) Entwicklung eines Prognosemodells zur Beschreibung der Zustandsänderungen eines ausgewählten Straßennetzes. Schriftenreihe des Instituts für Straßenwesen und Eisenbahnbau der Ruhr-Universität Bochum, . Bochum 1992
- [61] Masovic, S., Stošić, S. u. Hajdin, R. Application of Semi-Markov Decision Process in Bridge Management. IABSE Symposium Report 105 (2015), S. 1–8
- [62] Blumenfeld, T. Describing Changes in Road Condition by Numerically Described Multi-Dimensional Probability Distributions. Proceedings of Transportation Research Arena (TRA) (2016)
- [63] Neumann, D. (2002) Kalman-Filter und Partikelfilter zur Selbstlokalisierung – Ein Vergleich., Fachgebiet Psychologie, Justus-Liebig-Universität Gießen. Giessen 2002
- [64] Kalman, R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. Journal of Basic Engineering 82 (1960) 1, S. 35–45
- [65] Li, Z. (2005) A probabilistic and adaptive approach to modeling performance of pavement infrastructure. Dissertation University of Texas b59937130, Technische Universität Darmstadt. Austin, USA 2005
- [66] Park, E. S., Smith, R. E., Freeman, T. J. u. Spiegelman, C. H. A Bayesian approach for improved pavement performance prediction. Journal of Applied Statistics 35 (2008) 11, S. 1219–1238
- [67] Choi, J., Wu, R., Pestana, J. u. Harvey, J. New Layer-Moduli Back-Calculation Method Based on the Constrained Extended Kalman Filter. Journal of Transportation Engineering-asce - J TRANSP ENG-ASCE 136 (2010)
- [68] Renken, P., Hagner, T. u. Feßler, A. (2000) Veränderung der Eigenschaften polymermodifizierter Bitumen während Herstellung, Lagerung, Transport und Einbau von Asphaltmischgut. FE-Nr. 07.179/1997/BGB, Bundesanstalt für Straßenwesen 2000
- [69] VSS 40585 (2019) Verdichtung und Tragfähigkeit – Anforderungen. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
- [70] VSS 70317 (2019) Böden - Plattendruckversuch EV und ME. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
- [71] VSS 70312 (2019) VSS-Gerät für den Plattendruckversuch EV und ME. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
- [72] Bodmer, P., Byland, H. u. deWitte, H. (2014) Leichtes Fallgewichtsgesetz für die Verdichtungskontrolle von Fundamentalschichten. Schriftenreihe VSS Bericht 1459, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen. Zürich 2014
- [73] VSS 70461 (2019) Bituminöses Mischgut; Bestimmung des Schichtenverbunds (nach Leutner). Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
- [74] SN EN 12697-26 (2019) Asphalt; Prüfverfahren – Teil 26: Steifigkeit. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
- [75] SN EN 12697-24 (2019) Asphalt; Prüfverfahren – Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
- [76] Wistuba, M. P. u. Schrader, J. Abschätzung der Performance von Asphalt anhand von Bitumenprüfungen. Straße und Autobahn 70 (2019) 6, 479–489
- [77] Büchner, J. (2021) Prüfung von Asphaltmastix im Dynamischen Scherrheometer. Schriftenreihe. Dissertation TU Braunschweig Heft 38, Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen. Braunschweig 2021
- [78] SN 670511 EN 1426 (2016) Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Nadelpenetration. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
- [79] SN 670512 EN 1427 (2016) Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugelverfahren. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
- [80] Wistuba, M. P. u. Schrader, J. Abschätzung der Performance von Asphalt anhand von Bitumenprüfungen. Proceedings of Deutscher Straßen- und Verkehrskongress. Erfurt 2018
- [81] (2018) Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - BTSV-Prüfung. Deutsche Institut für Normung e.V., Berlin
- [82] Wistuba, M. P., Büchner, J., Hilmer, T., Steineder, M., Eberhardsteiner, L., Donev, V. u. et al. (2019) Vereinfachung der prüftechnischen Ansprache des Gebrauchsverhaltens von Asphalt VEGAS Nr. 863063, FFG. Wien 2019

-
- [83] Rowe, G. M. u. Bouldin, M. G. Improved Techniques to Evaluate the Fatigue Restistance of Asphalt Mixtures. Proc., 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, EAPA & Eurobitume (2000), S. 754–763
-
- [84] (2014) EN 12607-1: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft - Teil 1: RTFOT-Verfahren. CEN
-
- [85] (2012) EN 14769: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - EN 14769: Beschleunigte Langzeit-Alterung mit einem Druckalterungsbehälter (PAV)
-
- [86] Lu, X., Talon, Y. u. Redelius, P. 406-001 AGING OF BITUMINOUS BINDERS – LABORATORY TESTS AND FIELD DATA. 2008
-
- [87] Smith, B. T., Howard, I. L., Jordan, W. S., Daranga, C. u. Baumgardner, G. L. Comparing Pressure Aging Vessel Time to Field Aging of Binder as a Function of Pavement Depth and Time. Transportation Research Record 2672 (2018) 28, S. 223–234
-
- [88] Koyun, A. N., Büchner, J., Wistuba, M. u. Grothe, H. Rheological, spectroscopic and microscopic assessment of asphalt binder ageing. Road Materials and Pavement Design (2020)
-
- [89] Schrader, J. u. Wistuba, M. Zur Anwendung des neuen Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahrens (BTSV). Asphalt 53 (2018) 5, Seiten 11-15
-
- [90] Alisov, A. (2017) Typisierung von Bitumen mittels instationärer Oszillationsrheometrie. Dissertation TU Braunschweig Heft 33, Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen. Braunschweig 2017
-
- [91] Jing, R., Varveri, A., Liu, X., Scarpas, A. u. Erkens, S. Laboratory and Field Aging Effect on Bitumen Chemistry and Rheology in Porous Asphalt Mixture. Transportation Research Record 2673 (2019) 3, S. 365–374
-
- [92] Zhang, R., Sias, J. u. Dave, E. Correlating Laboratory Conditioning with Field Aging for Asphalt using Rheological Parameters. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2674 (2020), 036119812091589
-
- [93] FGSV Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Strassenbefestigungen, RPE-Str. 01. Publication 988. Köln: Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen FGSV 2001
-
- [94] Kübler, S. Digitale Standards für Daten aus Kontrollprüfungen und Eignungsnachweisen als ein Beitrag für BIM im Strassenbau. Straße und Autobahn 70 (2019) 9, Seiten 786-794
-
- [95] Delaby, M., Out d Henia, M., Perret, J. u. Etique, N. (2021) Wahl der Erhaltungsmaßnahmen aus Zustandserhebung für die Erhaltungsplanung (franz.: Choix des mesures d'entretien à partir des relevés d'état des chaussées pour la planification de l'entretien). Schlussbericht VSS 2016/416. Schriftenreihe Nr. 1709, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Strassen. Bern 2021
-
- [96] FGSV Arbeitspapier zur Systematik der Strassenerhaltung AP9/S Erhaltungsplanung Reihe S: Substanzwert (Bestand) 490 AP9/S. Köln: Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen FGSV 2019
-

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 17.01.2022

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS2018/421

Projekttitel: Modelle der Zustandsentwicklung von Fahrbahnen – mapFALKE (Methoden und Anforderungen der Prognose des Fahrbahnzustands zur Abschätzung von langfristigen Kosten in der Erhaltungsplanung)

Enddatum: 31.01.2022

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Das Ziel des Forschungsprojekts mapFALKE war es, durch die Weiterentwicklung von Methoden zur Bildung von Modellen der Zustandsprognose eine Verbesserung der Abschätzung der langfristigen Kosten in der Erhaltungsplanung zu ermöglichen. Die bisherigen Ansätze, welche u. a. Zustandsdaten, Klimadaten über Temperatur und Niederschlag, Bauweisen und Deckschichtarten sowie die Altersstruktur berücksichtigen, stellten dabei die Ausgangsbasis dar.

Die Neuheit im Bereich der Modelle der Zustandsentwicklung ist die Verwendung von einerseits netzweit vorhandenen Strassendaten (meist ausschliesslich die Zustandsdaten) und andererseits Daten von vorhandenen bzw. zusätzlich leicht zu erhebenden Laborergebnissen aus örtlichen Materialuntersuchungen für die Kalibrierung der Modelle einzelner Strassenabschnitte. Im Rahmen der Modellentwicklung und -kalibrierung wurden Daten aus Materialuntersuchungen benötigt. Dafür standen zwei Teststrecken zur Verfügung, an denen die TU-Braunschweig und die Empa bereits vorhandenen Laborergebnisse ermittelt hatte und an denen weitere Materialuntersuchungen durchgeführt werden konnten. Auch konnten Daten aus unterschiedlichen Belastungsversuchen mit dem mobilen Verkehrslastsimulator MLS10 der Empa für die Modellbildung ausgewertet und das Potential von innovativen Prüfverfahren (DSR Prüfungen an Bitumen und Mastix) bei der Entwicklung von Modellen der Zustandsentwicklung bewertet werden. Zum jetzigen Zeitpunkt werden einerseits Daten aus Materialuntersuchungen nicht referenziert mit den Strassendaten im Strasseninformationssystem abgelegt. Zum anderen gibt es noch keine Historisierung dieser Bauprojektdateien analog der Zustandsdaten, was eine statistische Analyse über ein Strassennetz unmöglich macht. Insbesondere bei den Auswertungen zu den MLS10-Daten von fünf verschiedenen Belastungsversuchen zeigte sich die Notwendigkeit zusätzlicher Daten, welche eine Auswertung zum Erkennen von statistischen Zusammenhängen ermöglichen würden.

Es wurde eine einfache Vorgehensweise für die Modellbildung mit abschnittsbezogener Kalibrierung aufgezeigt und durch die Integration von Bindemitteluntersuchungen in die Modellierung der Zustandsprognose erweitert. Hierzu wurden parameterspezifische Alterungskurven aus den Laboruntersuchungen zur Bestimmung der Ermüdungs-, Verformungs- und Rissbildungseigenschaften hergeleitet und aufgezeigt, wie diese in die bestehenden deterministischen und probabilistischen Prognosemodellierungsansätze integriert werden können. Abschliessend wurden die entwickelten Ansätze im Rahmen einer prototypischen Anwendung umgesetzt. Der Prototyp ermöglicht eine Zustandsprognose von einzelnen Strassenabschnitten sowie eine Analyse der Zustandsentwicklung auf der Netzebene. Im Prototyp wurden die Analysemöglichkeiten der vorhandenen Strasseninfrastrukturdaten exemplarisch getestet und entsprechende Visualisierungen erstellt.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Zielerreichung:

Die Ziele konnten weitestgehend, jedoch nicht umfassend erreicht werden. Der Grund hierfür liegt in den sehr komplexen Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge der Zustandsentwicklung innerhalb des Schichtensystems eines Belagsaufbaus und in der aktuell unzureichenden schweizerischen Datengrundlage für Strassendaten. Die grundsätzliche Abhängigkeiten konnten daher statistisch nicht analysiert werden.

Es wurden aber unterschiedliche Modellarten der Zustandentwicklung aufgezeigt und eine einfache Modellbildung mit einem stufenweisen Ansatz zur Kalibrierung in Abhängigkeit der Datengrundlage entwickelt. Die aktuelle Datenlage in der Schweiz lässt eine auf den Materialuntersuchungen aufbauende Kalibrierung noch nicht zu.

Der entwickelte Ansatz ist auch bei eingeschränkter Datengrundlage einsetzbar, um aus den eigenen vorhandenen Strassendaten Modelle der Zustandsentwicklung zu generieren. Die Anforderungen an die Eingangsdaten wurden definiert und die Anwendung in verschiedenen Anwendungsfällen aufgezeigt. Die Kalibrierung umfasst die Verwendung neuer Informationen aus aktuellen Erhebungskampagnen. Zusätzlich wird die Nutzung von zusätzlichen Materialuntersuchungen aufgezeigt.

Folgerungen und Empfehlungen:

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts konnten anhand der Bearbeitung und der erzielten Ergebnisse verschiedene Erkenntnisse gewonnen und daraus entsprechende Schlussfolgerungen gezogen werden. Diese betreffen die vorhandene Datenlage und -qualität der Zustandsdaten der Fahrbahnoberfläche sowie die Daten zum Schichtenaufbau und die dazugehörigen Materialuntersuchungen. Daraus werden Empfehlungen für Praxis, Normierung und weitere Forschung abgeleitet. Die Empfehlungen für die Praxis betreffen den Einsatz von Modellen der Zustandsentwicklung, die Anforderungen an die Durchführung der Zustandserfassung, die Einführung von neuartigen Bindemittel- und/oder Mastixprüfungen mit dem Dynamischen Scherrheometer (DSR) sowie Datenmanagement und Digitalisierung. Im Bereich der Normierung wird empfohlen, schweizerische Anforderungen und Qualitätsstandards der Zustandserfassung und -bewertung für Strassen im Rahmen eines Leitfadens oder einer Norm zu definieren. Zusätzlich werden Hinweise zur Revision der VSS 40925/40926 Zustandserfassung und -bewertung von Fahrbahnen und der Erarbeitung der VSS 40920 Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen gegeben. Abschliessend erfolgt die Ableitung von weiterem Forschungsbedarf zur Genauigkeit der Messverfahren im Bereich der Zustandserfassung, zur weiteren Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Zustandsentwicklung der Fahrbahnoberfläche und Material- und Schichtendaten sowie die Erweiterung der Kalibrierung der Modelle der Zustandsentwicklung unter Verwendung eines Partikelfilters.

Publikationen:

Es gibt bisher noch keine Publikationen des Forschungsprojekts. Geplant ist eine Veröffentlichung in Strasse und Verkehr (VSS Zeitschrift).

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Schiffmann

Vorname: Frank

Amt, Firma, Institut: IMC - Infrastructure Management Consultants GmbH

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts liefern eine Grundlage zur Generierung von Modellen der Zustandsentwicklung der Fahrbahnoberfläche im Bereich der Erhaltungsplanung. Auf der Grundlage von bestehenden Ansätzen erfolgte die Erweiterung einer Methodik zur Entwicklung und Kalibrierung von Modellen der Zustandsentwicklung unter Berücksichtigung von Zustandsdaten und Material- sowie Schichtendaten. Mit der Anwendung der vorgeschlagenen Methodik sind die Strassenbetreiber in der Lage auf der Grundlage eigener Strassendaten Modelle für die Erhaltungsplanung zu generieren. Dabei kann zudem überprüft werden, ob eine Clusterung der Daten bezüglich eines einzelnen oder mehrerer Attribute zu einer Verringerung der Streuung eines Modells führt und eine Unterteilung der Strassen mit jeweils unterschiedlichem Modell für ein Zustandsmerkmal sinnvoll ist. Vorhandene Zusammenhänge zwischen dem Zustand der Fahrbahnoberfläche und dem Schichtenaufbau bzw. durchgeführten Materialuntersuchungen, welche eine wichtige Grundlage zur Verbesserung von Prognosemodellen bilden, konnte hingegen nicht untersucht werden. Dies muss mit Blick auf die Verbesserung der schweizerischen Strassendaten Gegenstand der weiteren Forschung bleiben.

Umsetzung:

Die Umsetzung des aufgezeigten Ansatzes zur Generierung von Modellen der Zustandsentwicklung ist für die verschiedenen Strassenbetreiber unter Verwendung der eigenen vorhandenen Strassendaten sinnvoll. Wie aufgezeigt wurde, ist eine Nutzung von Material- und Schichtendaten in der Praxis aktuell noch nicht möglich. Die Datengrundlage befindet sich jedoch bei einigen Strassenbetreibern im Aufbau und kann dann im Ansatz eingesetzt werden. Wichtig erscheint in dem Zusammenhang die gemeinsame einheitliche Referenzierung der Zustands-, Schichten- und Bohrkerndaten bzw. Daten von weiteren Materialuntersuchungen. Diese Daten werden meist im Projektmanagement erhoben und sollten an das Erhaltungsmanagement übergeben werden. Einen wesentlichen Lösungsansatz für die Sicherstellung dieser Schnittstelle bietet ein BIM-Ansatz, welcher eine einheitliche Referenzierung der Daten liefert. Aktuell laufen relevante Forschungsprojekte (z.B. CEDR-Projekt AMSfree und VIF-DACH-Projekt BIM4AMS), welche einen Ansatz dieser Schnittstelle zwischen Projektmanagement und Erhaltungsmanagement erarbeiten.

weitergehender Forschungsbedarf:

Es wird empfohlen, den abgeleiteten weitergehenden Forschungsbedarf aufzunehmen:

- Genauigkeit von Messverfahren der Zustandserfassung und Kennzahlen des Strassenoberbaus nach Einbau
- Zusammenhänge zwischen der Zustandsentwicklung der Fahrbahnoberfläche und Material- und Schichtendaten
- Erweiterung der Kalibrierung unter Verwendung eines Partikelfilters

Einfluss auf Normenwerk:

Die Forschungsergebnisse selbst haben aktuell keinen Einfluss auf das Normenwerk. Die im Rahmen der Bearbeitung aufgedeckten Defizite im Normenwerk und die abgeleiteten Empfehlungen für die Normenarbeit sollten aber aufgegriffen und geprüft werden.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Horat Vorname: Martin

Amt, Firma, Institut: Tiefbauamt der Stadt Zürich

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Martin Horat, 17.1.22