

Abschätzung des Restwerts im PMS am Ende des Bewertungszeitraums

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 150

bast

Abschätzung des Restwerts im PMS am Ende des Bewertungszeitraums

von

Markus Stöckner
Loba Sagnol
Amina Brzuska

Institut für Verkehr und Infrastruktur
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

Frohmut Wellner
Anita Blasl
Viktoria Sommer

Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau
Technische Universität Dresden

Günter Krause
IB Krause
Rietschen

Christian Komma
HELLER Ingenieurgesellschaft mbH
Darmstadt

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 150

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 04.0207

Abschätzung des Restwerts im PMS
am Ende des Bewertungszeitraums

Fachbetreuung

Dirk Jansen

Referat

Dimensionierung und Straßenaufbau

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion

Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9323

ISBN 978-3-95606-574-3

Bergisch Gladbach, April 2021

Kurzfassung – Abstract

Abschätzung des Restwertes im PMS am Ende des Bewertungszeitraums (FE 04.0207/2007/MGB)

Aktuell dient bei der rechnergestützten Erneuerungs- und Instandsetzungsplanung von Bundesfernstraßen das Arbeitspapier 9, Reihe S (AP 9/S) als Hilfsmittel für die flächendeckende bzw. netzweite Substanzbewertung der gebundenen Straßenbefestigungsschichten. Das Ziel des Forschungsprojektes war es, durch die Anwendung der Entwurfsfassung der RSO Asphalt (Richtlinie für die Bewertung der strukturellen Substanz des Oberbaus von Verkehrsflächen in Asphaltbauweise) eine realitätsnähere Ermittlung des strukturellen Substanzwertes zu erreichen und dadurch die Ergebnisqualität der rechnergestützten Erhaltungsplanung netzweit und objektscharf zu erhöhen.

Um auf Grundlage des AP 9/S und der RSO Asphalt Vergleichsrechnungen für ein synthetisches Analysenet durchzuführen zu können, wurden, neben einigen objektspezifischen Beprobungen, auf Grundlage aller den Autoren zugänglichen Materialuntersuchungen allgemeingültige Materialeigenschaften für Asphaltdeck-, -binder- und -tragschichten ermittelt. Die allgemeingültigen Materialeigenschaften beschreiben für jede Asphaltmaterialart ein oberes, mittleres und unteres Steifigkeitsmodul sowie für Asphalttragschichtmaterialien zusätzlich eine obere, mittlere und untere Ermüdungsfunktion.

Auf Grundlage der allgemeingültigen Materialeigenschaften wurde erstmals auf Netzebene eine auf den RSO Asphalt basierende Nutzungs- bzw. Restnutzungsdauerberechnung durchgeführt. Auf Basis der systematischen Erhaltungsplanung wurde ein Grundmodell zur Berücksichtigung des Verfahrens der RSO Asphalt in einem Pavement Management System (PMS) entwickelt und implementiert. Die modifizierte Konfiguration des PMS wurde für das Analysenet angewendet und die Ergebnisse jenen der Standardkonfiguration gegenübergestellt. Mit dem Vergleich der verschiedenen Berechnungsverfahren wurde nachgewiesen, dass die Berücksichtigung der nach den RSO Asphalt berechneten Restnutzungsdauern im PMS möglich ist.

Estimation of the residual value in the PMS at the end of the valuation period (FE 04.0207/2007/MGB)

Currently, 'Working Paper 9, Series S' (AP 9/S) is used as a tool for the area-wide respectively network-wide substance assessment of bound road pavement layers in computer-aided renewal and maintenance & rehabilitation planning of federal motorways and trunk roads. The aim of this research project was to achieve a more realistic determination of the structural substance value and thereby to increase the quality of the results of the computer-aided pavement management in this way. This aim was to be achieved by applying the draft version of the 'RSO Asphalt' (Guideline for the Evaluation of the Structural Substance of the Pavement of Traffic Areas in Asphalt Construction).

In order to carry out comparative calculations for a synthetic analysis network, based on the AP 9/S and the RSO Asphalt, generally valid material properties for asphalt surface course, asphalt binder course and asphalt base course were determined on the basis of all material investigations available to the authors, in addition to some object-specific sampling. The generally valid material properties describe an upper, middle and lower stiffness modulus for each type of asphalt material as well as an additional upper, middle and lower fatigue function for asphalt base course materials.

Based on the generally valid material properties, a lifetime calculation and residual lifetime calculation based on the RSO Asphalt was carried out for the first time at the network level. Based on systematic pavement management, a basic model was developed and implemented to consider the RSO Asphalt method in a Pavement Management System (PMS). The modified configuration of the PMS was applied to the analysis network and the results compared to the standard configuration. By comparing the different calculation methods, it was proven that it is possible to consider the calculated residual lifetime according to the RSO Asphalt in the PMS.

Summary

Estimation of the residual value in the PMS at the end of the valuation period (FE 04.0207/2007/MGB)

1 Tasks and aims

Currently, 'Working Paper 9, Series S' (AP 9/S) is used as a tool for the area-wide respectively network-wide substance assessment of bound road pavement layers in computer-aided renewal and maintenance & rehabilitation (m&r) planning of federal motorways and trunk roads. The aim of the research project was to achieve a more realistic determination of the structural substance value and thereby to increase the quality of the results of the computer-aided pavement management. This aim was to be achieved by applying the draft version of the 'RSO Asphalt' (Guideline for the Evaluation of the Structural Substance of the Pavement of Traffic Areas in Asphalt Construction).

With the direct comparison of the calculation results according to AP 9/S and the RSO Asphalt, the following should be achieved:

- the estimation of the improvement potential for network-wide observations,
- the demonstration of the possible applications for asphalt pavements by means of suitable investigations on sampled road sections and
- the preparation of the calculation results according to the RSO Asphalt can be prepared for network-wide practical use with the Pavement Management System (PMS).

The direct comparison of the two methods was carried out at object level. The results of the calculations with the RSO Asphalt methodology were compared with the substance index determined according to AP 9/S for the sampled routes.

To integrate the RSO Asphalt into the PMS process, data requirements, interfaces and type of integration had to be defined within the overall concept. Based on this, a preferably automated calculation according to the RSO Asphalt was to be carried out in order to transfer the results to the PMS. In order to take additional information and key figures into account,

adjustments in the configuration of the PMS were necessary. Requirements for the extension of the input/output module for the PMS (PMS I/O) had to be formulated for the network-wide practical application.

Parallel to the development of the theoretical and procedural fundamentals, a suitable analysis network was selected and the necessary basic data were compiled. Based on this, the calculations were carried out according to the RSO Asphalt and the PMS was applied to the analysis network in the new (adapted) as well as in the original configuration. This procedure enabled the comparative evaluation of the effects of the different methods on the results of the PMS calculation and the pavement maintenance.

2 Method

In order to be able to fulfil the tasks and aims mentioned above within the framework of the project, a detailed literature analysis on topics relating to residual index estimation in the PMS had to be carried out first. For this purpose, research was carried out in the following areas: systematic maintenance management; PMS; data acquisition, processing and analysis in the field of maintenance management as well as structural evaluation of road pavements. Based on the literature analysis, two basic models were developed for the consideration of RSO Asphalt in a PMS (cf. section 3.1).

In a further step, so-called generally valid material properties were determined as the basis for the RSO Asphalt calculations of the previously defined synthetic analysis network, consisting of around 500 real sections (cf. section 3.2). Based on the AP 9/S and the RSO Asphalt, useful lives and residual useful lives were determined for the analysis network in order to carry out a PMS calculation using one of the developed basic models.

3 Results

3.1 Basic model for the consideration of the RSO Asphalt in a PMS

In the current PMS, the calculation results of AP 9/S are used as a criterion for the evaluation of the substance of the bound layers. The basic idea of the present research project was to replace the AP 9/S method directly by the RSO Asphalt evaluation method. Based on the previous findings, the following basic requirements had to be taken into account in the entire process (data management, data preparation, PMS calculation):

- In addition to the construction data, section-related material-related data for asphalt pavements have to be stored in the database.
- When evaluating the calculation results, determined based on the RSO Asphalt, an evaluation background must be set up that ideally corresponds to the value synthesis of the status recording and evaluation. However, in detail it depends on the actual integration of the RSO Asphalt into the overall calculation process, which does not necessarily have to be analogous to the previous calculation process.
- The procedure must be integrated into the calculation process of the PMS.

The choice between direct and indirect replacement of AP 9/S by RSO Asphalt in the present research project fell on direct replacement (cf. figure 1).

The direct replacement of the AP 9/S in the current program PMS I/O is not possible without a program extension, which is why the following procedure was used:

1. The section-related data are transferred to the ADtoPave program and the remaining useful life of the construction is calculated section by section according to the RSO Asphalt. The result is a section-related file with the essential parameters for substance evaluation.
2. This file is transferred to the PMS I/O, where the substance index (RSO Asphalt) is calculated and the entire data is further processed analogously to the previous procedure.
3. In the calculation algorithm of the PMS, changes or modifications have to be executed at various points. This concerns first of all the description of the state development for the substance index (RSO Asphalt) as well as based on its modifications with the m&r-measures allocation, the m&r-measures variants and the optimization.

3.2 Generally valid material properties

In order to reduce the time and money required for a residual substance evaluation of asphalt pavements according to the RSO Asphalt at network level due to object-specific sampling, generally valid material properties were determined within the framework of the research project. The stiffness behaviour of asphalt wearing courses, asphalt

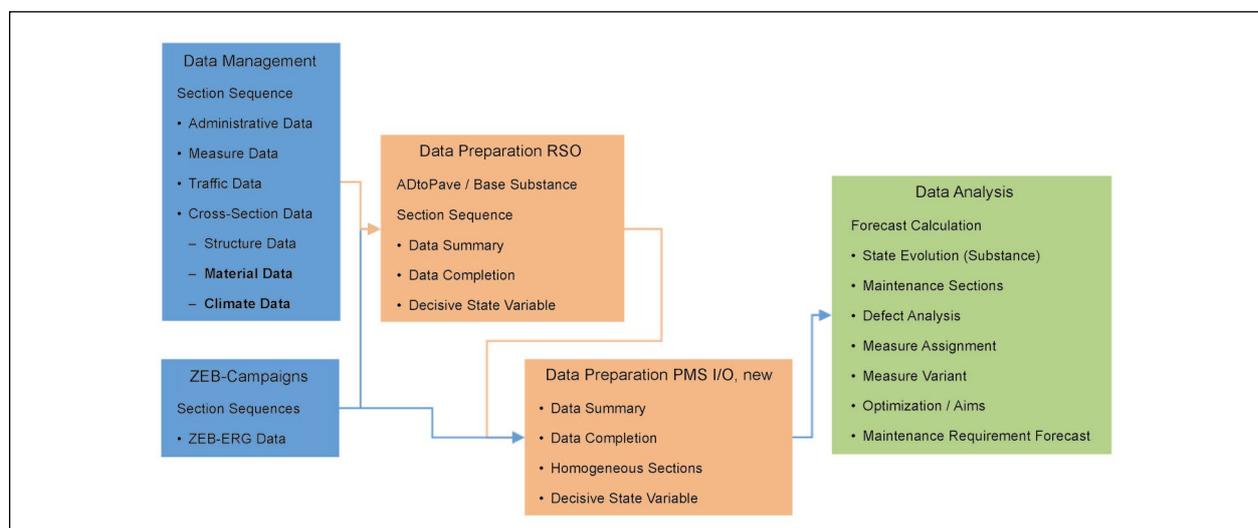


Fig. 1: Structure of the maintenance management with direct involvement of the RSO Asphalt

binder courses and asphalt base courses as well as the fatigue behaviour of asphalt base courses (ATS) were determined based on all material investigations available to the authors.

For this purpose, the results of all data sets classified as usable were combined into functional sets, separated by layer type as well as stiffness and fatigue criteria (represented by master functions, also known as main curves, and fatigue functions) (cf. figure 2 (left), exemplary for the main curves of the ATS). In order to work out material-specific orientations of individual functional coulters, further criteria were included. Here, materials from the supply (supply) and materials that have not yet endured a traffic load (fresh) were examined. The result of this investigation was that the range for the investigated cases, the functions shown in blue and red (cf. figure 2 (left)), were largely congruent. This means that the natural dispersion ranges of the main curves and fatigue functions of the fresh materials, due to their different mixture compositions (i.e. the type and type of binder used, the volumetric composition and subsequent compaction), are very similar to those of the materials already preloaded (despite additional traffic loads and various ageing processes).

Due to the similar scatter of the material groups, it was decided to consider only a differentiation with regard to the material type (related to the layer type) for subsequent processing steps within the research project. The functions shown in a diagram were thus

each assigned to a material group. These serve as the basis for deriving generally valid material properties. Within the research project, generally valid material properties are to be understood as material-specific functions such as main curves and fatigue functions, which divide the developed set of functions into defined areas and thus represent different quality levels. Consequently, 3 functions of different behaviour were selected (both main curves and fatigue functions). Individual obviously different functions in the edge region were not considered. The selected functions are subsequently referred to as upper, middle or lower functions and stand for comparatively high/medium/low stiffnesses or fatigue functions (see figure 2 (right)).

3.3 Results of comparative calculations

Figure 3 shows a direct comparison of the calculated residual lifetimes according to the RSO Asphalt and AP 9/S as an example. The calculation variants on which the RSO Asphalt is based differ in the choice of ATS materials (ATS_1...ATS_9) in the relevant asphalt base layers. The AP 9/S calculations differ in the selection of the forecast function. The combination of generally valid material properties can be taken from the description of the remaining useful lives shown. The first digit indicates the asphalt surface course material (ADS_2), the second digit the asphalt binder course material

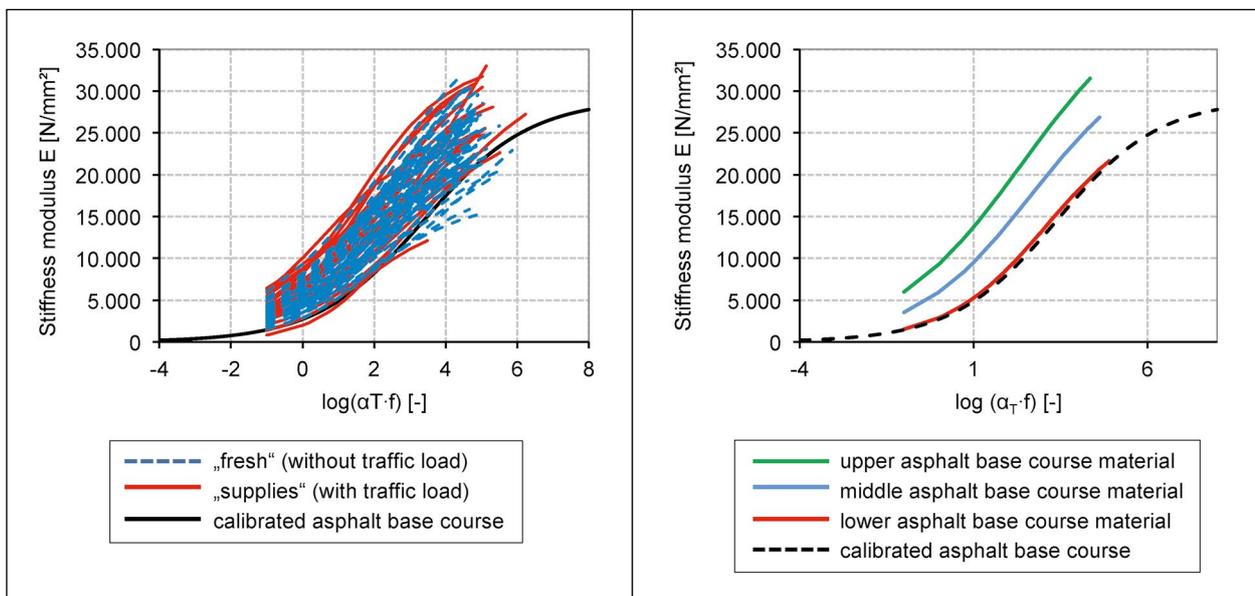


Fig. 2: Main curves of all asphalt base layer mixtures considered (left), selected main curves for the asphalt base layer material (right)

Properties asphalt materials	Generally valid material properties								
Stiffness modulus surface course	medium								
Stiffness modulus binder course	medium								
Stiffness modulus base course	high			medium			low		
Fatigue function base course	high	medium	low	high	medium	low	high	medium	low
Designation legend	221	222	223	224	225	226	227	228	229

Tab. 1: Explanation of the investigated combination of material properties in figure 3

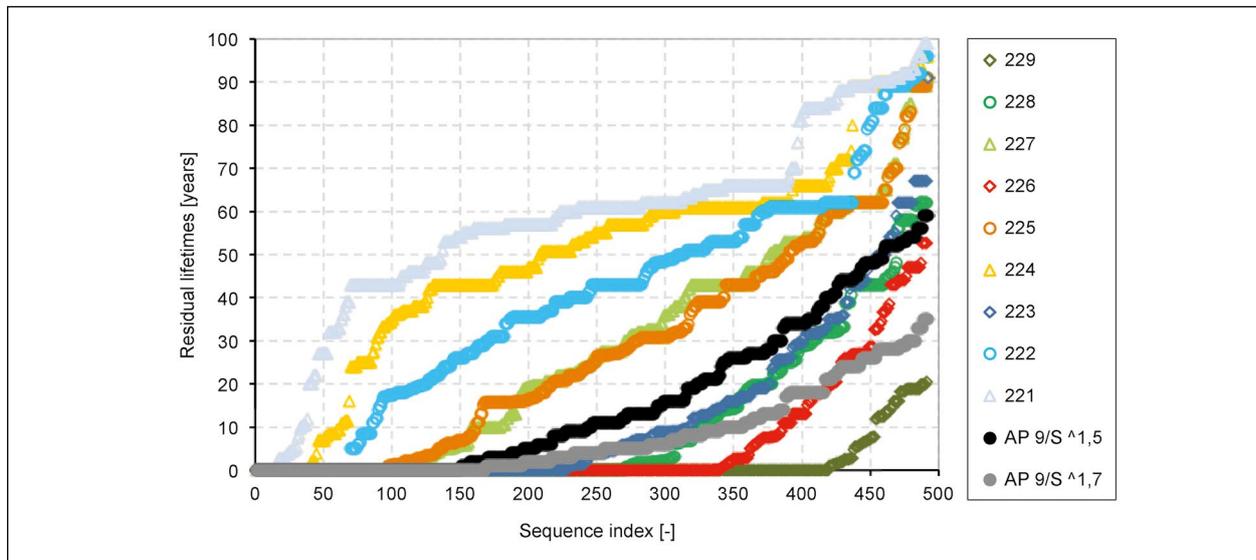


Fig 3: Exemplary residual lifetimes of all investigation sections

(ABS_2), each with a medium stiffness and the third digit describes the cross combination of high, medium and low stiffness with high, medium and low fatigue resistance in the ATS (see table 1).

The largely uniform course of the two AP 9/S calculation results in figure 3 follow from the depreciation model used in AP 9/S (material- and time-dependent reduction of layer thicknesses). The RSO Asphalt calculation results, on the other hand, show significantly greater differences in possible lifetimes respectively residual lifetimes. This is due to the different material qualities.

According to the current state of knowledge, it is not possible to assign the individual investigation sections of the analysis network to one model variant based on local conditions. An unambiguous assignment is only possible by sampling the individual sections in terms of the RSO Asphalt. Consequently, no reliable statements can be made for the selected investigation sections with regard to the expected useful lives or residual useful lives.

3.4 Results of PMS calculations

The influence of selected combinations of material properties on the PMS results was investigated using various comparative calculations. The current PMS setup with the substance index (structure) according to AP 9/S was used as the standard configuration. In addition to the standard configuration, the parameters and conditions developed in the research report were implemented in the PMS. The calculations were carried out for the defined analysis network with calculation input values extended with regard to the RSO Asphalt.

For the evaluation of the results, the temporal changes (state evolution) of the user related index, the substance index (surface), the substance index (structure) and the residual lifetimes as well as the area shares of the different m&r categories for both configuration variants of the PMS were compared and evaluated. The calculation demonstrated that the methodology is basically applicable in the PMS, taking into account the calculated residual lifetimes according to the RSO Asphalt.

4 Conclusions for practical application

Within the scope of the research project, the integration of the RSO Asphalt into a PMS was enabled and applied for the first time. Due to the small number of real sampling sections, it was not possible to validate the method within the scope of the present research project. However, in order to increase the quality of the results of the computer-aided m&r planning network-wide and objectspecific in the future, to plan the m&r sustainably and to improve the road condition in the long term through the targeted and economic use of the available m&r resources, it is necessary to advance the realistic determination of the structural index. While the object-specific evaluation of the structural substance of asphalt pavements can be carried out according to the RSO Asphalt, the realistic determination of the structural index at network level requires the analysis of a statistically sufficient number of sampled routes so that a verification of the material characteristic values to be applied network-wide can be realized. Realistic and practical results can only be expected if section-specific material characteristics are used as a basis and thereby a realistic distribution of residual useful lives is calculated.

Inhalt

Abkürzungen	11	2.3.6 Vergleichende Bewertung der vorhandenen Verfahren	31
1 Einführung	13	2.4 Strukturelle Bewertung und Nutzung in Erhaltungsmanagementsystemen im Ausland	32
1.1 Bedeutung der strukturellen Bewertung von Fahrbahnen in einem PMS	13	2.4.1 Tragfähigkeit und Substanz im österreichischen PMS	32
1.2 Zielsetzung und Lösungsweg	14	2.4.2 Erhaltungsmanagement in Frankreich	34
2 Literaturanalyse zur Restwertabschätzung im PMS	14	3 Grundlagen zur Berücksichtigung der RSO Asphalt in einem PMS	35
2.1 Systematische Erhaltungsplanung von Verkehrsflächen	14	3.1 Ableitung eines PMS-Modells zur generellen Einbindung der RSO Asphalt	35
2.1.1 Straßenerhaltung: Begriffsdefinitionen und Aufgaben	14	3.2 Vorschläge zur Festlegung der PMS-Modellparameter	38
2.1.2 Erhaltungsmanagement und Erhaltungsbedarfsprognosen	15	3.3 Voraussetzung für die Anwendung des Verfahrens bei netzweiten Betrachtungen	41
2.1.3 Pavement Management System (PMS)	17	3.3.1 Datenqualität und -vollständigkeit	41
2.2 Datenerfassung, -aufbereitung und -analyse für das Erhaltungsmanagement	19	3.3.2 Bildung homogener Abschnitte	42
2.2.1 Zustandserfassung und -bewertung (ZEB)	19	3.3.3 Kennzahlen	43
2.2.2 Weitere zerstörungsfreie Messverfahren zur Unterstützung der Substanzbewertung	20	4 Integration des Verfahrens zur Bewertung der strukturellen Substanz in die rechnergestützte Erhaltungsplanung	44
2.2.3 Datenverwaltung für das Erhaltungsmanagement	23	4.1 Ermittlung allgemeingültiger Materialeigenschaften	44
2.2.4 Datenaufbereitung und Datenanalyse im Pavement Management System	23	4.2 Vergleichsrechnungen	49
2.3 Strukturelle Bewertung von Straßenbefestigungen	24	4.2.1 Vergleichsrechnungen auf Objektebene	49
2.3.1 Substanzwert (Bestand) nach dem AP 9/S	24	4.2.2 Vergleichsrechnungen auf Netzebene	52
2.3.2 Kritische Betrachtung des AP 9/S	27	4.2.3 Berechnungen nach den RSO-Asphalt	58
2.3.3 Bewertung der strukturellen Substanz nach den RSO Asphalt 14	28	4.2.4 Berechnungen nach dem AP 9/S	64
2.3.4 Kriterien für die Substanzbewertung nach den RSO Asphalt 14	29	4.2.5 Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse	68
2.3.5 Verfahren zur Bewertung der strukturellen Substanz	30		

4.2.6	Plausibilitätsprüfung der RSO-Berechnungsergebnisse anhand von RStO-Aufbauten	71
4.2.7	Ergebnisse der Vergleichsrechnungen auf Objektebene anhand von realen Eingangsdaten der Beprobungsstrecke Staatsstraße 286 (S 286) bei Mülsen im Freistaat Sachsen	74
4.3	PMS-Rechenlauf	76
4.3.1	Bereitstellung der Eingangsdaten	76
4.3.2	Grundlagen der Sensitivitätsanalyse	78
4.3.3	Ergebnisse der PMS-Berechnungen	80
4.3.4	Vergleichende Bewertung	87
5	Zusammenfassung und Ausblick	88
	Literatur	91
	Bilder	95
	Tabellen	99
	Anhang	101

Abkürzungen

ABF	Abschnittsfolgetabelle	OKSTRA	Objektkatalog für das Straßen- und Verkehrswesen
ABS	Asphaltbinderschicht	ÖPP	Öffentlich-private Partnerschaft
ADS	Asphaltdeckschicht	PMS	Pavement Management System
AP 9/S	Arbeitspapier Nr. 9/S zur Erhaltungsplanung, Reihe S, Substanzwert (Bestand)	PMS-I/O	Input/Output Modul eines Pavement Management Systems
ARS	Allgemeines Rundschreiben Straßenbau	RDO Asphalt	Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschichten
ASB	Anweisung StraßeninformationsBank	RND	Restnutzungsdauer
ATS	Asphalttragschicht	RPE-Str	Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen
BAB	Bundesautobahnen	RSO Asphalt	Richtlinie zur Bewertung der strukturellen Substanz des Oberbaus von Verkehrsflächen in Asphaltbauweise
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen	RStO	Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen
BIM	Building Information Modeling	SDA	Schichtdickenauswertung
BISStra	Bundesinformationssystem Straße	SKM	Seiten-Kraft-Messverfahren
Bk	Belastungsklasse nach den RStO	TSD	Traffic Speed Deflectometer
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung	VNK	Von-Netzknotten
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur	ZEB	Zustandserfassung und -bewertung
BVWP	Bundesverkehrswegeplan	ZEB ERG	Ergebnisdatei der Zustandserfassung
DTV	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (in Kfz/24h)	ZTV Asphalt-StB	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt
DTV ^(SV)	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke der Fahrzeugarten des Schwerverkehrs (in Kfz/24h)	ZTV ZEB-StB	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen
DVZ	Dickenvergleichszahl nach dem AP 9/S	ZW	Zustandswert
ESS	Externe Schnittstelle		
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen		
FWD	Falling Weight Deflectometer		
GIS	Geografisches Informationssystem		
IKS	Internes Kontrollsystem		
Mat.	Material		
MKL	Mängelklasse		
MW	Mittelwert		
NNK	Nach-Netzknotten		

1 Einführung

1.1 Bedeutung der strukturellen Bewertung von Fahrbahnen in einem PMS

Das Bundesfernstraßennetz der Bundesrepublik Deutschland umfasst derzeit 12.996 km Bundesautobahnen und 38.070 km Bundesstraßen (BMVI 2017). Die Erhaltung des Bundesfernstraßennetzes dient zur Sicherung der Mobilität unserer Gesellschaft und ist aufgrund der steigenden Anforderungen an dessen Leistungsfähigkeit sowie den volkswirtschaftlichen Zusammenhängen von herausragender Bedeutung. Die Verkehrsinfrastruktur „[...] ist eines der wertvollsten Anlagevermögen und Grundlage für die erfolgreiche wirtschaftliche Entwicklung und der Lebensqualität“ (SOCINA, KOMMA 2015). Das entsprechende Brutto-Anlagevermögen der Verkehrsinfrastruktur Straßen und Brücken von über 573 Mrd. Euro verdeutlicht die wirtschaftliche Relevanz einer intakten Infrastruktur (BMVI 2017).

Das Bundesfernstraßennetz wickelt heute knapp 50 % der gesamten Fahrleistungen bei einem Anteil am überörtlichen Straßennetz von ca. 22 % ab (BMVI 2017) und ist gerade durch den anwachsenden Güterverkehr hochbelastet. Das Autobahnnetz wurde seit der Wiedervereinigung 1990 um 2.041 Kilometer erweitert (BMVI 2017). Auf Grundlage einer gemäß den „Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, RStO 12“ (FSGV RStO 2012) angenommenen Nutzungsdauer von 30 Jahren kann nach bisherigen Erfahrungen davon ausgegangen werden, dass die grundlegende Erneuerung der Streckenabschnitte eine Daueraufgabe darstellt und somit einen merklichen Netzzanteil umfassen muss.

Aufgrund des fortwährend steigenden Verkehrsaufkommens (BMVI 2017) sowie weiterer politischer, rechtlicher und wirtschaftlicher Veränderungen unterliegen zudem viele Strecken einer hohen, im damaligen Bau nicht kalkulierten, Verkehrsbelastung (BASt 2017). Ergebnisse aus der Erhaltungsbedarfsprognose von 2015 des Bundesverkehrswegeplans (BVWP) zeigen, dass eine ausreichende Qualität der Bundesfernstraßen nur durch ein netzweites und strukturiertes Erhaltungsmanagement gewährleistet werden kann (Bundesrechnungshof 2015). Um ein solches Erhaltungsmanagement gezielt durchführen zu können, müssen neben Straßenaufbau-, Klima- und Verkehrsbelastungsdaten

auch Informationen zur Straßenhistorie sowie zu verbleibenden Nutzungsdauern der bestehenden Infrastruktur vorhanden sein.

Die bestehende Struktur existierender Straßendatenbanken, verbunden mit den bisher gegebenen Werkzeugen basierend auf der Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) nach den „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen, ZTV ZEB-StB“ (FGSV ZTV ZEB 06/18), erlauben keine Rückschlüsse hinsichtlich der strukturellen Substanz einer Straßenbefestigung und zu erwartender Restnutzungsdauern. Der Mangel an Informationen und Daten führt dazu, dass Verwaltungen in Ländern und Kreisen ihre Erhaltungsentscheidungen maßgeblich auf Basis bisheriger Nutzungsdauern oder persönlicher Einschätzungen fällen, was jedoch keinem strukturierten Vorgehen entspricht (ZANDER 2017).

Die Sammlung von Daten, die dem Erhaltungsmanagement aus Sicht der strukturellen Bewertung zugrunde gelegt werden können, wird durch unterschiedliche Projekte vorangetrieben. Hierzu zählen zum Beispiel die Bereitstellung des internen Kontrollsystems (IKS) für das Bundesautobahnnetz in Nordrhein-Westfalen (DRÖGE 2017) oder die Umsetzung der Building Information Modeling (BIM) Methodik auch im Erhaltungsmanagement (BORRMANN et al. 2018).

Die Substanzbewertung von Straßenbefestigungen basiert derzeit, gemäß dem Stand der Technik, auf den Daten der Zustandserfassung und -bewertung (ZEB-Daten) und dem „Arbeitspapier[] zur Systematik der Straßenerhaltung, Erhaltungsplanung, Reihe S: Substanzwert Bestand, AP 9/S“ (FGSV AP9/S 2003). Dieser im derzeitigen Pavement Management System (PMS) mit dem AP 9/S netzweit verwendete Ansatz zur Bewertung der vorhandenen Substanz wird zwar als ökonomischer, jedoch nicht als ingenieurtechnischer Ansatz betrachtet und als unzulänglich für die Bewertung der strukturellen Substanz einer Straßenbefestigung angesehen (JANSEN 2017, ZANDER 2017). Um die strukturelle Substanz einer Befestigung besser erfassen zu können, wurden die „Richtlinien zur Bewertung der strukturellen Substanz des Oberbaus von Verkehrsflächen [...]“ in Asphaltbauweisen und Betonbauweisen (RSO Asphalt und RSO Beton) im Entwurf aufgestellt bzw. befinden sich in Bearbeitung. Nach offizieller Einführung beider Richtlinien soll zukünftig eine Substanzbewertung von Straßenbe-

festigungen unter Berücksichtigung des material-spezifischen Verhaltens der in den einzelnen Straßenschichten eingebauten Materialien durch die Entnahme von Bohrkernen in situ und anschließender Untersuchung dieser mittels geeigneter Laborversuche ermöglicht werden. Damit ist jedoch noch keine netzweite Anwendung im Rahmen eines Pavement Management Systems (PMS) möglich, da der damit verbundene Aufwand netzweiter Bohrkernentnahmen zu hoch ist. Würde es allerdings gelingen, das Verfahren nach den „Richtlinien zur Bewertung der strukturellen Substanz des Oberbaus von Verkehrsflächen in Asphaltbauweisen, RSO Asphalt“ (FGSV RSO Asphalt 2014E) so aufzubereiten, dass eine netzweite Anwendung im Rahmen des Erhaltungsmanagements möglich ist, wäre eine realitätsnähere Beschreibung der noch vorhandenen Substanz einer Fahrbahnbefestigung auf Netzebene möglich.

1.2 Zielsetzung und Lösungsweg

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, durch die realitätsnähere Ermittlung des strukturellen Substanzwertes die Qualität der Ergebnisse der rechnergestützten Erhaltungsplanung netzweit und objektscharf zu erhöhen, die Erhaltung nachhaltig zu planen und den Straßenzustand durch zielgerichteten und wirtschaftlichen Einsatz der verfügbaren Erhaltungsmittel langfristig verbessern zu können.

Detailziele sind daher

- mit dem direkten Vergleich der Berechnungsergebnisse nach dem AP 9/S und der Entwurfsfassung der RSO Asphalt das Verbesserungspotenzial für netzweite Betrachtungen aufzeigen zu können,
- die Anwendungsmöglichkeiten der RSO Asphalt im Zusammenhang mit dem PMS soweit wie möglich für den netzweiten Praxiseinsatz aufzubereiten sowie
- anhand geeigneter Untersuchungen an bereits beprobten Straßenabschnitten und Teilnetzen die Einsatzmöglichkeiten für Asphaltbefestigungen aufzuzeigen.

Der direkte Vergleich zwischen den beiden Verfahren erfolgt auf Objektebene. Die Ergebnisse der Berechnungen auf Grundlage der RSO-Methodik sowohl für reale Materialkennwerte (am Bohrkern bestimmt) als auch für sogenannte allgemeingültige

Materialeigenschaften verschiedener Qualitätsstufen (abgeleitet aus umfassenden Datensammlungen) werden den nach dem AP 9/S ermittelten Substanzwerten für die einbezogenen Untersuchungsstrecken gegenübergestellt. Die für die Berechnungen erforderlichen Informationen werden aus den jeweiligen Straßendatenbanken entnommen.

Zur Einbindung des Verfahrens nach den RSO Asphalt in den PMS-Prozess sind zunächst die Datenanforderungen, Schnittstellen und die Art der Integration innerhalb des Gesamtkonzeptes zu definieren. Zur Berücksichtigung der durch die Verfahrenseinbindung zusätzlich benötigten Informationen und Kennzahlen sind Anpassungen in der Konfiguration des PMS erforderlich. Für einen netzweiten praktischen Einsatz sind Anforderungen zur Erweiterung des Input/Output Moduls für das PMS (PMS-I/O) zu formulieren.

Parallel zur Erarbeitung der theoretischen und verfahrenstechnischen Grundlagen werden ein geeignetes Analysenet, welches auch die beprobten Strecken beinhaltet, ausgewählt und die erforderlichen Grunddaten in geeigneter Form zusammengestellt. Basierend auf den Grundlagen dieser Eingangsdaten erfolgen Serienrechnungen nach den RSO Asphalt bevor im Anschluss das PMS in der neuen (adaptierten) sowie in der ursprünglichen Konfiguration auf das Analysenet angewendet wird. Dieses Vorgehen ermöglicht die vergleichende Bewertung der Auswirkungen der verschiedenen Verfahren auf die Ergebnisse der PMS-Rechnungen und die Erhaltungsplanung.

2 Literaturanalyse zur Restwertabschätzung im PMS

2.1 Systematische Erhaltungsplanung von Verkehrsflächen

2.1.1 Straßenerhaltung: Begriffsdefinitionen und Aufgaben

Der Begriff der Straßenerhaltung umfasst Maßnahmen, die zur Erhaltung des Substanz- und Gebrauchswertes von Verkehrs- sowie Nebenflächen beitragen. Gemeinsam mit dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (ehemals Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)) ist es die Aufgabe der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), „die Grundla-

gen für eine wirtschaftliche, nachhaltige und nutzerorientierte Erhaltung der Bundesfernstraßen zu schaffen“ (SOCINA, KOMMA 2015).

Die Erhaltung von Straßenbefestigungen wird kategorisiert in bauliche und betriebliche Erhaltung, wobei die nachfolgenden Erläuterungen sich auf die planerischen Aspekte der Verfahren und Maßnahmen zur baulichen Erhaltung von Fahrbahnen beziehen.

Die Begriffssystematik zur Straßenerhaltung ist gemäß den „Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen, RPE-Stra 01“ (FGSV RPE-Stra 2001) in Bild 1 dargestellt. Dabei wird in der baulichen Erhaltung zwischen Instandhaltung, Instandsetzung und Erneuerung unterschieden. Bei der Instandhaltung handelt es sich um Baumaßnahmen kleineren Umfangs, die der Substanzerhaltung von Verkehrsflächen dienen, wobei nur örtlich begrenzte Schäden behoben werden. Die Instandsetzung dient der Substanzerhaltung oder der Verbesserung der Oberflächeneigenschaften, wobei i. d. R. auf der gesamten Fahrstreifenbreite eine neue Schicht von bis zu 4 cm Dicke eingebaut wird. Bei der Erneuerung handelt es sich um größere bauliche Maßnahmen, bei der eine Verkehrsfläche vollständig oder teilweise, entweder durch den Einbau weiterer Schichten (Gesamtdicke > 4 cm) oder durch den Austausch einer oder mehrerer Schichten, wiederhergestellt wird.

Die RPE-Stra 01 geben den Rahmen für die Aufgaben der Straßenerhaltung vor und sprechen alle relevanten Aufgaben an, allerdings in unterschiedlicher Detailtiefe. Folgende Aspekte zur systematischen Vorbereitung von Erhaltungsprogrammen für Straßennetze werden in den RPE-Stra 01 dargestellt:

Grundlagen,

Bewertung der Netzqualität,

Bewertung der Zustandsentwicklung,

Planung von Erhaltungsmaßnahmen auf Netzebene,

Aufstellen und Umsetzen eines Erhaltungsprogramms.

In Anhängen der RPE-Stra 01 werden verschiedene Verfahren bis hin zum Aufstellen koordinierter Bauprogramme näher beschrieben. Da die RPE-Stra 01 in weiten Teilen nicht mehr dem Stand der Technik entsprechen, befinden sie sich aktuell in Überarbeitung.

2.1.2 Erhaltungsmanagement und Erhaltungsbedarfsprognosen

Die grundlegende Aufgabenstellung des Erhaltungsmanagements von Straßen ist die wirtschaftliche und technische Werterhaltung sowie die Verkehrssicherung. Das gesamte Erhaltungsmanagement ist dabei umfassender als ein Pavement Management System (PMS), welches der Entscheidungsunterstützung dienen soll.

SCHMUCK und HEHENBERGER (1993) beschreiben die Zielsetzung von Managementsystemen wie folgt:

- Bewertung des Straßenzustandes,
- Prioritätenreihung von Erhaltungsmaßnahmen,
- Ermittlung der wirtschaftlich günstigsten Zeitpunkte und Maßnahmen,

Bauliche Erhaltung	(örtlich-punktuelle oder kleinflächige Maßnahmen) Bauliche Unterhaltung (Instandhaltung) (z. B. Vergießen von Rissen, kleinflächige Flickarbeiten)	
	Instandsetzung (größerflächige Maßnahmen)	I 1 – auf der Deckschicht (z. B. Oberflächenbehandlung, Dünnschichtbelag)
		I 2 – an der Deckschicht (z. B. Hoch-/Tiefenbau der Deckschicht)
	Erneuerung	E 1 – an der Decke (z. B. Hoch- oder Tiefenbau der Decke)
E 2 – an Tragschicht(en)/ am Oberbau (z. B. Verstärkung, Tiefenbau einschließlich der Tragschicht(en))		

Bild 1: Übersicht zur Begriffssystematik der Straßenerhaltung (FGSV RPE-Stra 2001)

- Kurz-, mittel- und langfristige Prognosen von Erhaltungsbedarf und Zustandsentwicklung.

Eine wesentliche Grundaufgabenstellung des Erhaltungsmanagements ist das Generieren einer Erhaltungsbedarfsprognose, die für die strategische Zuweisung von Haushaltsmitteln für ein Gesamtnetz bzw. auch unterteilt nach Verwaltungseinheiten, also Teilnetzen, aufgestellt werden kann. Aus den Ergebnissen der Erhaltungsbedarfsprognosen lassen sich grundsätzlich mit weiteren Bearbeitungsschritten Erhaltungsprogramme ableiten. Das technische Vorgehen beim Aufstellen einer Erhaltungsbedarfsprognose lässt sich grob in die folgenden Bereiche unterteilen (vgl. Bild 2):

1. Netzstruktur und Bestandsdaten,
 2. Periodische Zustandserfassung und -bewertung,
- (1) und (2) zusammengefasst als Datenverwaltung,
3. Datenaufbereitung, das heißt das abschnittsbezogene Zusammenführen der benötigten unterschiedlichen Daten als Input für ein Pavement Management System (PMS),
 4. Datenanalyse mit PMS-Rechnung.

Als PMS werden üblicherweise die Bereiche Datenaufbereitung und Datenanalyse bezeichnet (Bild 2).

Das vorliegende Forschungsprojekt zielt speziell auf die Verbesserung der strukturellen Bewertung der Befestigungssubstanz im PMS-Verfahren ab.

Da in einem PMS üblicherweise nur Maßnahmen der Instandsetzung sowie der Erneuerung entsprechend Bild 1 behandelt werden, wird klar, dass die Berücksichtigung der Substanz des Bestandes maßgebend und unverzichtbar bei der Auswahl plausibler und praxisorientierter Erhaltungsstrategien ist. Zur Bewertung der Substanz wurde als Zusatz zu den RPE-Stra 01 von der FGSV das Arbeitspapier AP 9/S (vgl. Kapitel 2.3.1) veröffentlicht. Eine weitere Methode der Substanzbewertung stellen die RSO Asphalt dar, die jedoch wegen ihres nicht zerstörungsfreien Ansatzes keine unmittelbare Anwendung in einem PMS finden können (vgl. Kapitel 2.3.3).

Im Folgenden wird vorwiegend auf das Arbeitspapier AP 9/S und die mögliche Integration des in den RSO Asphalt beschriebenen Verfahrens in das PMS eingegangen. Für die vorliegende Aufgabenstellung werden folgende Grundlagen ersichtlich:

- Das bisherige Verfahren nach dem AP 9/S erfordert im Bereich der Datenverwaltung eine ausreichende Datenbasis hinsichtlich Aufbaudaten (Schichtart und -dicke) sowie Altersverteilung.
- Die Ermittlung des Substanzwertes (Bestand) nach dem AP 9/S erfolgt im Rahmen der Datenaufbereitung.
- Im Rahmen der Prognoseberechnung mit einem PMS wird der Substanzwert (Bestand) an verschiedenen Stellen (Zustandsentwicklung, Maßnahmenauswahl und Optimierung) verwendet.

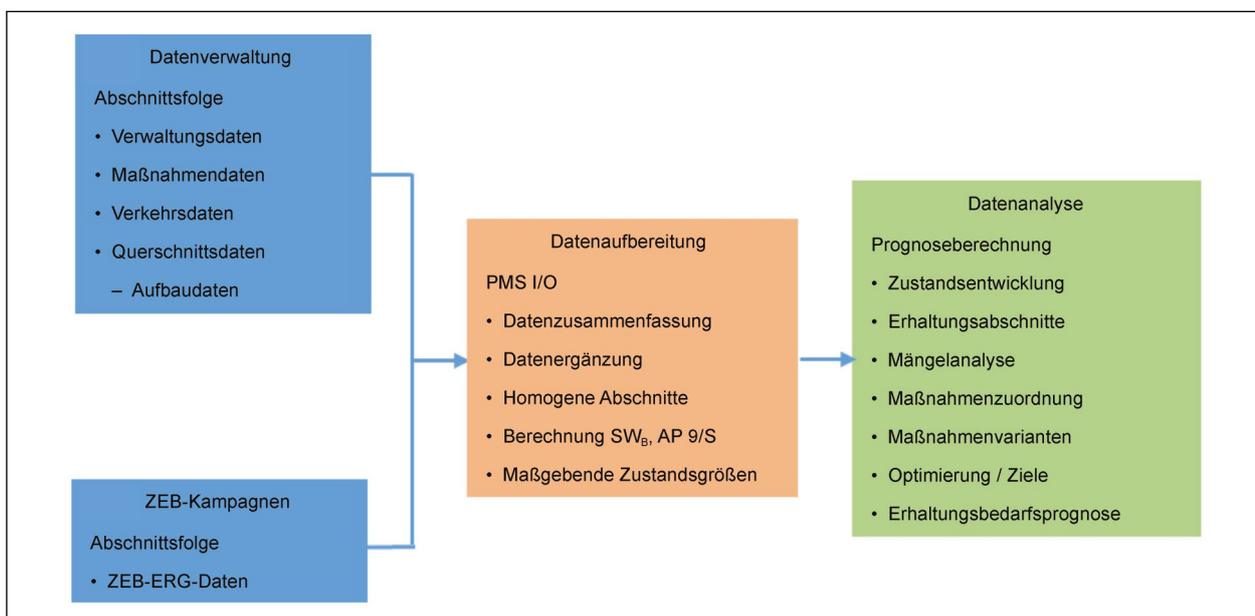


Bild 2: Struktur des Erhaltungsmanagements mit einem PMS, überarbeitet nach STÖCKERT (2018)

Im Weiteren soll daher diese Ausgangsstruktur als Grundlage verwendet und weiter ausgearbeitet werden.

2.1.3 Pavement Management System (PMS)

Das Mitte der 90er Jahre entwickelte Pavement Management System (PMS) (MAERSCHALK 1997) war als Hilfsmittel für die Planung und Entscheidungsfindung zur Instandsetzung und Erneuerung von Bundesautobahnen und Bundesstraßen konzipiert worden. Nach dessen Fertigstellung und ersten Proberechnungen wurde das PMS in einer durch ein Forschungsprojekt begleiteten Erstanwendung (MAERSCHALK, KRAUSE 2004) von den Straßenbauverwaltungen der einzelnen Bundesländer bezüglich seiner Praxistauglichkeit getestet. Das PMS ist hinsichtlich seiner Struktur bis heute im Wesentlichen unverändert und wird in acht Module unterteilt (Bild 3). Die wesentlichen Modellgrundlagen liefern, ergänzend zur RPE-Stra 01, die „Arbeitspapiere zur Systematik der Straßenerhaltung, Reihe R: Rechnergestützte Erhaltungsplanung“, insbesondere R 1 „Standardwerte der Programm-kenngrößen“ (FGSV AP9/R1 2001) und R 2 „Anforderungen an die Eingangsdaten“ (FGSV AP9/R2 2001). Darin ist das datentechnische Grundgerüst hinterlegt, das sich bis heute in den wesentlichen Kernelementen wenig verändert hat. Eine Fortschreibung dieser Regelwerke hat aktuell noch nicht stattgefunden, sodass aktuell bei der Aufstellung eines PMS-Modells im Wesentlichen auf Forschungsberichte und Fachliteratur zurückgegriffen werden muss.

Einen Beitrag zur Berücksichtigung von Qualitätszielen im PMS liefert die Forschungsarbeit von MAERSCHALK und SOCINA (2008). Darin sind erweiterte Modellvorgaben und Rechenalgorithmen für PMS-Berechnungen angegeben. Diese werden aktuell in dieser oder in veränderter Form in diversen PMS-Berechnungen für den Bund oder teilweise auch für einzelne Bundesländer angewandt. Für den kommunalen Bereich wurde von MAERSCHALK et al. (2013) ein Bericht zu „Daten und Methoden für ein systematisches Erhaltungsmanagement innerörtlicher Straßen“ vorgelegt.

Zur Weiterentwicklung des PMS und zur Verbesserung des Prognoseinstrumentariums für die Ermittlung des Erhaltungsbedarfs wurde seit der Erstanwendung des PMS eine Reihe von Forschungsarbeiten initiiert. Die Ergebnisse sind in dem For-

schungsbericht von KRAUSE und MAERSCHALK (2010) zusammengefasst. Dort werden auch Möglichkeiten und Grenzen der Implementierung dieser Forschungsergebnisse in ein modifiziertes PMS aufgezeigt und diskutiert. Daraus ergeben sich folgende Grundaufgaben für die Erweiterung des PMS:

- Zusammenfassen der Aufbaudaten in vertikaler Richtung,
- Zusammenfassen identischer Aufbaudaten in Längs- und Querrichtung,
- Korrektur und Ergänzung fehlender Daten,
- Bilden homogener Abschnitte auf Grundlage der Zustandsgrößen,
- Einbeziehen zusätzlicher Fahrstreifen bei der Abschnittsbildung,
- Berechnung der maßgebenden Zustandsgrößen für homogene Abschnitte,
- Berechnung des Substanzwertes (Bestand) nach dem AP 9/S und Berechnung des Substanzwertes (Gesamt) sowie des Gesamtwertes nach PMS-spezifischen Berechnungsvorschriften. (KRAUSE, MAERSCHALK 2010)

Die einzelnen, in Bild 3 dargestellten Module lassen sich in Anlehnung an MAERSCHALK et al. (2013) wie folgt beschreiben:

Das Bilden homogener Abschnitte (Modul 1) verbunden mit der Zuordnung der zugehörigen Bestandsdaten aus der Straßendatenbank stellt die Grundlage für die weitere Bearbeitung in einem PMS dar. Basis hierfür sind die Ergebnisdatei der



Bild 3: Module des rechnergestützten Pavement Management Systems, in Anlehnung an KRAUSE und MAERSCHALK (2010)

Zustandserfassung und -bewertung (vgl. Kapitel 2.2.1) sowie die weiteren für das PMS erforderlichen Bestandsdaten. Ergebnis dieser vorbereiteten Arbeitsschritte ist die sogenannte PMS-Input-Datei.

Modul 2: Die Zustandsentwicklung der prognostizierbaren Zustandsmerkmale wird in Abhängigkeit der Liegezeit nach dem nachfolgend beschriebenen Verfahren abgeschätzt. Der Zustandsverlauf ohne Maßnahme (bei Nichts-tun) wird für alle berücksichtigten Zustandsmerkmale (Längs- und Querebenheit, Griffigkeit, Risse und Oberflächenschäden) ermittelt. Bei dieser Abschätzung wird angenommen, dass sich in den aktuell gemessenen Zustandsdaten alle Einflüsse aus Baustoffeigenschaften, Einbaubedingungen, Verkehr, Klima, baulicher Unterhaltung u. a. widerspiegeln, die an dem jeweils betrachteten Abschnitt beim und nach dem Zeitpunkt der letzten Maßnahme wirksam waren. Zudem wird angenommen, dass neben dem Zeitpunkt der aktuellen Zustandserfassung für jeden homogenen Abschnitt auch der Zeitpunkt bekannt ist, zu dem der Zustand optimal war (Note 1,0 für das betrachtete Merkmal). Ebenso bekannt sein sollte der Typ der jeweiligen Funktion (Exponentialfunktion) zur Beschreibung der Zustandsentwicklung. Unter diesen Voraussetzungen können die Koeffizienten der Funktionen zur Beschreibung der Zustandsentwicklung so bestimmt werden, dass die aktuellen Zustandswerte der einzelnen Merkmale auf den jeweiligen Verhaltenskurven liegen. Dies kann mit einer Neuberechnung der Koeffizienten (FGSV AP9/R1 2001, HINSCH et al. 2005, OERTEL 2007) oder nach dem Curve-Shifting Verfahren erfolgen (MAERSCHALK, SOCINA 2008).

Mithilfe der abschnitts- und merkmalspezifischen Verlaufsfunktionen können für einen vorgegebenen Eingreifbereich (z. B. zwischen den Zustandswerten 3,5 und 4,5) die in einem Prognosezeitraum zur Erhaltung anstehenden (homogenen) Abschnitte mit den möglichen Eingreifjahren ermittelt werden (Modul 3). Für diese Abschnitte werden in einer automatisierten Mängelanalyse (KRAUSE 2000), die auch abschnittsspezifische Gegebenheiten einbeziehen kann, im Modul 4 die wahrscheinlichen Schadensursachen bestimmt. In Abhängigkeit davon werden im Modul 5 die bautechnisch möglichen Erhaltungsmaßnahmenarten ausgewählt, die i. d. R. mehrere technische und zeitliche Alternativen pro Abschnitt beinhalten.

Die im Modul 6 durchgeführte Bewertung und Reihung der technisch sinnvollen Maßnahmenalternativen

erfolgt nach ihrem Wirksamkeits-Kosten-Verhältnis. Dazu werden zunächst mit Einheitspreisen (im Allgemeinen Euro/m²) die Maßnahmenkosten berechnet. Die Einheitspreise entstammen dabei einer mehrfach überprüften und aktualisierten Basis-kalkulation (OEFNER et al. 2004).

Zur Ermittlung der Maßnahmenwirksamkeit werden die Zustandswerte zurückgesetzt (Reset) und die Zustandsverläufe nach der Maßnahmendurchführung abgeschätzt. Die Resets und die Zustandsentwicklung nach Maßnahmen hängen davon ab, inwieweit mit den jeweiligen Erhaltungsmaßnahmen auch die Ursachen von Schäden bzw. Mängeln beseitigt werden. Zur Beschreibung des Zustandsverlaufs nach Maßnahmen wird dabei eine zunächst in Abhängigkeit vom gemessenen Zustandswert und vom Zeitraum seit dem Neubau oder der letzten Erhaltungsmaßnahme bestimmte Verhaltensklasse mit ihrer in den RPE-Stra 01 aufgeführten Standard-Verlaufsfunktion verwendet. Die für alle Zustandsmerkmale kumulierten Differenzen zwischen den Flächen unter den Verlaufskurven ohne und mit Maßnahme dienen als Maß für die qualitative Beurteilung der Wirksamkeit (Effektivität) einer Maßnahme. Die Reihung der Maßnahmenalternativen für jeden einzelnen der im Prognosezeitraum zur Erhaltung anstehenden Abschnitte erfolgt nach dem Wirksamkeits-Kosten-Verhältnis. Diese qualitative Bewertung hat sich bei der Erstanwendung als äußerst praxisgerecht erwiesen. Es ist normalerweise weniger von Interesse, welche Maßnahmen für die Einzelabschnitte optimal sind, sondern welche Maßnahmen im Netzzusammenhang, d. h. bei vorgegebenem Erhaltungsbudget und gleichzeitiger Betrachtung aller Abschnitte des Analysenetzes, realisierbar sind.

Zur Bestimmung der im betrachteten Netz optimalen Maßnahmen wird im Modul 7 eine netzweite Optimierung durchgeführt. Die Optimierung aller für die einzelnen Abschnitte ermittelten Maßnahmenalternativen erfolgt unter Vorgabe der Zielfunktion maximaler Nutzenzuwachs bei ansteigenden Kosten und unter Berücksichtigung von den eventuell aus Budget-Szenarien resultierenden finanziellen Restriktionen. Dabei wird kein mathematisches Optimierungsverfahren, sondern ein heuristisches Verfahren mit quasi-optimalen Lösungen, angewendet.

Die Art der Aufbereitung der Ergebnisse der PMS-Anwendung im Modul 8 hängt davon ab, ob operative oder erhaltungsstrategische Fragestellungen betrachtet werden.

2.2 Datenerfassung, -aufbereitung und -analyse für das Erhaltungsmanagement

2.2.1 Zustandserfassung und -bewertung (ZEB)

Eine wesentliche Datengruppe zur Bewertung der Struktur der Verkehrsflächen und zur Aufstellung der Erhaltungsplanung sind die regelmäßig aktualisierten Zustandsdaten, die durch die Zustandserfassung und -bewertung nach den ZTV ZEB-StB (FGSV ZTV ZEB 06/18) erfasst werden. Dies erfolgt üblicherweise mit schnellfahrenden Messsystemen gemäß den Regelungen der ZTV ZEB-StB. Anforderungen an die Messsysteme sind in den ZTV ZEB-StB in den Kapiteln 2, 5, 6 und im Anhang enthalten.

Gemäß den ZTV ZEB-StB erfolgt die Zustandserfassung in den Teilprojekten (TP) Ebenheit (TP 1), Griffigkeit (TP 2) und Substanzmerkmale (Oberfläche) (TP 3), entsprechend der bewertungsrelevanten Zustandsgrößen aus Tabelle 1.

Die Erfassung der Zustandsgrößen geschieht über:

- Laserdistanzsensoren zur Erfassung von Längs- und Querprofilen zur Bestimmung von Längs- und Querebenheit,
- Seitenkraftmessverfahren zur Messung der Griffigkeit,

- Visuelle Erfassung von Oberflächenschäden wie Risse durch Kameras (Orthophotos).

Die substanzrelevanten Merkmale werden zwischen Asphalt- und Betonbefestigungen differenziert, da es hierfür bauweisenspezifische Schadensmerkmale gibt. Insofern liefern die ZTV ZEB-StB eine erste Aussage zur Substanz, soweit bereits Schäden an der Oberfläche erkennbar sind. Dies stellt für die Erhaltungsplanung eine wesentliche Information dar, ist aber für die Bewertung der strukturellen Substanz einer Straßenbefestigung nicht ausreichend.

Zur Durchführung aller Aufgaben und insbesondere der Ergebnisdokumentation der ZEB stellt die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) den sogenannten IT-ZEB Server zur Verfügung. Innerhalb des IT-ZEB Servers werden alle notwendigen Informationen, Datenbanken, Softwareprodukte und eine interaktive Visualisierung der Ergebnisse angeboten. Der IT-ZEB Server stellt damit das zentrale Werkzeug für die ZEB auf Bundesfernstraßen dar und baut auf den Standards der Anweisung StraßeninformationsBank (ASB) bzw. des Objektkatalogs für das Straßen- und Verkehrswesen (OKSTRA®) auf (vgl. Kapitel 2.2.3).

Auf der Grundlage der gemessenen Zustandsgrößen werden für die Teilprojekte 1 bis 3 (Ebenheit, Griffigkeit und Substanzmerkmale (Oberfläche)) für sogenannte Auswerteabschnitte (100 m auf freien

Merkmalsgruppe	Zustandsmerkmal	Zustandsindikator	Zustandsgröße
Ebenheit im Längsprofil	Allgemeine Unebenheit	Unebenheitsmaß, spektrale Dichte der Unebenheitshöhen $\Phi h (\Omega_0)$ [cm ³]	AUN
		Längsebenheitswirkindex ¹⁾ [-]	LWI ¹⁾
Ebenheit im Querprofil	Spurrinnen	Maximum aus den Mittelwerten der rechten und linken Spurrinntentiefe [mm]	MSPT
		Maximum aus den Mittelwerten der rechten und linken fiktiven Wassertiefe [mm]	MSPH
Rauheit	Griffigkeit	Seitenreibungsbeiwert (temperatur- und geschwindigkeitskorrigiert auf 40, 60 oder 80 km/h, Mittelwert) [-]	GRI 40, GRI 60, GRI 80
Substanzmerkmale (Oberfläche), Asphalt	Risse	Netzrisse, Risshäufungen und Einzelrisse prozentualer Anteil der betroffenen Fläche [%]	RISS
	Restschadensfläche (Asphalt)	Schadensfläche ohne Risse prozentualer Anteil der betroffenen Fläche [%]	RSFA
Substanzmerkmale (Oberfläche), Beton	Längs- und Querrisse	Längs- und Querrisse, mittlere Länge [m]	LQRL
		Längs- und Querrisse, betroffener Plattenanteil [%]	LQRP
	Restschadensfläche (Beton)	Schadensfläche ohne Längs- und Querrisse, betroffener Plattenanteil [%]	RSFB

¹⁾ geht derzeit nicht in die Berechnung der Teilwerte und des Gesamtwertes ein

Tab. 1: Bewertungsrelevante Zustandsgrößen (FGSV ZTV ZEB 06/18)

Strecken, 20 m in Ortsdurchfahrten) Zustandswerte zwischen 1,0 und 5,0 ermittelt. Bei der Note 1,0 kann von einem idealen Zustand ausgegangen werden. Die Note 3,5 bildet einen Warnwert, dessen Erreichen Anlass zu Analysen der Ursachen für die Zustandsverschlechterung und ggf. zur Planung von geeigneten eventuellen Maßnahmen gibt. Der Schwellenwert, mit der Note 4,5, beschreibt einen Zustand, bei dessen Erreichen die Einleitung von Erhaltungsmaßnahmen oder Verkehrsbeschränkungen geprüft werden muss. (FGSV ZTV ZEB 06/18)

2.2.2 Weitere zerstörungsfreie Messverfahren zur Unterstützung der Substanzbewertung

Zur Unterstützung der Substanzbewertung können auch zerstörungsfreie Verfahren angewendet werden. Folgende Geräte können dafür zum Einsatz kommen:

- Falling Weight Deflectometer (FWD),
- Curviometro,
- Lacroix Deflectograph,
- Benkelman-Balken,
- Traffic Speed Deflectometer (TSD),
- Georadar,
- Ultraschall.

Die daraus gewonnenen Daten werden jedoch nach heutigem Stand der Technik nicht für die netzweite Erhaltungsplanung verwendet. Die Funktionsweisen der Messverfahren werden trotzdem der Vollständigkeit halber im Folgenden erläutert.

(a) Messverfahren zur Bestimmung der Tragfähigkeit

Falling Weight Deflectometer (FWD)

Das Falling Weight Deflectometer ist ein stationäres System, welches in einem Anhänger oder Fahrzeug verbaut ist und punktuell auf die Fahrbahnoberfläche abgesetzt wird. Ein Lasthammer trägt einen Impuls in den Straßenaufbau ein, die entstehende Welle wird von Geophonen aufgezeichnet. Mittels mathematischer Verfahren wird die Tiefe der Verformungsmulde sowie deren Form (Radius und Stei-

gung) berechnet. Aus den rechnerisch bestimmten Indikatoren können Aussagen zur Tragfähigkeit und Substanz (Schichtenverbund, Steifigkeit der Schichten und Verformungsmodul des Bodens) abgeleitet werden. (FGSV AP Trag B 2.1 2008)

Vorteile
<ul style="list-style-type: none"> • Erfassung ist Routine • Großer Erfahrungshintergrund • Prüfvorschrift vorhanden • Gute Wiederholgenauigkeit • Existenz vieler Modelle und Ansätze zur Beschreibung der Substanz, zur Abschätzung der Restlebensdauer und zur Bestimmung möglicher Schadensursachen
Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Behinderung des fließenden Verkehrs • Punktuelle Messungen führen zu einem groben Punkteraster • Ergebnis hängt von der Kerntemperatur des Straßenoberbaus und der Feuchte des Unterbaus ab • Messprinzip stellt nicht die reale Belastung dar • Messergebnis ist von den verbauten Komponenten (Gummidämpfer, Geophone) und gerätespezifischen Einstellungen (Fallhöhe, Fallmasse) abhängig

Curviometro

Das Curviometro gehört mit etwa 20 km/h zu den langsam fahrenden oder quasi-stationären zerstörungsfreie arbeitenden Verfahren zur Tragfähigkeitsmessung und besteht aus drei in einer Kette montierten Geophonen, die in 5 m Abständen im Bereich der rechten Rollspur auf der Fahrbahn abgesetzt und zwischen den Zwillingsreifen der Hinterachse überrollt werden. Der Krafteintrag des Zwillingsreifens beträgt zwischen 80 und 130 kN. Je Messpunkt werden 100 Beschleunigungswerte erfasst, aus denen die Einsenkung und der Kurvenradius (Curvature) berechnet werden. Die Messung in engen Kurvenradien ist systembedingt nicht möglich, bei engen Radien muss die Kette demontiert werden. (FGSV AP Trag B 4 2012)

Vorteile
<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Punktdichte (alle 5 m) • Prüfvorschrift vorhanden • Gute Wiederholbarkeit • Guter Erfahrungshintergrund • Feine Auflösung der Einsenkung und des Radius • Belastung entspricht nahezu dem realen Bild der Achslasten • Aufgrund der hohen Last und der geringen Geschwindigkeit werden auch tiefer liegende Schichten erfasst

Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Behinderung des fließenden Verkehrs • Messungen wegen der Größe des Fahrzeuges nur auf entsprechend ausgebauten Straßen, auf der rechten Rollspur möglich • Enge Radien können nicht befahren werden • Ergebnis hängt von der Kerntemperatur des Straßenoberbaus und der Feuchte des Unterbaus ab

Lacroix Deflectograph

Der Lacroix Deflectograph, als quasi-statisches Verfahren, bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von etwa 4 km/h. Dabei werden zwei Tastarme in der rechten und linken Rollspur vor den hinteren Zwillingsreifen auf der Spur abgesetzt und von den Zwillingsreifen überrollt. Nach der Überrollung werden die Tastarme wieder in Fahrtrichtung vorgezogen und wieder abgesetzt. Dadurch sind Messpunkte alle 3 m in Längsrichtung möglich. Je Messpunkt werden die Änderungen des Drehwinkels der Tastarme aufgezeichnet und daraus die Einsenkung und Form der Einsenkungsmulde berechnet. Die Messung ist in sehr engen Kurvenradien systembedingt nicht möglich. (FGSV AP Trag A 2013)

Vorteile
<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Punktdichte (alle 3 m) • Gute Wiederholbarkeit • Prüfvorschrift vorhanden • Guter Erfahrungshintergrund • Feine Auflösung der Einsenkung und des Radius • Belastung entspricht nahezu dem realen Bild der Achslasten • Aufgrund der hohen Last und der geringen Geschwindigkeit werden auch tiefer liegende Schichten erfasst • Rechte und linke Rollspur werden erfasst
Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Behinderung des fließenden Verkehrs • Enge Radien können nicht befahren werden • Messungen wegen der Größe des Fahrzeuges nur auf entsprechend ausgebauten Straßen möglich • Ergebnis hängt von der Kerntemperatur des Straßenoberbaus und der Feuchte des Unterbaus ab

Benkelman-Balken

Der Standard-Benkelman-Balken besteht als statisches Verfahren aus einem als Dreibein ausgebildeten Traggestell, Messbasis genannt, das über drei Stützfüße auf der Fahrbahnoberfläche steht. An dem Traggestell ist ein waagebalkenartiger Tastarm (zweiarmiger Hebel), in seinem Dreiteilspunkt gelenkig, befestigt. Über diesen Tastarm werden die

Vertikalbewegungen des Messpunktes, welcher sich zwischen den Zwillingsreifen des Belastungsfahrzeuges befindet, von der Tastarmspitze auf eine Messuhr am gegenüberliegenden Ende des Tastarms übertragen und abgelesen. Die Last wird über dem Messpunkt positioniert und nach einem fest definierten Zeitraum vom Messpunkt wegbewegt. Es wird somit die Entlastung der Fahrbahnoberfläche erfasst. (FGSV AP Trag A 2013)

Vorteile
<ul style="list-style-type: none"> • Großer Erfahrungshintergrund • Viele Modelle und Ansätze zur Beschreibung des Zustands der Substanz, der Abschätzung der Restlebensdauer und der Bestimmung möglicher Schadensursachen • Prüfvorschrift vorhanden
Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Behinderung des fließenden Verkehrs • Relativ großes Punktrastrer (25 m bis 50 m) • Messung erfolgt in der Entlastungsphase • Messprinzip stellt nicht die reale Belastung dar • Ergebnis hängt von der Kerntemperatur des Straßenoberbaus und der Feuchte des Unterbaus ab

Traffic Speed Deflectometer (TSD)

Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen stationär bzw. langsam fahrenden Systemen kann sich der Traffic Speed Deflectometer (TSD) mit einer Geschwindigkeit von bis zu 80 km/h während der Messung perfekt in den fließenden Verkehr einreihen. Das Messsystem ist in einem Sattelaufleger verbaut. Dabei messen mehrere, in der rechten Rollspur und mit unterschiedlichen Abständen montierte Laserdopplersensoren die Geschwindigkeit, mit der sich die Straßenoberfläche vom Messsystem entfernt. Durch entsprechende Integration über die Zeit kann die lastbedingte Verformung der Fahrbahn berechnet und aus der geometrischen Figur die Indikatoren bestimmt werden (Einsenkung, Steigung Radius). Das Messsystem liefert dabei die Messwerte (quasi kontinuierlich) mit einer sehr hohen Abtastrate. (FGSV AP Trag B 5 2015)

Vorteile
<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Geschwindigkeit möglich, keine Behinderung des fließenden Verkehrs • Hohe Punktdichte • Gute Wiederholbarkeit • Prüfvorschrift vorhanden • Guter Erfahrungshintergrund • Abbildung von Einsenkung und Radius • Belastungen entsprechen bezüglich Achslasten und Geschwindigkeit dem realen Bild

Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Messungen wegen der Größe des Fahrzeuges nur auf entsprechend ausgebauten Straßen, auf der rechten Rollspur möglich • Ergebnis hängt von der Kerntemperatur des Straßenoberbaus und der Feuchte des Unterbaus ab • Nur wenige TSD-Anbieter in Europa • Kompensation möglicher dynamischer Einflüsse in Bearbeitung, neuste Generation besitzt entsprechende Beschleunigungsaufnehmer an der Lastachse; mathematischen Modelle für das curve fitting sind noch zu optimieren

(b) Messverfahren zur Schichtdickenbestimmung

Georadar

Georadarmessungen werden primär zur (weitestgehend) zerstörungsfreien Bestimmung der Schichtdicken, aber auch zum Auffinden von Inhomogenitäten und Störungen des Schichtenverbundes durchgeführt. Da die Laufzeit des Signals von verschiedenen Parametern (Temperatur, Feuchte etc.) abhängt, sind zur Kalibrierung der Schichtdickenmessung Bohrkern zu entnehmen. Die Messungen werden typischerweise mit hochfrequenten 1,0 GHz und einer 2,0 GHz Antenne durchgeführt. Das Messverfahren nutzt die Laufzeit zwischen dem Aussenden eines Signals und dem Eintreffen der Echos, welche jeweils an Schichtgrenzen entstehen. Die Messung erfolgt bei entsprechendem Aufbau des Systems auch schnellfahrend.

Die höherfrequenten Antennen können dabei zentimetergenaue Auflösung und Wirtiefe von bis zu ca. 0,5 m liefern. Sie eignen sich damit besonders für die Detektion der gebundenen Schichten des Oberbaus. Die Tiefenerfassung liegt bei der niederfrequenten Antenne bei bis zu 1,0 m und lässt somit Aussagen zu den ungebundenen Schichten zu. Je nach Messaufbau kann ein einzelner Schnitt oder mehrere Schnitte erfasst werden. Bei der Nutzung eines sogenannten Arrays lassen sich auch dreidimensionale Informationen generieren. Die Interpretation der Radargramme erfolgt meist teilautomatisch und erfordert die Entscheidung eines Experten.

Eine Identifikation von Rissen im Asphalt ist nach dem heutigen Stand der Technik nur unter sehr günstigen Bedingungen möglich, andere Interpretationsmöglichkeiten, zum Beispiel bezüglich der Verdichtung, werden im Rahmen unterschiedlicher Projekte untersucht. (FGSV AP Georadar 2016, JANSEN 2017)

Vorteile
<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Geschwindigkeit möglich, keine Behinderung des fließenden Verkehrs • Hohe Wirtiefe • Gute Wiederholbarkeit • Prüfvorschrift vorhanden • Guter Erfahrungshintergrund
Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Ergebnis hängt von der Temperatur und der Feuchte ab • Entnahme von Bohrkern zur Kalibrierung der Messung notwendig • Interpretation der Messergebnisse durch Experten erforderlich

Ultraschall

Ultraschallverfahren werden insbesondere für Strukturuntersuchungen etwa zur Schichtdickenbestimmung oder zur Untersuchung des Hohlraumgehaltes von Asphalt genutzt. Beim Ultraschall-Impuls-Echo-Verfahren wird ein Ultraschallimpuls von einem Prüfkopf (Sender/Empfänger oder Array) in das Prüfobjekt abgestrahlt, welcher sich im untersuchten Medium mit Schallgeschwindigkeit ausbreitet. An Grenzflächen, an denen sich der Schallwiderstand ändert, wird ein Teil der Ultraschallenergie reflektiert. Grenzflächen bilden zum Beispiel die Begrenzung des Prüfobjektes oder Hohlräume im Gefüge. Werden Messungen über einen längeren Zeitraum hinweg mehrfach wiederholt, so können Aussagen zur Entwicklung des Prüfobjektes erfolgen.

Nachteilig beim Ultraschallverfahren ist die Behinderung des Verkehrs aufgrund der notwendigen Absicherung während des Messprozesses. Des Weiteren geben die Messungen nur Auskunft über gebundene Schichten. Die Streuung des Signals erschwert außerdem eine zuverlässige Aussage. Zudem beeinflussen u. a. Temperatur und Feuchte die Messergebnisse. (DIN 2011, QUINTUS et al. 2009)

Vorteile
<ul style="list-style-type: none"> • Durch wiederholtes Prüfen über einen längeren Zeitraum können Aussagen zur Entwicklung des Prüfkörpers getroffen werden
Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Verkehrsbehinderungen durch notwendige Absicherung der Messstelle • Nur für gebundene Schichten anwendbar • Messergebnis abhängig von der Temperatur und Feuchte • Keine Prüfvorschrift für den Straßenbau vorhanden

2.2.3 Datenverwaltung für das Erhaltungsmanagement

Die erforderlichen Daten zur Straßenerhaltung werden gemäß der Anweisung Straßeninformationsbank (ASB) bzw. hierzu ergänzend dem OKSTRA®-Standard in sogenannten Straßendatenbanken oder Straßeninformationsbanken hinterlegt. Beide Begriffe werden synonym verwendet, wobei im Bundesfernstraßenbereich der Begriff Straßeninformationsbank gebräuchlich ist. Aufgabe der ASB ist die hinreichend genaue und umfassende Sammlung von Daten unterschiedlicher Art über die Straße und deren Ausstattung, sodass mit der darauf aufbauenden Straßeninformationsbank jederzeit detaillierte Aussagen über Straßen getroffen werden können, wobei die Datenaufnahme dafür systematisch und konsequent durchgeführt werden muss. Weitere Aufgabe einer Straßeninformationsbank ist es, die erfassten Daten und ermittelten Auswertergebnisse durch geeignete geografische Informationssysteme (GIS) grafisch darzustellen, um die Informationen allen Nutzern der Straßeninformationsbank zu visualisieren. (BMVI 2018)

Mit der ASB werden die Objektstrukturen aus fachlicher Sicht beschrieben. Ergänzend dazu gibt der OKSTRA®-Standard (www.OKSTRA.de) als Katalog von Objekten, Sachdaten und Beziehungen die informationstechnische Modellierung vor (BMVI 2018). Für das Erhaltungsmanagement mit einem PMS sind bestimmte Eingangsdaten und -parame-

ter erforderlich, die in einer Straßendatenbank vorgehalten werden. Tabelle 2 zeigt die benötigten Datengruppen wie zum Beispiel Leitdaten, Zustandsdaten, Verkehrsdaten, Querschnittsdaten und Aufbaudaten. Zudem werden Systemparameter wie die Verfahren zur Zustandsbewertung und -fortschreibung oder relevante Erhaltungsmaßnahmenarten und -kosten benötigt.

2.2.4 Datenaufbereitung und Datenanalyse im Pavement Management System

Die derzeitige Erhaltungsplanung ist, wie bereits in Kapitel 2.1 dargestellt, in RPE-Stra 01 (FGSV RPE-Stra 2001) geregelt. Voraussetzung für die in den RPE-Stra 01 beschriebenen Vorgehensweisen ist eine für das vorliegende Netz einheitliche, vollständige und aktuelle Datengrundlage, sowohl der Bestands- als auch der Zustandsdaten. Aufgrund des Umfangs ist die Auswertung dieser Daten nur noch mit einem rechnergestützten PMS möglich. Beim Einsatz des PMS sind die zwei Zielrichtungen zu unterscheiden, die sich mit den nachfolgend genannten Szenarientypen beschreiben lassen und üblicherweise für die relevanten Finanzbedarfsprognosen genutzt werden:

- Finanzszenarien zur Ermittlung der erhaltungspolitischen und erhaltungstechnischen Folgen eines für einen Prognosezeitraum vorgegebenen Finanzeinsatzes des Straßenbaulastträgers,

Datengruppe	Dateninhalte	Quellen
Ordnungssystem	Netzknotten-/Stationierungssystem (nach ASB)	Netzknottenkarte
Leitdaten	Straßengattung und -nummer, Land, Niederlassung, Richtungsbezeichnung (bei zweibahnigen Straßen), Bauamts-Meistereigrenzen, Grenzen Ortsdurchfahrten	Katasterpläne, Straßendatenbank
Querschnittsdaten	Anzahl Fahrstreifen pro Richtung, Fahrbahn-/Fahrstreifenbreite, Fahrstreifenanordnung, ggf. Nebenflächen	Straßendatenbank, Straßenbücher, Bauunterlagen
Aufbaudaten	Art, Dicke, Einbaujahr der Deck-, Binder- und Tragschichten, Art der obersten ungebundenen Schicht Art des Untergrundes bzw. Unterbaus	Straßendatenbank, Straßenbücher, Katasterpläne, Bauunterlagen
Erhaltungsdaten	Art und Jahr der letzten Instandsetzung bzw. Erneuerung	Baudokumentation
Verkehrsdaten	Verkehrsstärken (DTV, DTV ^(SV)), Bauklassen nach RStO 12, ggf. Funktionsklasse	Verkehrszählungen, Straßendatenbank
Zustandsdaten	ZEB (Längs-/Querebenheit, Wassertiefe, Griffigkeit, Risse, Flickstellen, Oberflächenschäden)	Zustandskartei, Datenbank, Vor-Ort-Erhebung

Tab. 2: Erforderliche Datengruppen für systematische Erhaltungsplanung, in Anlehnung an MAERSCHALK et al. (2013)

- Qualitätsszenarien mit Vorgaben zur Angebotsqualität für den Nutzer und damit zur Ermittlung des jährlich erforderlichen Finanzbedarfs.

2.3 Strukturelle Bewertung von Straßenbefestigungen

2.3.1 Substanzwert (Bestand) nach dem AP 9/S

Während der Entwicklung des Pavement Management Systems (PMS) in Deutschland Ende der 90er Jahre stellte sich nach ersten Testanwendungen heraus, dass vom System vorwiegend Instandsetzungsmaßnahmen, aber nur selten Erneuerungen, vom System vorgeschlagen wurden. Ursache hierfür war die alleinige Bewertung des Oberflächenzustandes durch die bei der ZEB erhobenen Merkmale. Daraufhin wurde in einem Forschungsvorhaben (OEFNER et al. 2000) ein Substanzwert (Bestand) konzipiert und in den Bewertungsalgorithmus des PMS integriert. Auf dieser Grundlage wurde das AP 9/S (FGSV AP9/S 2003) veröffentlicht. Das entwickelte Verfahren zielte vor allem darauf ab, mit den verfügbaren Informationen eine möglichst flächendeckende bzw. netzweite Bewertung zu ermöglichen. Als Basis dienen die in den Straßendatenbanken gespeicherten Angaben zum Befestigungs-

aufbau mit den Attributen Schichtart, Schichtdicke und Einbaujahr.

Der aktuelle, auf den Ergebnissen des Forschungsvorhabens „Weiterentwicklung des Substanzwertes (Gesamt) im PMS“ (KRAUSE, MAERSCHALK 2014) basierende Entwurf des AP 9/S (FGSV AP9/S 2019E) beschreibt die erforderlichen Berechnungsschritte wie folgt:

1. „Ermittlung der dimensionierungsrelevanten Beanspruchung B (gewichtete äquivalente 10-t-Achsübergänge) [...] und Zuordnung zu einer Belastungsklasse der RStO.“
2. „Ermittlung des erforderlichen Dickenindex $D_{I\text{erf}}$ mit der zutreffenden Gleichung [...].“
3. „Ermittlung des vorhandenen Dickenindex $D_{I\text{vorh}}$ aus den gebundenen Schichten der vorhandenen Befestigung mit den [...] angegebenen Äquivalenzfaktoren [...].“
4. „Ermittlung der Dickenvergleichszahl DVZ [...].“
5. „Ermittlung des Substanzwertes (Bestand) SW_B mit der Normierungsfunktion [...].“

Bild 4 verdeutlicht schematisch die Methodik zur Berechnung der vorhandenen äquivalenten Dicke

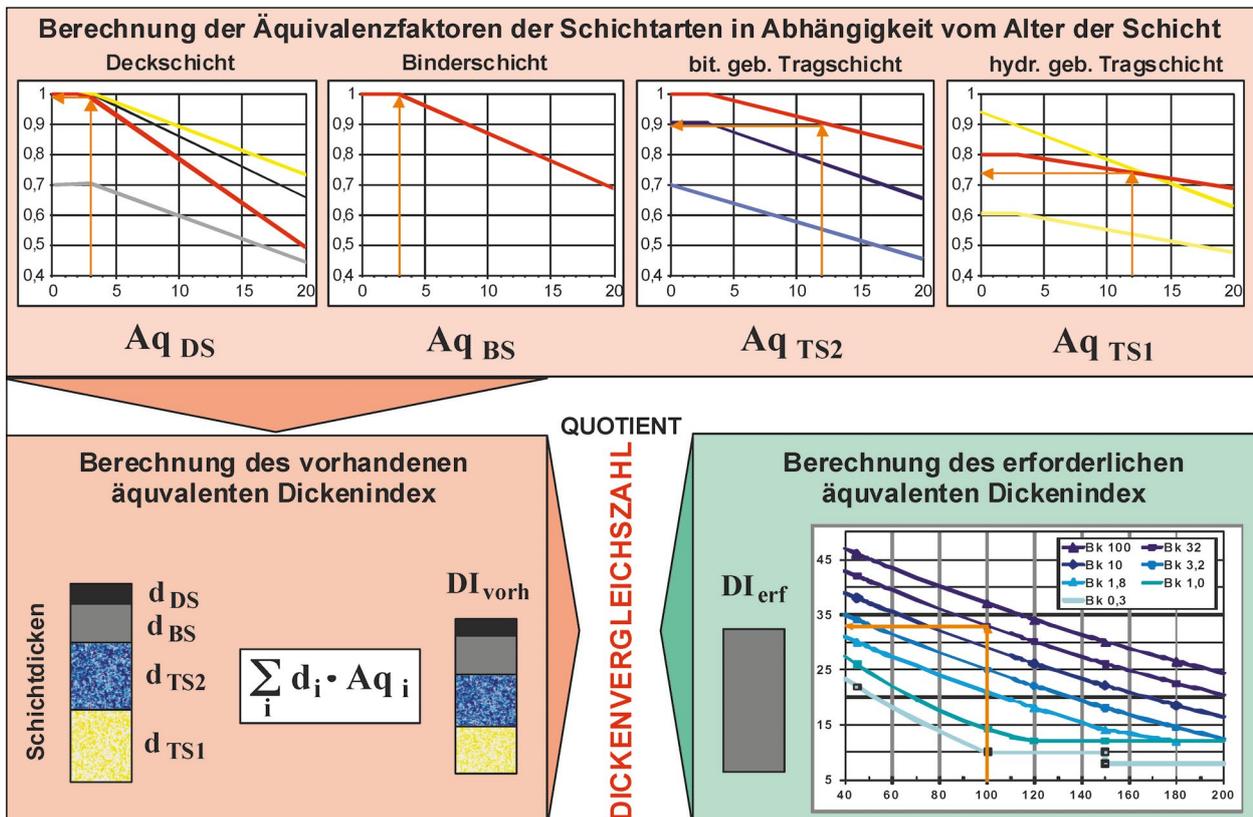


Bild 4: Berechnungsschema Substanzwert (Bestand), überarbeitet nach (KRAUSE 2017)

und der erforderlichen Dicke. Um die Dickenvergleichszahl (DVZ) den Zustandswerten der ZEB gegenüberzustellen und als Voraussetzung einer Verknüpfung mit dem Substanzwert (Oberfläche), muss die Dickenvergleichszahl in die Skala der Zustandswerte von 1,0 bis 5,0 transformiert werden. Die gültige Normierungsfunktion zur Überführung der Dickenvergleichszahl in einen (Zustands-)Wert für den Substanzwert (Bestand) ist in Bild 5 dargestellt.

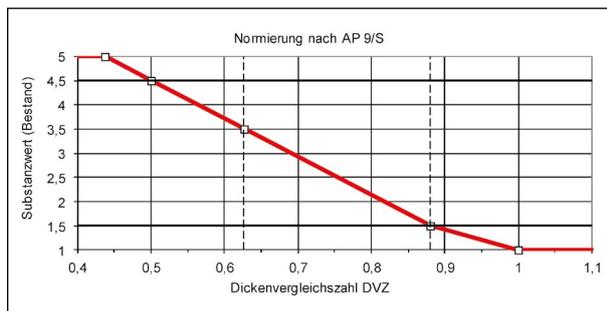


Bild 5: Normierungsfunktion für den Substanzwert (Bestand) nach (FGSV AP9/S 2019E)

Die äquivalenten Dicken der einzelnen Schichten einer neuwertigen Befestigung entsprechen im Regelfall den Dicken nach den RStO 12 mit einem maximalen Äquivalenzfaktor von 1,0 (Tabelle 3). Dünne Schichten aus I1-Maßnahmen (vgl. Bild 1) sowie alte oder überbaute Schichten in historisch gewachsenen Befestigungen erhalten geringere Äquivalenzfaktoren (Tabelle 3). Die anzusetzenden äquivalenten Dicken der Schichten verringern sich mit zunehmendem Alter. Gegen Ende der Nutzungsdauer erreicht der Äquivalenzfaktor einen Mindestwert (Tabelle 3), der nicht unterschritten wird, um ein gewisses verbleibendes Substanzpotenzial (SCHMUCK, HEHENBERGER 1993) zu berücksichtigen.

Die Berechnung der altersabhängigen äquivalenten Schichtdicken erfolgt mit linearen Funktionen der Form:

$$D_{Aq,i} = d_i * \text{MIN}(A_{qMax,i}; \text{MAX}(A_{qMin,i}; A_i - B_i * t_i)) \quad (1)$$

mit

Schichtart	Äquivalenzfaktoren		Koeffizienten	
	A_{qMax}	A_{qMin}	A	B
Gebundene Schichtarten				
Deckschicht Asphaltbeton	1,00	0,35	1,0263	0,0263
Deckschicht Splittmastixasphalt	1,00	0,35	1,0357	0,0357
Deckschicht offenporiger Asphalt	1,00	0,35	1,0556	0,0556
Deckschicht Gussasphalt	1,00	0,40	1,0192	0,0192
Makadam/Einstreudecken	0,70	0,25	0,7200	0,0200
Dünnschichtbelag heiß (DSH)/kalt (DSK)	0,80	0,35	0,8400	0,0400
Oberflächenbehandlung	0,60	0,25	0,6346	0,0423
Mikrobelag/bituminöse Schlämme	0,60	0,30	0,6346	0,0423
Pflaster (Groß-/Kleinpflaster)	1,00	0,50	1,0333	0,0167
Beton	1,00	0,50	1,0286	0,0143
Binderschicht	1,00	0,40	1,0400	0,0200
Asphalttragschicht, gebrochenes Korn	1,00	0,50	1,0200	0,0100
Asphalttragschicht allgemein, Rundkorn	0,95	0,45	0,9722	0,0112
Hydraulisch gebundene Tragschicht, gebrochenes Korn	0,54	0,33	0,5540	0,0070
Hydraulische Verfestigung, weit/intermittierend gestuft	0,33	0,17	0,3407	0,0053
Hydraulische Verfestigung, eng gestuft	0,23	0,12	0,2373	0,0037
überbaute Asphaltsschichten	0,80	0,35	0,8000	0,0114
überbautes Pflaster	0,85	0,20	0,8500	0,0250
überbauter Beton	0,85	0,22	0,8500	0,0250
überbauter Makadam	0,70	0,20	0,7000	0,0200

Tab. 3: Äquivalenzfaktoren und Koeffizienten der Abminderungsfunktionen in Abhängigkeit der Schichtart nach (FGSV AP9/S 2019E)

- d_i vorhandene Dicke der Schicht i
- $A_{qMax,i}$ maximaler Äquivalenzfaktor der Schicht i lt. Tabelle 3 [-]
- $A_{qMin,i}$ minimaler Äquivalenzfaktor der Schicht i lt. Tabelle 3 [-]
- A_i Koeffizient A für Schicht i lt. Tabelle 3 [-]
- B_i Koeffizient B für Schicht i lt. Tabelle 3 [-]
- t_i Alter der Schicht i [Jahre]

Die Summe der berechneten altersabhängigen äquivalenten Schichtdicken $D_{Aq,i}$ der jeweiligen Befestigung bildet den vorhandenen Dickenindex DI_{vorh} .

Die Ermittlung der erforderlichen äquivalenten Dicken erfolgt für Bauweisen mit Asphaltdecke gemäß der Formel:

$$DI_{erf,j} = A_j - B_j * E_{v2} + C_j * 10^{-4} * E_{v2}^2 \quad (2)$$

mit

- A_j Koeffizient A für Belastungsklasse j lt. Tabelle 4 [-]
- B_j Koeffizient B für Belastungsklasse j lt. Tabelle 4 [-]
- C_j Koeffizient C für Belastungsklasse j lt. Tabelle 4 [-]

E_{v2} E_{v2} -Wert auf der obersten ungebundenen Schicht [MN/m²]

Für Bauweisen mit Betondecke liegen lineare Funktionen zugrunde, sodass der Koeffizient C immer den Wert 0 annimmt und somit der letzte Term der Formel 2 entfallen kann.

Tabelle 4 beinhaltet die Koeffizienten zur Ermittlung von $DI_{erf,j}$. Bei sämtlichen Berechnungen sind als untere Grenzwerte für die erforderlichen äquivalenten Dicken die in den RStO 12 festgelegten unteren Grenzdicken zu berücksichtigen.

Der Quotient aus DI_{vorh} und DI_{erf} ergibt die Dickenvergleichszahl DVZ. Diese wird mit folgenden Gleichungen in den Substanzwert (Bestand) SW_B überführt:

für $DVZ \geq 1,0$: $SW_B = 1,0$

für $1,0 > DVZ \geq 0,88$: $SW_B = 5,16667 - 4,16667 * DVZ$

für $0,88 > DVZ \geq 0,4367$: $SW_B = 8,44737 - 7,89474 * DVZ$

für $DVZ < 0,4367$: $SW_B = 5,0$

Für die Anwendung im PMS wird der Substanzwert (Bestand) extern berechnet und als Eingangswert in Form einer Zustandsnote (Zustandswert) übergeben. Die Prognose erfolgt nicht durch jährliche Neuberechnung, da die erforderlichen Informationen zum Befestigungsaufbau (Schichtdaten) bisher nicht im PMS vorgehalten werden. Vielmehr wird innerhalb des PMS eine allgemeine Prognosefunktion zugrunde gelegt:

$$SW_B(t) = SW_{B0} + 0,0076 * t^{(1,7)} \quad (3)$$

mit

SW_{B0} Substanzwert (Bestand) zum Zeitpunkt der ZEB [-]

t Alter in Jahren seit der letzten Maßnahme [Jahre]

Der Substanzwert (Bestand) wird im PMS mit dem bei der ZEB berechneten Substanzwert (Oberfläche) zu einem Substanzrechenwert (PMS) verknüpft (FGSV AP9/S 2019E):

$$SRW_{PMS} = MAX (SW_B; SUB - A) + B * MIN (SW_B; SUB) - B \quad (4)$$

mit

SW_B Substanzwert (Bestand) nach AP 9/S [-]

SUB Substanzwert (Oberfläche) nach ZEB [-]

A 0,25

B 0,10

Belastungs- klasse	Koeffizient (Asphalt)			Koeffizient (Beton)	
	A	B	C	A	B
Bk 100	54,57	0,2019	2,54	43,30	0,09548
Bk 32	50,57	0,2019	2,54	42,30	0,09548
Bk 10	46,57	0,2019	2,54	41,30	0,09548
Bk 3,2	45,15	0,2244	3,17	40,30	0,09548
Bk 1,8	44,02	0,2389	3,38	38,30	0,09548
Bk 1,0	38,68	0,2049	2,70	33,80	0,10630
Bk 0,3	37,58	0,2858	5,67	-	-

Tab. 4: Koeffizienten zur Ermittlung der erforderlichen äquivalenten Dicken nach (FGSV AP9/S 2019E)

Derzeit ist das Verfahren zur Ermittlung des Substanzwertes (Bestand) nach dem AP 9/S (FGSV AP9/S 2003) in die Input/Output-Umgebung des PMS eingebunden. Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wird jedoch das in der Entwurfsfassung des AP 9/S (FGSV AP9/S 2019E) beschriebene Verfahren angewendet.

2.3.2 Kritische Betrachtung des AP 9/S

Das AP 9/S beschreibt die Substanz einer Fahrbahnbefestigung durch die Gegenüberstellung einer rechnerisch ermittelten äquivalenten Dicke für die vorhandene Schichtfolge mit der tatsächlich erforderlichen Dicke bzw. dem erforderlichen Dickenindex. Die äquivalente Dicke wird dabei basierend auf der Einbaudicke der jeweiligen Schichten und einem Dickenäquivalenzfaktor berechnet, wobei der Dickenäquivalenzfaktor abhängig vom Alter und Typ der Schicht ist.

Die Berechnung des Dickenäquivalenzfaktors erfolgt über eine lineare Funktion, wobei auf der Abszisse das Alter der Schicht aufgetragen ist. Insgesamt stehen je nach Schichttyp (vgl. Tabelle 3) 20 Formeln zur Berechnung des Dickenäquivalenzfaktors zur Verfügung. Der aus den entsprechenden Formeln errechnete Faktor wird dann mit der Einbaudicke der betrachteten Schicht multipliziert. Dieser Schritt wird für jede vorhandene Schicht durchgeführt und alle somit errechneten äquivalenten Dicken werden aufsummiert.

Die Berechnung des Dickenäquivalenzfaktors durch eine lineare Funktion bedeutet, dass ab einem bestimmten Schichtalter der Dickenäquivalenzfaktor theoretisch negativ werden könnte, was zu einer negativen äquivalenten Dicke der Schicht führen würde, bis hin zu einer negativen Dicke der gebundenen Schichten. Das AP 9/S geht jedoch davon aus, dass eine Schicht immer eine gewisse Resttragfähigkeit besitzt. Folglich wird für jeden Schichttyp ein maximaler und minimaler Dickenäquivalenzfaktor angeführt (vgl. Bild 6). Das bedeutet aber auch, dass sich die ermittelte äquivalente Dicke einer Schicht ab einem bestimmten Alter nicht mehr verringert. Würden auf der Straße Schichten mehrfach im Hocheinbau überbaut statt erneuert, stellt sich irgendwann eine äquivalente Dicke ein, die durch die erforderliche Dicke geteilt, eine Dickenvergleichszahl ergibt, die umgewandelt in den Substanzwert (Bestand) kleiner als 4,5 bleibt. Der Zustand einer ungenügenden Tragfähigkeit tritt in diesem Fall zum Berechnungszeitpunkt nicht auf. Eine

weitere Verschlechterung des Substanzwertes (Bestand) erfolgt dann erst im PMS mit beispielsweise der oben angegebenen Prognosefunktion (Formel 3). Je nach Altersverteilung kann dies im Einzelfall und vor allem auch bei nicht RStO-konformen Aufbauten, beispielsweise bei Verstärkungen im Hocheinbau, zu einer unrealistischen Einschätzung des Aufbaus führen. Weiter sind zwar schichtbezogen unterschiedliche Funktionen für den Verlauf der Äquivalenzfaktoren gegeben, diese berücksichtigen aber weder unterschiedliche Materialqualitäten, die auch bei nominell gleichen Schichtarten auftreten können, noch lokale Randbedingungen wie beispielsweise unterschiedliche Verkehrsbelastungen oder klimatische Verhältnisse.

Ein Beispiel, welches diese Problematik verdeutlicht, besteht auf der BAB A2 in Nordrhein-Westfalen zwischen den Netzknoten 4409124A und 4408119A (laufende ID-Nummer 134 der Abschnittfolgetabelle des synthetischen Analysenetzes (vgl. Kapitel 4.2.2 und 4.3.1)). Auf diesem Abschnitt ist gemäß den Angaben der Straßendatenbank der in Tabelle 5 gelistete Aufbau vorzufinden.

Für einen Aufbau der Belastungsklasse Bk 100 beträgt die auf Grundlage des AP 9/S berechnete erforderliche Dicke 26,5 cm. Die vorhandene Dicke des in Tabelle 5 dargestellten Aufbaus beträgt 46,0 cm und die äquivalente Dicke im Jahre 2018 20,5 cm. Die daraus resultierende Dickenvergleichszahl beträgt 0,776 und der daraus errechnete Substanzwert (Bestand) im Jahre 2018 2,3. Wird dann die Prognosefunktion (Formel 2) angesetzt, wird nach ca. weiteren 16 Jahren (2034) der Warnwert (3,5) und nach ca. 28 Jahren (2046) der Schwellenwert

Dicke der Schicht	Art der Schicht	Einbau der Schicht
3,5 cm	Gussasphaltdeckschicht	1987
8,5 cm	Asphaltbinderschicht	1987
14 cm	Asphalttragschicht, Rundkorn	1975
3,5 cm	Gussasphaltdeckschicht	1960
3,5 cm	Asphaltbinderschicht	1960
5,0 cm	Asphalttragschicht, Rundkorn	1960
3,0 cm	Asphaltdeckschicht	1937
5,0 cm	Asphalttragschicht, gebrochenes Korn	1937
40,0 cm	Packlage (angenommener E_{v2} -Wert = 180 MPa)	1937

Tab. 5: Aufbau BAB A2, NRW, zwischen Netzknoten 4409124A und 4408119A

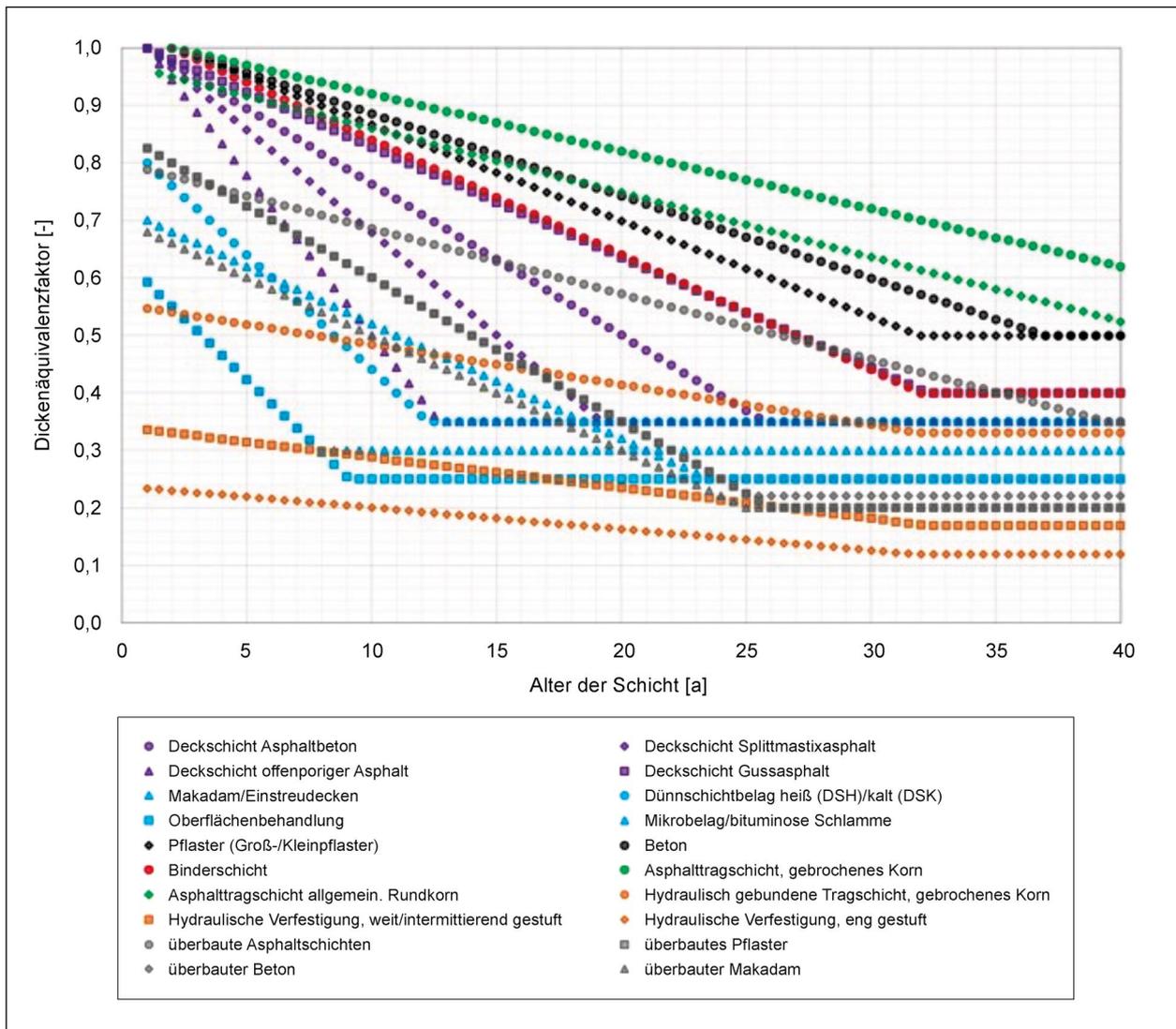


Bild 6: Berechnung der Dickenäquivalenzfaktoren für unterschiedliche Materialtypen über 40 Jahre, in Anlehnung an KRAUSE und MAERSCHALK (2014)

(4,5) erreicht. Da jedoch aufgrund der großen Anzahl an sich im Befestigungsaufbau befindlichen Schichten, welche nach dem Ansatz des AP 9/S stets eine gewisse Restsubstanz aufweisen, der Substanzwert (Bestand) ab dem Jahr 2022 bei 2,6 stagniert, werden in den darauffolgenden Jahren durch die Nutzung der Prognosefunktion standardmäßig 12 Jahre bis zum Erreichen des Warnwertes und 24 Jahre bis zum Erreichen des Schwellenwertes (4,5) prognostiziert.

Dieses Beispiel zeigt die grundlegende Problematik des AP 9/S auf. Trotz der derzeitigen Kritik bezüglich der Anwendbarkeit des AP 9/S muss darauf hingewiesen werden, dass nur durch die Berücksichtigung der AP 9/S Vorgaben im PMS eine ungünstige Maßnahmenverteilung mit überwiegend Instandsetzungen und wenig Erneuerungsmaßnahmen ver-

mieden werden kann. Insofern ist die Anwendung des Verfahrens für PMS-Rechnungen durchaus angezeigt, so lange die dargelegten Schwachstellen nicht durch ein verbessertes Verfahren ausgeräumt werden können.

2.3.3 Bewertung der strukturellen Substanz nach den RSO Asphalt 14

„Die [...] [Richtlinien für die Bewertung der strukturellen Substanz des Oberbaus von Verkehrsflächen in Asphaltbauweise, RSO Asphalt 14' (FGSV RSO Asphalt 2014E),] regeln die Bewertung der strukturellen Restsubstanz des Oberbaus von Verkehrsflächen in Asphaltbauweise, die nach Tafel 1 der Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO) [(FGSV RStO 2012)] oder

vorzugsweise nach den Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht (RDO Asphalt) [(FGSV RDO Asphalt 2009)] dimensioniert wurden. Sie können für Oberbauten anderer Verkehrsflächen aus Asphalt sinngemäß angewendet werden.“ (FGSV RSO Asphalt 2014E)

„Die Substanzbewertung nach den RSO Asphalt dient der Bestimmung des Ausfallzeitpunktes von Asphalttragschichten auf Objektebene. Daraus kann eine Erhaltungsplanung für die gesamte Asphaltbefestigung eines Streckenabschnitts abgeleitet werden. Die Ergebnisse der Substanzbewertung dienen somit als Grundlage für die Entscheidung, ob ein unter Verkehr liegender gebundener Oberbau von Verkehrsflächen erhalten oder erneuert werden sollte. Hierbei werden die Schicht- und Baustoffeigenschaften des Oberbaus, deren bisherige Nutzungsdauer verbunden mit der bereits ertragenen Verkehrsbelastung sowie die klimatischen Bedingungen berücksichtigt.“ (FGSV RSO Asphalt 2014E)

„Voraussetzung für die Substanzbewertung nach den RSO Asphalt ist ein Zustand der Befestigung, der eine Entnahme von rissfreien Bohrkernen aus allen zu untersuchenden Asphalttschichten des Oberbaus zulässt. Die Ergebnisse der Substanzbewertung gelten zudem nur für einen näherungsweise strukturell homogenen Streckenabschnitt innerhalb des betrachteten Streckenabschnitts mit den dort herrschenden Randbedingungen (Aufbau, Temperatur- und Verkehrsbelastung u. Ä.).“ (FGSV RSO Asphalt 2014E)

„Die RSO Asphalt wurden vornehmlich für den Bereich der Erhaltungsplanung für einen konkreten Streckenabschnitt erarbeitet. Für eine Substanzbewertung nach den RSO Asphalt als Grundlage für eine Übergabe, Verfolgung der Entwicklung der strukturellen Substanz während der Nutzungsdauer und Abnahme sind erst bei Vorliegen eines ausreichenden Bewertungshintergrunds gegebenenfalls entsprechende vertragliche Regelungen zu erarbeiten.“ (FGSV RSO Asphalt 2014E)

Naturgemäß kann eine Prognose im Sinne einer Substanzbewertung „keine exakten Ergebnisse liefern und wird in ihrer Genauigkeit von der Qualität der Eingangsdaten und der Länge des Prognosezeitraums erheblich beeinflusst. Das in dieser Richtlinie vorgestellte Verfahren zur Bewertung der strukturellen Substanz stellt das Vorgehen dar, das nach

aktuellem Wissensstand die genauesten Ergebnisse erwarten lässt.“ (FGSV RSO Asphalt 2014E)

2.3.4 Kriterien für die Substanzbewertung nach den RSO Asphalt 14

„Das Verfahren zur Bewertung der strukturellen Substanz basiert auf den theoretischen Ansätzen der RDO Asphalt. Sie bezieht sich in ihrer Bewertung auf den Asphalt oberbau, wobei sowohl tiefer liegende im Aufbau verbleibende Schichten als auch der Unterbau/Untergrund hinsichtlich ihres aktuellen Zustands erfasst und in der Substanzbewertung durch entsprechende Materialkennwerte angesetzt [...] werden. Die im Zuge einer anstehenden Baumaßnahme nicht im Aufbau verbleibenden Asphalttschichten bleiben dabei hinsichtlich ihrer Materialkennwerte unberücksichtigt.“ (FGSV RSO Asphalt 2014E)

„Die strukturelle Substanz wird an allen maßgebenden Nachweispunkten rechnerisch auf der Grundlage von Versuchsergebnissen (Erreichen des Grenzzustands der Tragfähigkeit (GZT)) und durch eine Kalibrierung dieses Ergebnisses am bestehenden Erfahrungshintergrund auf den Ausfallzeitpunkt der Gesamtbefestigung übertragen. Damit wird das Erreichen eines Grenzzustands der Gebrauchstauglichkeit (GZG) definiert. Die so ermittelte strukturelle Substanz entspricht der Anzahl an errechneten Achsübergängen (beispielsweise 10-t-Achsübergängen), die der Asphalt oberbau zum Bewertungszeitpunkt für festgelegte Verkehrs- und Temperaturprognosewerte bis zum Ausfall des Asphalt oberbaus ertragen kann.“ (FGSV RSO Asphalt 2014E)

„Maßgebend sind i. d. R. Nachweispunkte in der Lastachse an der Unterseite der Schichten/Lagen des Asphalt oberbaus, die nicht im Verbund zu einer unter ihr liegenden Schicht/Lage stehen (Nachweis anhand der Anforderungen hinsichtlich des Schichtenverbunds gemäß den ZTV Asphalt-StB [(FGSV ZTV Asphalt 07/13)]. Sollten die Berechnungen ergeben, dass zusätzlich zu den benannten auch in weiteren Punkten der Befestigung hohe Biegezugbeanspruchungen festzustellen sind, ist auch dort die strukturelle Substanz zu bestimmen. Der Nachweispunkt mit der ermittelten geringsten Zahl an ertragbaren Achsübergängen (strukturellen Substanz) ist maßgebend für die Festlegung des Erreichens des GZG des Asphalt oberbaus.“ (FGSV RSO Asphalt 2014E)

„Wird die Bewertung der strukturellen Substanz an einer Befestigung durchgeführt, die auf eine oder mehrere bereits bestehende Asphalt-schichten aufgebaut wurde, ist anhand des Zustands festzulegen, ob die im Aufbau verbliebenen Schichten als Asphalt-schichten oder Schichten ohne Bindemittel in Ansatz gebracht werden.“ (FGSV RSO Asphalt 2014E)

„Für die Bewertung der Substanz wird die Einhaltung der Dicke des frostsicheren Oberbaus nach dem Verfahren der RStO [12] für den zurückliegenden und den prognostizierten Nutzungszeitraum vorausgesetzt. Besitzt der zu bewertende Oberbau keine entsprechende frostsichere Gesamtdicke, sind sinnvolle Annahmen zu den Tragfähigkeits-schwankungen des Untergrundes/Unterbaus während der Frost-Tauperiode zu berücksichtigen [...]. Für die Anwendung des Verfahrens der Substanzbewertung werden neben den Materialkennwerten die Dicken und das Alter der Schichten, die Tragfähigkeit der Tragschichten ohne Bindemittel und des Planums sowie die Verkehrsbelastung der zu bewertenden Straßenbefestigung benötigt.“ (FGSV RSO Asphalt 2014E)

2.3.5 Verfahren zur Bewertung der strukturellen Substanz

„Die Vorgehensweise bei der Bewertung der strukturellen Substanz bis hin zu einer in Zukunft vorgesehenen monetären Bewertung der Straßenbefestigung ist in Bild 7 schematisch dargestellt. Die Schrittfolge ist wie folgt zu beschreiben:

- Ermittlung von Aufbau- und Belastungsdaten [...] [(RSO Asphalt Kapitel 4.2)].
- Definition von strukturell homogenen Abschnitten aufgrund bestehender Randbedingungen der Strecke und des Aufbaus sowie auf der Grundlage von Dicken- und gegebenenfalls Tragfähigkeitsmessungen [...] [(RSO Asphalt Kapitel 4.3)].
- Ermittlung der relevanten Materialparameter aller im Oberbau verbleibenden Schichten [...] [(RSO Asphalt Kapitel 4.4)].
- Durchführung des Verfahrens der Substanzbewertung [...] [(RSO Asphalt Kapitel 4.5)].
- Ergebnisermittlung der strukturellen Substanz der zu bewertenden Straßenbefestigung [...]

[(RSO Asphalt Kapitel 4.6)]“. (FGSV RSO Asphalt 2014E)

„Auf der Grundlage der bewerteten strukturellen Substanz kann bei Verfügbarkeit abgesicherter Kostendaten eine monetäre Bewertung der Straßenbefestigung vollzogen werden. Grundsätzlich kann die Bewertung der strukturellen Substanz mit

- dem deterministischen Verfahren oder
- dem probabilistischen Verfahren

durchgeführt werden. Das deterministische Verfahren liefert Aussagen zur Restsubstanz bzw. Restnutzungsdauer auf der Grundlage von Mittelwerten für die Eingangsparameter. Die Probennahme sollte verteilt über den gesamten strukturell homogenen Abschnitt erfolgen und die relevanten Eingangsparameter (Schichtdicken, Materialparameter) an den entnommenen Probekörpern bestimmt werden. Die Berechnungen werden zunächst mit den Mittelwerten der Eingangsparameter ohne Berücksichtigung der Streuung dieser durchgeführt. Die strukturelle Restsubstanz bzw. Restnutzungsdauer wird dann unter Berücksichtigung eines Sicherheitsbeiwertes berechnet, welcher die Streuung der Eingangsparameter und die Unsicherheit des Berechnungsverfahrens summarisch berücksichtigt.“ (FGSV RSO Asphalt 2014E)

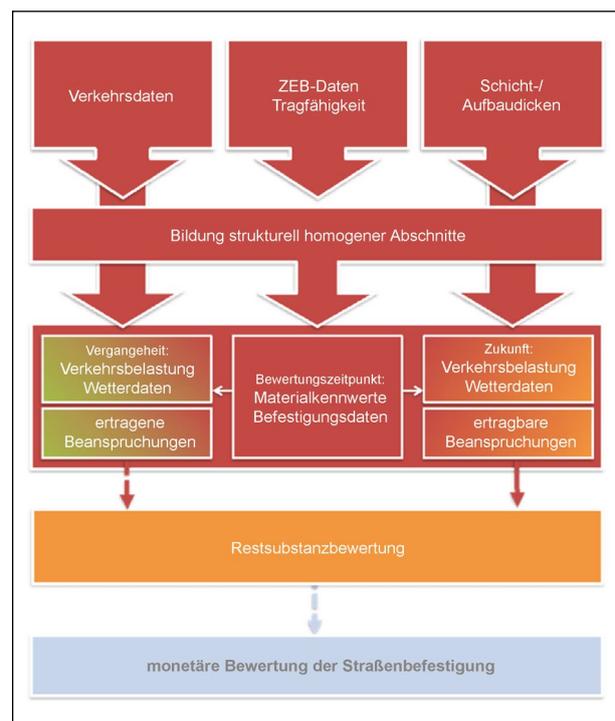


Bild 7: Ablaufschema zur Substanzbewertung von Asphaltbefestigungen (FGSV RSO Asphalt 2014E)

„Beim probabilistischen Verfahren werden die Proben ebenfalls verteilt über den gesamten strukturell homogenen Abschnitt entnommen. Die Dicken- und Materialschwankungen werden im Rahmen der Berechnung zur Bewertung der strukturellen Substanz jedoch berücksichtigt. Nach dem probabilistischen Verfahren können wahlweise eine Ausfallwahrscheinlichkeit des strukturell homogenen Abschnitts für eine zuvor festgelegte Restsubstanz bzw. Restnutzungsdauer oder – wie in den [...] [RSO Asphalt] vorgesehen – für eine definierte Ausfallwahrschein-

lichkeit eine resultierende Restsubstanz bzw. Restnutzungsdauer berechnet werden. Der Sicherheitsbeiwert dient hier nur noch der Berücksichtigung der Unsicherheiten des Berechnungsverfahrens.“ (FGSV RSO Asphalt 2014E)

2.3.6 Vergleichende Bewertung der vorhandenen Verfahren

Nachfolgend sind die wesentlichen Merkmale der beiden Verfahren im Vergleich dargestellt:

AP 9/S	RSO Asphalt
Prinzipielle Funktionsweise	
Die Berechnung des Substanzwertes mit dem AP 9/S basiert auf der Annahme, dass sich die Tragfähigkeit der Schichten altersabhängig verschlechtert, was durch eine kleinere äquivalente Dicke gegenüber der erforderlichen Aufbaudicke ausgedrückt wird.	Die Bewertung der Struktur basiert nach den RSO Asphalt auf dem prüftechnisch bestimmten materialspezifischen Steifigkeits- und Ermüdungsverhalten der in einer Straßenbefestigung eingebauten Materialien anhand von aus der vorbelasteten Befestigung entnommenen Bohrkernen.
Wesentliche Eingangsdaten	
Konstruktionsaufbau <ul style="list-style-type: none"> • Alter der Schichten • Dicke der Schichten • Material der Schichten • E_{v2}-Wert der ersten ungebundenen Schicht Verkehrsbelastung <ul style="list-style-type: none"> • Belastungsklasse zur Berechnung der erforderlichen Dicke 	Konstruktionsaufbau <ul style="list-style-type: none"> • Materialart • Schichtdicken/-schwankungen gemäß Bohrkern • Verbundzustand gemäß Bohrkern • E_{v2}-Werte ungebundene Schichten Materialkennwerte für alle Schichten <ul style="list-style-type: none"> • Querdehnung • Steifigkeit • Ermüdung • Tieftemperaturverhalten Beanspruchung aus Verkehr und Temperatur <ul style="list-style-type: none"> • $DTV^{(SV)}$ und f-Faktoren ($f_2...f_3...$) • Achslastverteilung • Temperaturbelastung Klimadaten (Klimazone) <ul style="list-style-type: none"> • Oberflächen-/Tiefentemperaturen
Mögliche Ausgabedaten	
<ul style="list-style-type: none"> • Zustandswert (Substanzwert (Bestand)) zu einem bestimmten Zeitpunkt • Prognose des Substanzwertes mithilfe einer Verhaltensfunktion im PMS (nicht Bestandteil des AP 9/S) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ermüdungsstatus (bezogen auf die angesetzte Nutzungsdauer) • Restnutzungsdauer/Ausfallzeitpunkt • Ausfallwahrscheinlichkeit (beim probabilistischen Verfahren) einer Straßenbefestigung in Abhängigkeit der in Anwendung gebrachten Eingangsdaten
Vorteile der Verfahren	
<ul style="list-style-type: none"> • Zerstörungsfreie Methode • Netzweite Beurteilung und PMS-Anwendung möglich • Vergleichbarkeit bei Netzbetrachtungen gewährleistet • Datenanforderungen orientieren sich an den in den Straßendatenbanken gespeicherten Informationen • Verfahren erprobt 	<ul style="list-style-type: none"> • Berücksichtigung örtlicher Gegebenheiten (Verkehrsbelastung, klimatische Bedingungen) • Einbeziehung realer maßgebender Materialkennwerte, keine Verallgemeinerung über Materialart • Berechnung Ermüdungszustand/Restnutzungsdauer/Ausfallzeitpunkt/etc. nicht von Verhaltensfunktion abhängig • Anwendung auf Objektebene möglich

AP 9/S	RSO Asphalt
Nachteile der Verfahren	
<ul style="list-style-type: none"> • Nicht geeignet für eine objektbezogene Betrachtung • Keine Ermittlung von Restnutzungsdauern im Rahmen von ÖPP-Projekten möglich • Materialkennwerte und Ermüdungsfunktionen werden nicht berücksichtigt • Wesentliche Einflussgröße ist das Alter und nicht die Verkehrsbelastung • Ergebnisse von Aufbauten mit großen Dicken werden möglicherweise dadurch verfälscht, dass immer ein Mindestdickenäquivalenzfaktor angenommen wird 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine zerstörungsfreie Methode • Geeignete Laborgeräte und Prüfmaschinen werden benötigt • Zeit- und kostenintensiv • Netzweite Anwendung und damit eine Anwendung im PMS nach aktuellem Stand nicht möglich

2.4 Strukturelle Bewertung und Nutzung in Erhaltungssystemen im Ausland

2.4.1 Tragfähigkeit und Substanz im österreichischen PMS

Das in Österreich eingesetzte Pavement Management System beinhaltet eine Substanzbewertung zur Ermittlung einer Zustandsgröße Tragfähigkeit und zur Abschätzung der zu einem bestimmten Zeitpunkt zulässigen äquivalenten 10-t-Achsübergänge (Normlastwechsel).

Die Methodik ist im „Handbuch Pavement Management in Österreich“ (WENINGER-VYCUDIL et al. 2009) beschrieben und wurde speziell für die Verwendung im PMS entwickelt. Zur Beurteilung der Substanz sind demnach folgende Verfahrensschritte auszuführen:

1. Ermittlung des Verkehrsbelastungskoeffizienten als Quotient aus zulässiger Verkehrsbelastung (Normlastwechsel) zum Zeitpunkt $t = 0$ und vorhandener bzw. prognostizierter Verkehrsbelastung innerhalb der Bemessungsperiode. Die zulässigen Normlastwechsel werden für Betonbefestigungen direkt als Funktion der Dicke der Betondecke und für Asphaltbefestigungen über eine Tragfähigkeitszahl berechnet. Letztere ergibt sich aus der Summe der Dicken der vorhandenen Schichten multipliziert mit dem Schichtkoeffizienten für die jeweilige Schicht.
2. Berechnung der Zustandsgröße Tragfähigkeit auf Basis des aktuellen Jahres, eines rechnerischen Oberbaujahres und des Verkehrsbelastungskoeffizienten. Die Zustandsgröße wird mit einer Normierungsfunktion in den Substanzwert „theoretische Tragfähigkeit“ überführt.

3. Die zulässigen Normlastwechsel zu einem beliebigen Zeitpunkt t können mithilfe eines Reduktionsfaktors auf Basis der Zustandsgröße Tragfähigkeit zum Zeitpunkt t ermittelt werden. Die zur Berechnung der Tragfähigkeitszahl bei Asphaltbefestigung verwendeten Schichtkoeffizienten sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Bild 8 zeigt ein Schema zur Ermittlung des Verkehrsbelastungskoeffizienten VBI.

Für die Berechnung der Zustandsgröße Tragfähigkeit im österreichischen PMS dient neben dem Verkehrsbelastungskoeffizienten das rechnerische Oberbaujahr J_{rechn} als Eingangswert. Dieses theoretische Herstellungsjahr resultiert nach WENINGER-VYCUDIL et al. (2009) für Asphaltbefestigungen aus den dickengewichteten Einbaujahren der direkt aufeinander folgenden gebundenen Schichten. Bei Beton wird es mit dem Herstellungsjahr der obersten Schicht der Betondecke gleichgesetzt. Die Zustandsgröße der sogenannten theoretischen Tragfähigkeit wird mit folgender Formel berechnet:

$$ZG_{\text{Tragf}} = K_{\text{Tragf}} \cdot \text{EXP}[-3,6017 + A \cdot (J_{\text{akt}} - J_{\text{rechn}}) + \text{LN}(J_{\text{akt}} - J_{\text{rechn}} + 0,01)] / \text{VBI} \quad (5)$$

mit

K_{Tragf} Kalibrierfaktor Zustandsgröße Tragfähigkeit (Standardwert = 1)

A Koeffizient A (Beton A = 0,075; Asphaltbefestigungen A = 0,15)

J_{akt} aktuelles Jahr der Analyse (Kalenderjahr) zum Zeitpunkt t

J_{rechn} rechnerisches Oberbaujahr

Der Kalibrierfaktor für die Zustandsgröße Tragfähigkeit wird im Regelfall mit dem Standardwert besetzt.

Jedoch können im Einzelfall zur Ermittlung eines spezifischen Kalibrierfaktors zusätzliche Tragfähigkeitsuntersuchungen, zum Beispiel FWD Messungen oder Bohrkernanalysen, herangezogen werden. Detaillierte Ausführungen hierzu finden sich in WENINGER-VYCUDIL et al. (2009).

Die Normierung zur Überführung der Zustandsgröße theoretische Tragfähigkeit in den Substanzwert Tragfähigkeit SI_{Tragf} erfolgt mit einer linearen Funktion:

$$SI_{Tragf} = \text{MAX}(1, 0; \text{MIN}(5, 0; 1, 0 + 0, 35 * ZG_{Tragf})) \quad (6)$$

Zur Ermittlung der noch zulässigen Normlastwechsel zum Zeitpunkt t wird aus der Zustandsgröße der theoretischen Tragfähigkeit zum Zeitpunkt t (J_{akt}) ein Reduktionsfaktor Tragfähigkeit R_{Tragf} berechnet. In Analogie zu Bild 8 ergeben sich nachfolgende Berechnungsformeln.

Für Asphaltbefestigungen:

$$NLW_{zul,t} = 0,0000046996 * \text{EXP}(0,8774 * TZ_0 * R_{Tragf}) \quad (7)$$

Schichtart	Schichtmaterial	Schichtkoeffizient
Deckschicht	Asphaltbeton, Dünnschichtdecke etc.	0,40
	Splitt-Mastix-Asphalt, Gussasphalt	0,42
bituminös geb. Tragschicht	Asphalttragschicht	0,40
	Asphalttragschicht hochstandfest	0,42
hydraulisch geb. Tragschicht	-	0,24
ungebundene Tragschicht	gebrochenes Korn	0,14
	Mischkörnung	0,12
	Rundkorn	0,10
	zentralgemischt Brechkorn, Recyclingmaterial	0,20
Frostschuttschicht	-	0,08
Untergrundtragfähigkeitskoeffizient UGK (Standardwert)		2,40

Tab. 6: Schichtkoeffizienten zur Berechnung der Tragfähigkeitszahl nach WENINGER-VYCUDIL et al. (2009)

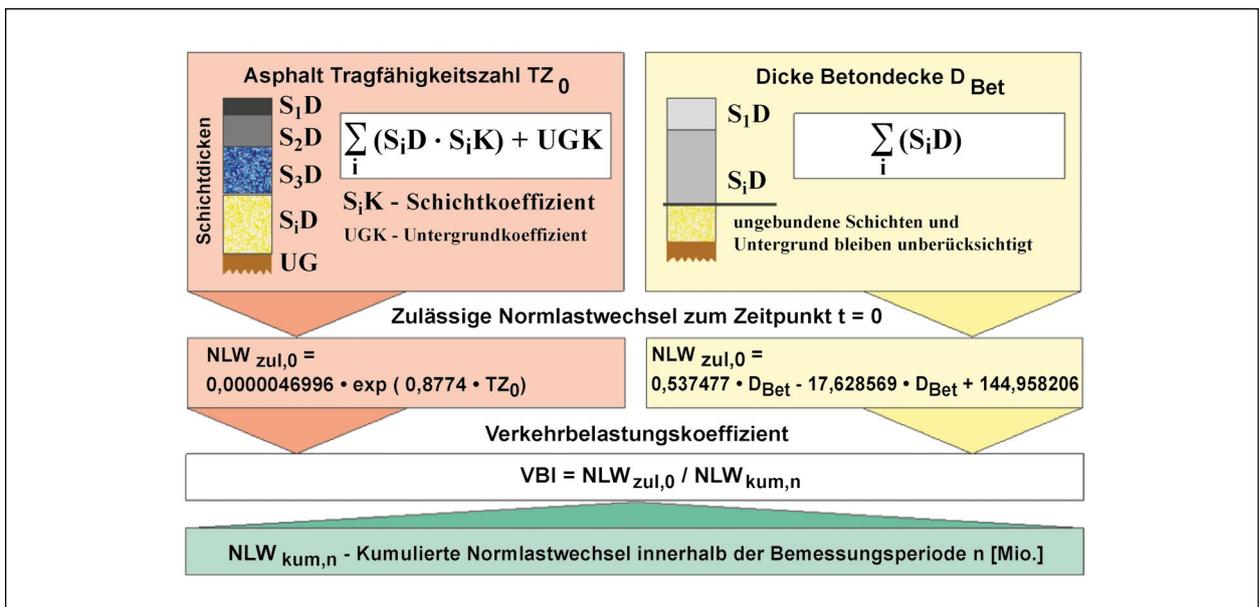


Bild 8: Methodik zur Ermittlung des Verkehrsbelastungskoeffizienten; eigene Darstellung auf Grundlage von WENINGER-VYCUDIL et al. (2009)

Für Betondecken:

$$\begin{aligned} NLW_{zul,t} = & 0,537477 * (D_{Bet} * R_{Tragf})^2 - \\ & - 17,628569 * (D_{Bet} * R_{Tragf}) \\ & + 144,958206 \end{aligned} \quad (8)$$

Der Substanzwert „theoretische Tragfähigkeit“ wird mit dem aus dem Oberflächenzustand berechneten Substanzwert Decke SI_{Decke} zu einem Substanzwert (Gesamt) verknüpft:

$$\begin{aligned} SI = & MAX(0, 89 * SI_{Tragf}, SI_{Decke}) \\ & + 0, 1MIN(0, 89 * SI_{Tragf}, SI_{Decke}) - 0, 1 \end{aligned} \quad (9)$$

Die aktuellen Entwicklungen zur Berechnung des Substanzwertes „Decke“ und zur Integration der Methodik in das österreichische PMS sind in dem Schlussbericht des ELISA^{ASFINAG} Projektes beschrieben (WENINGER-VYUCUDIL et al. 2014).

Vorteile
<ul style="list-style-type: none"> • Methodik basiert auf den im Regelfall verfügbaren Informationen zum Befestigungsaufbau und zur Verkehrsbelastung • Möglichkeit der netzweiten Beurteilung der Substanz im PMS • Keine zerstörenden Prüfungen zur Ermittlung der Berechnungseingangswerte erforderlich • Kalibrierung über zusätzliche Tragfähigkeitsuntersuchungen (zum Beispiel FWD Messungen) möglich • Bei fehlenden Detailinformationen zum Befestigungsaufbau ist die Berechnung mithilfe von Schätzwerten möglich
Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Verfahren beruht auf der Verwendung allgemeiner Informationen zum Schichtaufbau und -alter • Berechnung der zulässigen Normlastwechsel (äquivalente 10-t-Achsübergänge) erfolgt auf Basis der vorhandenen Schichtdicken • Keine Berücksichtigung von Materialkennwerte und Ermüdungsfunktionen

2.4.2 Erhaltungsmanagement in Frankreich

In Frankreich wird jedes Jahr ein Drittel des gesamten Straßennetzes erfasst. Die dabei erfassten Informationen sind neben klimatischen Bedingungen und Lokalisierung:

- Deflektionen (Steifigkeit der Struktur),
- Oberflächenschäden: Risse (Längs-, Quer-, Netz- und sonstige Risse sowie Risse in Betonplatten), Ausbrüche und Bindemittelanreicherungen, Flickstellen, Längsfugen und Längsnähte,

- Querunebenheiten (Spurrinnen),
- Griffigkeit (mit Rugolaser).

Für jeden dieser Faktoren wird die betroffene Fläche in Prozent bestimmt. Basierend auf diesen Ergebnissen werden zwei Zustandswerte bestimmt:

- N_s : „Note de surface“ – Zustandswert der Oberfläche; Zur Bildung dieses Wertes werden die Oberflächenschäden, die Querunebenheiten sowie die Griffigkeit betrachtet.
- N_p : „Note patrimoine“ – Zustandswert Bestand; Zur Bildung dieses Wertes werden die Oberflächenschäden sowie die Deflektionen betrachtet.

Beide Zustandswerte sind Indikatoren für den finanziellen Wert der Straße und haben einen Wert zwischen 0 und 20, wobei 20 bedeutet, dass keine Erhaltungsmaßnahmen notwendig sind, 0 bedeutet hingegen, dass die größtmöglichen Maßnahmen auf der Strecke anzuwenden sind.

Die Noten werden berechnet, indem zuerst bestimmt wird, mit welcher Baumaßnahme ein bestimmter Referenzzustand erreicht werden könnte und wieviel diese Maßnahme kosten würde. Der zweite zu bestimmende Wert ist der Kostenaufwand, der für die größtmögliche Erhaltungsmaßnahme aufzuwenden wäre, um den Referenzzustand wieder zu erreichen. Die größtmögliche Erhaltungsmaßnahme zum Erreichen des Referenzzustands für den Zustandswert Oberfläche N_s ist nach SETRA (2000) der Einbau einer 4 cm dicken Asphaltdeckschicht (beton bitumineux semi-grenu). Die größtmögliche Erhaltungsmaßnahme zum Erreichen des Referenzzustands für den Zustandswert Bestand ist der Einbau von 20 cm Asphalttragschicht und 8 cm Asphaltdecke (20 cm grave bitume und 8 cm beton bitumineux semi-grenu).

Zur Bestimmung der Zustandswerte dienen die nachfolgenden Formeln:

$$N_s = 20 * (1 - C_s/C_{s,max}) \quad (10)$$

$$N_p = 20 * (1 - C_p/C_{p,max}) \quad (11)$$

mit

C_p und C_s Kosten der nötigen Erhaltungsmaßnahmen, um einen Referenzzustand zu erreichen

$C_{p,max}$ und $C_{s,max}$ Kosten für die größtmöglichen Baumaßnahmen

Auf Grundlage von N_s und N_p wird ein globaler Zustandswert N_g (note globale) gebildet, welcher am Ende jeden Jahres an die Straßenämter der Departements geschickt wird. Eine Interpretation des globalen Zustandswertes wird unter zwei Perspektiven durchgeführt. Zum einen wird der Mittelwert des globalen Zustandswertes eines Departements den globalen Zustandswerten ganz Frankreichs gegenübergestellt. Ein Departement mit einem Mittelwert von zwei Punkten unter dem Nationaldurchschnitt weist einen beachtlichen Erhaltungsbedarf auf. Zum anderen kann durch die Gegenüberstellung der Zustandswerte einer Straße über die Zeit die Entwicklung der Struktur verfolgt werden. Dabei sollte die Verschlechterung des Zustandswertes möglichst klein bleiben. Bei großen Sprüngen nach unten muss erfahrungsgemäß von strukturellen Schäden in der Befestigung einer Straße ausgegangen werden. (SETRA 2000)

Vorteile
<ul style="list-style-type: none"> • Turnusmäßig durchgeführte Bestimmung der Zustandswerte (alle 3 Jahre) auf allen Straßen Frankreichs ist ein guter Indikator, um den Zustand des Straßennetzes zu charakterisieren, seine Entwicklung zu verfolgen und die Wirkung des Erhaltungsmanagements zu messen • Angewendete Methode bietet die Möglichkeit eines zustandsabhängigen Finanzmitteleinsatzes
Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Turnusmäßige Zustandserfassung und anschließende Auswertung der Erfassungsdaten kann womöglich zu unnötig hohen Ausgaben führen

3 Grundlagen zur Berücksichtigung der RSO Asphalt in einem PMS

3.1 Ableitung eines PMS-Modells zur generellen Einbindung der RSO Asphalt

Im derzeitigen PMS werden als Kriterium für die Bewertung der Substanz eines Befestigungsaufbaus die nach dem AP 9/S ermittelten Berechnungsergebnisse verwendet. Grundgedanke des vorliegenden Forschungsauftrages ist es, das Verfahren des AP 9/S durch das Bewertungsverfahren der RSO Asphalt zu ersetzen. Ausgehend von den bisherigen Erkenntnissen müssen dabei folgende Grundanforderungen im gesamten Verfahrensablauf, also die Schritte von der Datenhaltung über die Da-

tenaufbereitung bis hin zur eigentlichen PMS Berechnung (Bild 2), berücksichtigt werden:

- In der Datenbank müssen abschnittsbezogen zusätzlich zu den Aufbaudaten auch materialbezogene Daten für Asphaltbefestigungen vorgehalten werden. Umfang und Detaillierungsgrad wird in den nachfolgenden Arbeitsschritten spezifiziert werden.
- Bei der Bewertung der Berechnungsergebnisse, ermittelt auf der Grundlage der RSO Asphalt, muss ein Bewertungshintergrund aufgestellt werden, der im Idealfall der Wertesynthese der ZEB entspricht. Dies hängt im Detail jedoch von der tatsächlichen Integration der RSO Asphalt in den gesamten Berechnungsablauf ab, der aber nicht zwingend analog zum bisherigen Berechnungsablauf sein muss.
- Das Verfahren muss in den Berechnungsablauf des PMS integriert werden. Dazu sind die zwei nachfolgenden Wege möglich:
 - (1) Direkter Ersatz des AP 9/S durch die RSOAsphalt (Variante I)
 - (2) Erweiterter Berechnungsansatz mit einem parallel arbeitenden Substanzmodul (Variante II)

Beide Anwendungsfälle erfordern hinsichtlich der Anforderungen an die Eingangsdaten, bezogen auf die Anwendung der RSO Asphalt, die gleiche Erweiterung der Datenbasis auf der Seite der Datenverwaltung. Im Wesentlichen müssen die in Kapitel 2.3.6 genannten Eingangsdaten vorliegen.

Der erste Anwendungsfall geht davon aus, dass das AP 9/S direkt ersetzt wird (Bild 9). Das derzeitige Programm PMS-I/O kann dies ohne Programmweiterung nicht leisten, sodass aktuell wie folgt vorgegangen werden müsste:

1. Die abschnittsbezogenen Daten werden in AD-toPave übernommen und es wird abschnittsweise die jeweilige Restnutzungsdauer des Aufbaus nach den RSO Asphalt berechnet. Als Ergebnis wird eine abschnittsbezogene Datei erstellt, die die wesentlichen Kenngrößen zur Substanzbewertung enthält.
2. Die abschnittsbezogene Datei mit der Substanzbewertung wird in PMS-I/O übernommen, dort wird der Substanzwert (RSO Asphalt) berechnet und die gesamten Daten analog zum bisherigen Verfahren weiterverarbeitet.

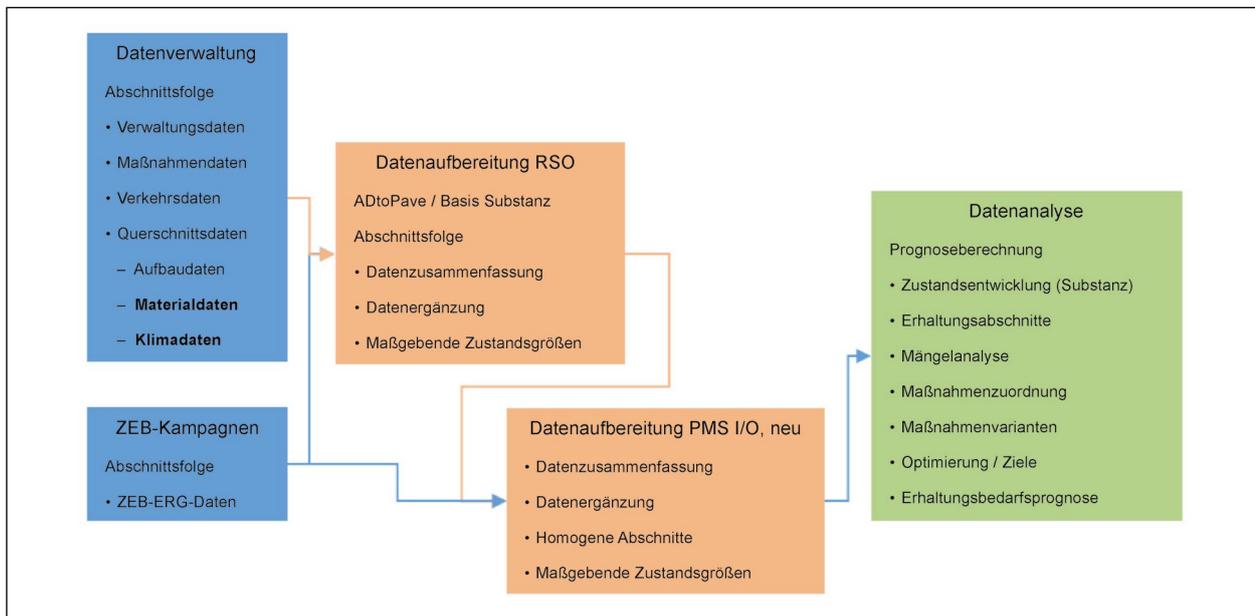


Bild 9: Struktur des Erhaltungsmanagements mit direkter Einbindung der RSO Asphalt/Variante I, überarbeitet und ergänzt in Anlehnung an STÖCKERT (2018)

3. Im Rechenalgorithmus des PMS müssten an verschiedenen Stellen Änderungen und/oder Modifikationen durchgeführt werden. Dies betrifft in erster Linie die Beschreibung der Zustandsentwicklung für den Substanzwert (RSO Asphalt) sowie darauf aufbauend Modifikationen bei der Maßnahmenzuordnung, den Maßnahmenvarianten und der Optimierung.

Der zweite Anwendungsfall geht von einer getrennten Berechnung bis auf die Ebene der späteren Erhaltungsabschnitte aus, sodass zum einen eine Bedarfsanalyse von Erhaltungsabschnitten aufgrund des Oberflächenzustandes und zum anderen eine Bedarfsanalyse von Erhaltungsabschnitten auf der Basis des Substanzwertes (Aufbau) erfolgt (Bild 10). Damit wird sowohl der Erhaltungsbedarf auf der Grundlage des Oberflächenbildes als auch auf der Grundlage der strukturellen Bewertung deutlich und transparent.

Der Ablauf bei dem Modell mit getrennter Datenanalyse (Variante II) ergibt sich wie folgt:

1. Es erfolgt eine konventionelle Datenaufbereitung auf der Basis des aktuell eingesetzten PMS-I/O, allerdings ohne Einbindung des Kriteriums Substanzwert (Bestand) nach dem AP 9/S.
2. Die damit gebildeten homogenen Abschnitte und die darauf basierende PMS-Input-Datei (vgl. Kapitel 2.1.3) werden in den dann leicht modifizier-

ten PMS-Algorithmus übernommen, die Berechnungsläufe werden durchgeführt. Als Ergebnis folgen eine Abschnittsliste sowie ein Finanzbedarf, der lediglich ein Erhaltungsprogramm auf Basis des Oberflächenzustandes widerspiegelt.

3. Parallel wird eine Datenaufbereitung für die Berechnung nach den RSO Asphalt durchgeführt. Dies erfolgt auf Basis der Abschnittsfolgen, die ggf. gemäß dem vorhandenen Aufbau in homogene Abschnitte gleicher Befestigungsaufbauten unterteilt werden müssen, sofern dieser im Abschnitt wechselt. Auf dieser Basis wird die Berechnung nach den RSO Asphalt durchgeführt.
4. Es wird eine Datenanalyse nur auf Basis der RSO-Ergebnisse durchgeführt. Dabei sind Eingriffsgrenzen zu formulieren, die aber nicht zwangsläufig in ein Wertesystem gemäß den ZEB überführt werden müssen. Darauf basierend kann eine Abschätzung der Restnutzungsdauer unter Einbeziehung der zu erwartenden Verkehrsbelastung durchgeführt werden. Mit dieser Abschätzung ergeben sich dann die im Planungszeitraum anstehenden Erhaltungsabschnitte. Im Weiteren könnten dann Maßnahmenvarianten untersucht werden. Grundsätzlich sollte auch in diesem Fall die Möglichkeit bestehen, beispielsweise eine Deckenerneuerung gegen eine grundhafte Erneuerung nach den RSO Asphalt bewerten zu können. Damit ergibt sich

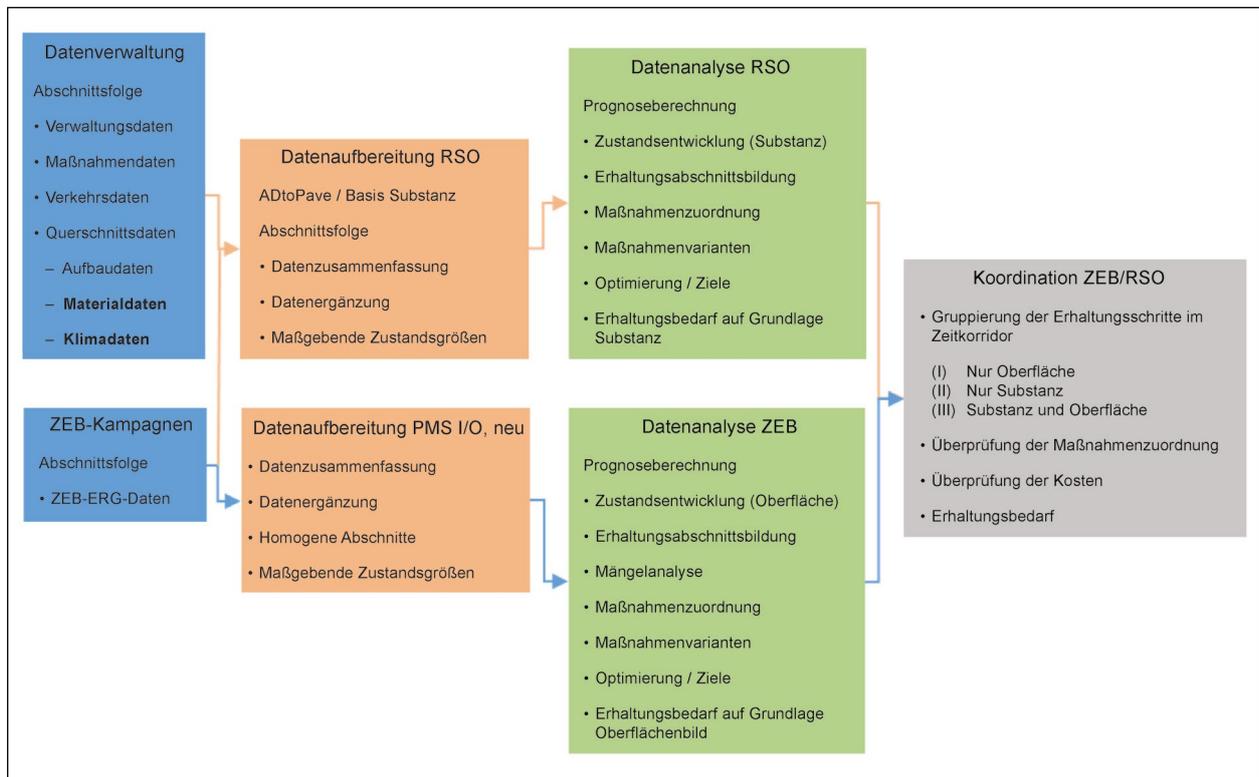


Bild 10: Struktur des Erhaltungsmanagements mit getrennter Datenanalyse/Variante II, überarbeitet und ergänzt in Anlehnung an STÖCKERT (2018)

dann eine zweite Abschnittsliste auf der Grundlage der Substanz.

5. In einem letzten Schritt werden die Ergebnisse aus der Bewertung der Oberfläche und aus der Bewertung der Substanz überlagert. Zunächst müssen die jeweils zugrundeliegenden Abschnitte miteinander kombiniert werden, da aus den beiden Ergebnislisten nicht zwangsläufig die gleichen Abschnitte hervorgehen. Dies wiederum bedingt die Entwicklung neuer Regeln, bevor die Bildung verschiedener Gruppen wie folgt durchgeführt werden kann:

- Der Abschnitt weist nur Oberflächenschäden auf, die im Planungszeitraum eine Maßnahme auslösen. Eine Erhaltungsmaßnahme aus Gründen der Substanz fällt im Planungszeitraum (Vorschlag: 5 Jahre) nicht an. Die Maßnahmenzuordnung aus der Erhaltungsplanung Oberfläche bleibt erhalten.
- Der Abschnitt weist sowohl Oberflächenschäden als auch Substanzschäden auf, die im Planungszeitraum Maßnahmen auslösen. Der Maßnahmenvorschlag aus der Substanzerhaltung bleibt erhalten.

- Der Abschnitt weist Substanzschäden auf, die im Planungszeitraum eine Maßnahme auslösen. Sofern keine relevanten Oberflächenschäden im Planungszeitraum auftreten, wird diese Maßnahme verschoben. Anschließend kann dann über das Aufsummieren der verschiedenen Listen der Finanzbedarf ermittelt werden.

Beide Verfahren gelten zunächst als Arbeitshypothese, da beiden Verfahren methodische Schwächen zugeordnet werden können. Im Wesentlichen müssen eine Reihe von Modellannahmen im Verfahren I modifiziert und angepasst werden sowie im Verfahren II gänzlich neu entwickelt werden. Zudem ist zu prüfen, ob und welche Routinen neu entwickelt werden müssten. Im Verfahren II ist dies in jedem Fall zu erwarten. Aufgrund des damit verbundenen zusätzlichen Aufwandes soll zunächst das Verfahren I im laufenden Projekt im „Labormaßstab“ erarbeitet werden.

Verfahren I	Verfahren II
± Strukturelle Bewertung wird wie bisher in einem Gesamtwert integriert und schlägt damit erst einmal bei der Maßnahmenbedürftigkeit nicht durch. Möglicherweise wird das Potenzial der RSO Asphalt auf diese Weise nicht umfassend genutzt.	+ Klare Differenzierung des Erhaltungsbedarfs nach oberflächenbezogenen und strukturellen Gründen, Erhaltungsbedarf aus beiden Gründen wird transparenter und der Erhaltungsbedarf aus Gründen fehlender Substanz liefert weitergehende Informationen für die Langfristplanung.
+ Optimierung über alle Kenngrößen.	+ Optimierung nur in getrennten Bereichen (nach Oberfläche und Substanz) möglich, Effizienz des Systems muss überprüft werden.
+ Verfahren dem Grunde nach mit vorhandenen Softwaretools lösbar.	+ Starke Betonung der abschnittsbezogenen Betrachtung, unterschiedliche Detailtiefe bei den beiden Betrachtungsweisen.
- Verfahren muss eine Bewertung angepasst an die ZEB aufweisen.	- Neue Softwaretools müssen zusätzlich erstellt werden. Daraus entsteht ein hoher, im vorliegenden Projekt nicht erfüllbarer, Aufwand.
+ Methodik muss in den einzelnen PMS-Abschnitten modifiziert werden, zum Beispiel Mängelklassen, Maßnahmenzuordnung, Maßnahmenwirkung.	+ Verfahren kann eine möglicherweise realitätsnähere Bewertung aufweisen.
	- Methodik für den PMS-Ablauf muss teilweise neu entwickelt werden, zum Beispiel Anwendung der RSO Asphalt als eigenständiges PMS-Modul muss umgesetzt werden.
	- Koordinationstool muss entwickelt werden, beginnend bei Abschnittsüberlagerung, Gruppierung und Entscheidungsfindung.

Tab. 7: Grobvergleich der PMS-Berechnungsvarianten mit + für Vorteile und – für Nachteile

3.2 Vorschläge zur Festlegung der PMS-Modellparameter

Der grundsätzliche Berechnungsablauf eines PMS mit den erforderlichen Modulen ist bereits unter Kapitel 2.1.3 beschrieben. Der erforderliche Datenfluss ist in Bild 11 nochmals als Übersicht dargestellt. Prinzipiell werden die Ergebnisdaten der ZEB (ZEB-ERG), die Bestandsdaten und die jeweiligen Vergleichsfälle nach dem AP 9/S und den RSO Asphalt verwendet, um homogene Abschnitte zu bilden. Dies wird im Einzelnen in Kapitel 3.3 beschrieben.

Um später die Vergleichsrechnungen an einem PMS-Netz durchführen zu können, wird ein PMS-Setup benötigt. Im PMS-Setup werden die späteren Modellvorgaben für die PMS-Rechenläufe festgelegt. Im Einzelnen betrifft dies folgende Modellannahmen:

- Verhaltensfunktionen zur Prognose von Zustandsänderungen,
- Mängelklassenmodelle,
- Definition der Maßnahmenarten und Bedingungen zur Durchführung der Maßnahmen,
- Kostenmodell zur Ermittlung der Maßnahmenkosten,

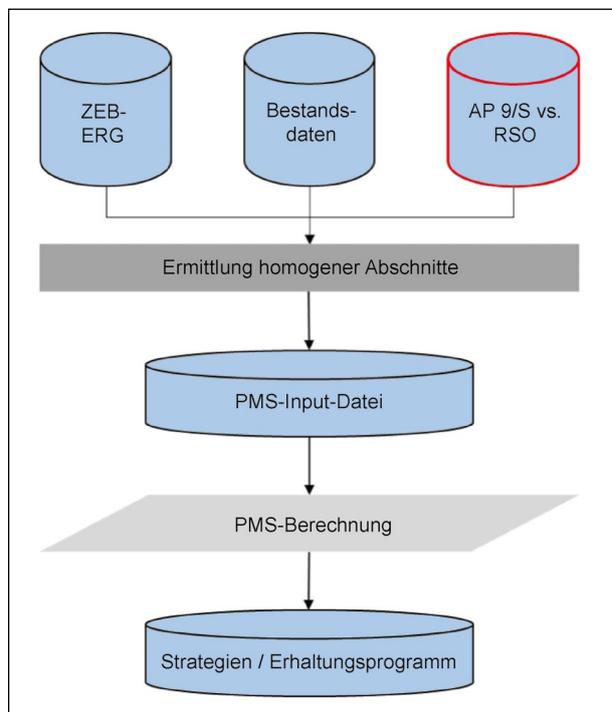


Bild 11: Grobstruktur des Datenflusses im PMS

- Bedingungen zu den Maßnahmenwirkungen (Folgeverhalten und Rücksetzwerte).

Grundsätzlich kann und soll auf bewährte Modellparameter zurückgegriffen werden, wie sie beispielsweise in MAERSCHALK und KRAUSE (2004)

sowie MAERSCHALK und SOCINA (2008) beschrieben sind. Nachfolgend soll daher nur auf Unterschiede und festzulegende Randbedingungen durch die Anwendung der RSO Asphalt eingegangen werden.

Neben den genannten Modellparametern ist es im vorliegenden Fall notwendig, zunächst eine Bewertungsfunktion für die Berechnungsergebnisse nach den RSO Asphalt abzuleiten. Um zu dem oben beschriebenen PMS kompatibel zu bleiben, ist eine Normierungsfunktion, die den bekannten Wertebereich zwischen 1,0 und 5,0 abdeckt, zu entwickeln. Anschließend ist festzulegen, welche Setup-Parameter verändert und/oder angepasst werden müssen, bzw. welche unverändert bleiben. Die nachfolgenden Ausführungen sind als Vorschläge zu betrachten, mit denen die netzweiten Analysen im vorliegenden Projekt gerechnet werden. Auf Basis dieser Berechnungen sollte in einer Pilotanwendung geprüft werden, welche der nachfolgend aufgeführten Annahmen bestehen bleiben und welche angepasst werden müssen.

Im Rahmen des Forschungsauftrages wird der Berechnungsablauf nach den RSO Asphalt mit dem Programm ADtoPave abgebildet und als wesentliches Berechnungsergebnis eine abschnittsbezogene Restnutzungsdauer ausgewiesen. Ein Verfahren zur Zustandsprognose für den Substanzwert erübrigt sich dadurch, da die Zustandsveränderung sowie die zeitliche Veränderung auch in Verbindung mit dem Abgleich ertragbarer 10-t-Achsübergänge und tatsächlich vorhandener Achsübergänge erfolgen können. Somit verbleiben als wesentliche Festlegungen/Ergänzungen folgende Parameter zur Entscheidung (vgl. Bild 12):

- Die vergleichsweise genaue Kenntnis der Restnutzungsdauer kann auf die Auswahl der Maßnahmenart über das Mängelklassenmodell als

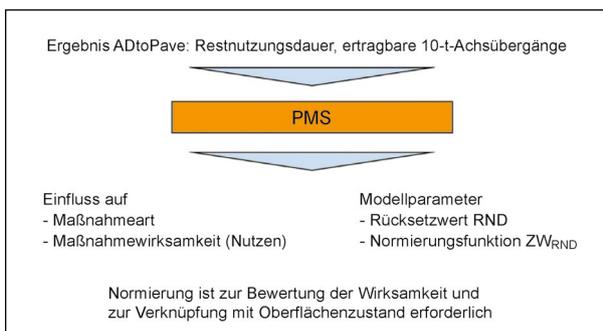


Bild 12: Zusammenhang zwischen dem RSO-Ergebnis und dem PMS-Setup

auch bei der Festlegung der Bedingungen zur Maßnahmenart Einfluss nehmen.

- Die Definition einer Normierungsfunktion ist erforderlich, um einen sinnvollen Vergleich zu anderen Zustandsparametern zu gewährleisten und die Restnutzungsdauer in das interne Optimierungskriterium zu integrieren.
- Wesentlich ist ebenfalls eine Festlegung der Maßnahmenwirkung, da mit der Angabe einer Restnutzungsdauer ebenfalls Rücksetzwerte (Erhöhung der Nutzungsdauer) festgelegt werden müssen.

Ein erster Ansatz zur Formulierung einer Normierungsfunktion wird in einem linearen Verlauf ausgehend von einer Restnutzungsdauer von 30 Jahren gesehen. Dazu wird der Zustandswert Restnutzungsdauer ZW_{RND} eingeführt, der bei Anwendung der RSO Asphalt den Substanzwert (Bestand) aus dem AP 9/S (vgl. Kapitel 2.3.1) ersetzt. Die vorgeschlagene Normierungsfunktion (Bild 13) verläuft linear, die Stützstellen begründen sich wie folgt:

- Der 1,0-Wert wird bei einer Restnutzungsdauer von 30 Jahren oder größer vergeben. Die 30 Jahre entsprechen der in den RStO 12 festgelegten Nutzungsdauer und stellen damit einen praktikablen Wert dar.
- Der Warnwert mit $ZW_{RND} = 3,5$ wird bei 11,25 Jahren Restnutzungsdauer erreicht. Dies erscheint primär als relativ hoch. Wird jedoch die Bedeutung der Restnutzungsdauer im primären Zusammenhang mit dem Versagen der Asphalttragschicht berücksichtigt und diese mit der zu erwartenden Nutzungsdauer einer Asphaltdeckschicht (ADS) in einem PMS verglichen, wird hier im Regelfall ein Wert im unteren Bereich der zu erwartenden Lebensdauer der ADS erreicht. Daher erscheint es sinnvoll, den Warnwert bei

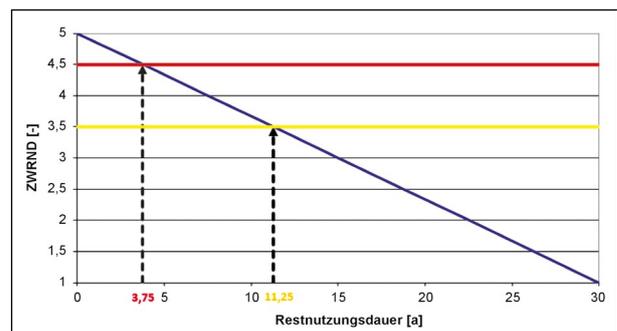


Bild 13: Vorschlag einer Normierungsfunktion für die Restnutzungsdauer als ZW_{RND}

11,25 Jahren Restnutzungsdauer zu setzen, um hier sinnvoll Maßnahmenalternativen prüfen zu können, vor allem wenn zu erwarten ist, dass die vollständige Lebensdauer einer ADS möglicherweise aus Substanzgründen gar nicht mehr erreicht werden kann.

- Der Schwellenwert mit $ZW_{RND} = 4,5$ wird bei 3,75 Jahren Restnutzungsdauer erreicht. Der Versagensfall wird bei 0 Jahren Restnutzungsdauer erreicht und damit erscheint ein Vorhaltemaß von 3,75 Jahren als angemessen, um im Rahmen des Erhaltungsmanagements noch sinnvoll planen zu können, ohne eine „Feuerwehrmaßnahme“ ergreifen zu müssen.

Die weitere Bildung von Teilwerten bis hin zum Gesamtwert im PMS soll zunächst unverändert bleiben.

Eine Neudefinition von Mängelklassen (MKL) ist im laufenden Projekt nicht vorgesehen, da hierfür ein gesondertes Forschungsprojekt, FE04.0312 „Erweiterung des Mängelklassenmodells im PMS zur Ableitung geeigneter Erhaltungsmaßnahmen“, geplant ist. Darin sollte die Einbindung der Substanzbewertung nach den RSO Asphalt zwingend berücksichtigt werden. Bei den weiteren Berechnungen wird somit die bisherige Mängelklassenbildung im PMS beibehalten. Diese beinhaltet zusätzlich zu den im Forschungsbericht beschriebenen Mängelklassen (KRAUSE 2000) bereits eine Mängelklasse für den mangelhaften Substanzwert (Bestand). Diese kommt zur Anwendung, wenn die vorgegebene Erhaltungsstrategie explizit auf die Wahrung der Substanz und einen nachhaltigen Maßnahmenmix ausgerichtet ist.

Zur Einbindung der Substanzbewertung nach den RSO Asphalt wird vorgeschlagen, die Restnutzungsdauer nicht direkt in eine neue Mängelklasse einfließen zu lassen, sondern die Restnutzungsdauer direkt auf die Maßnahmenauswahl wirken zu lassen.

Dabei werden die nachfolgenden Fälle vorgeschlagen:

1. $RND < 2$: wenn MKL vorhanden (außer MKL GRI) dann E2
2. $RND < 2$: wenn $\text{MAX}(ZW_{AUN}, ZW_{SPT}, ZW_{SPH}, ZW_{RIS}, ZW_{RSF}) > ZW_{Grenz}$ dann E2 (Vorschlag: $ZW_{Grenz} = 3,0$)
3. $RND > 30$: wenn MKL vorhanden, dann normale Maßnahmenwahl nach MKL

4. $RND \leq 10$: wenn MKL vorhanden, dann lt. MKL nur I1
5. $RND \leq 20$: wenn MKL vorhanden, dann lt. MKL nur I1, I2
6. $RND \leq 30$: wenn MKL vorhanden, dann lt. MKL nur I1, I2, E1

mit

RND	Restnutzungsdauer im Analysejahr
MKL	Mängelklasse nach KRAUSE (2000)
E1, E2, I1, I2	Art der Maßnahmenkategorie (vgl. Bild 1)
$ZW_{AUN}, ZW_{SPT}, ZW_{SPH}, ZW_{RIS}, ZW_{RSF}$	Zustandswerte nach ZTV ZEB-StB
ZW_{Grenz}	Grenzzustandswert für E2-Maßnahmen

Die Fälle lassen sich wie folgt begründen:

- Fall 1: Wenn die Restnutzungsdauer mit kleiner 2 Jahren angegeben wird, aber keine sonstigen Schäden vorliegen, muss zunächst auch keine Maßnahme durchgeführt werden. Sonstige Schäden werden durch Vorliegen einer Mängelklasse angezeigt, in diesem Fall wird eine E2-Maßnahme für sinnvoll gehalten. Wird eine Mängelklasse allein durch die Griffigkeit verursacht, wird eine griffigkeitsverbessernde Maßnahme als ausreichend erachtet.
- Fall 2: Wenn die Restnutzungsdauer mit kleiner 2 Jahren angegeben wird und bereits deutliche Schäden unterhalb des Warnwertes bei den anderen Zustandsmerkmalen vorliegen, wird eine E2-Maßnahme (Tiefenbau gesamter Oberbau) vorgeschlagen. Als Grenze wird ein Zustandswert (ZW) von 3,0 vorgeschlagen. Dies wird in der Kombination einer bereits sehr schlechten Substanz und deutlichen Oberflächenschäden als angemessen erachtet.
- Fall 3: Wenn die Restnutzungsdauer mit größer 30 Jahren angegeben wird, greift die normale Maßnahmenwahl nach dem üblichen Mängelklassenmodell. Die Substanz spielt hier keine Rolle.

- Fall 4: Wenn die Restnutzungsdauer mit kleiner 10 Jahren angegeben wird und eine Mängelklasse vorhanden ist, greift der Maßnahmentyp I1 (OB/DSK) als Überbrückungsmaßnahme.
- Fall 5: Wenn die Restnutzungsdauer mit kleiner 20 Jahren angegeben wird und eine Mängelklasse vorhanden ist, greifen die Maßnahmentypen I1 (OB/DSK) und I2 (DS) als Erhaltungsmaßnahme. Dies kann möglicherweise in Abhängigkeit des Zustandsbildes noch weiter spezifiziert werden.
- Fall 6: Wenn die Restnutzungsdauer mit kleiner 30 Jahren angegeben wird und eine Mängelklasse vorhanden ist, greifen die Maßnahmentypen I1, I2 und E1 (Decke) als Erhaltungsmaßnahme. Dies entspricht weitgehend dem bisherigen Vorgehen mit Ausnahme des Maßnahmentyps E2.

Die Fälle werden in der o. g. Reihenfolge abgefragt. Ist eine Bedingung erfüllt, wird dieser Fall berücksichtigt und die weitere Abfrage abgebrochen.

Um die Wirkung von Erhaltungsmaßnahmen bezüglich der strukturellen Substanz zu spezifizieren, müssen Rücksetzwerte, in diesem Fall die Erhöhung der Restnutzungsdauer, festgelegt werden. Hierfür werden zunächst folgende Annahmen vorgeschlagen:

- Bei einer E2-Maßnahme wird die Restnutzungsdauer auf 30 Jahre gesetzt, es liegt ein neuer Aufbau vor, der üblicherweise auf diesen Zeitraum ausgelegt sein sollte. Eine genauere Angabe wäre sicherlich auf Grundlage der RDO Asphalt möglich, eignet sich aber nicht für die automatisierte Verarbeitung in einem PMS.
- Bei einer E1-Maßnahme wird die Restnutzungsdauer pauschal um 10 Jahre erhöht, dies wird als pragmatischer Ansatz in Abhängigkeit der zu erwartenden Lebensdauer der Deckschicht gesehen.
- Bei einer I-Maßnahme wird die Restnutzungsdauer nicht zurückgesetzt, da mit diesen Maßnahmen kein Beitrag zur Verbesserung der strukturellen Substanz zu erwarten ist.

Diese Annahmen werden, für die in Kapitel 4.3 durchgeführten, netzweiten Vergleiche herangezogen und durch Sensitivitätsanalysen überprüft.

3.3 Voraussetzung für die Anwendung des Verfahrens bei netzweiten Betrachtungen

3.3.1 Datenqualität und -vollständigkeit

Gegenstand der aktuellen Forschung war es, unter anderem das Verfahren im Labormaßstab für ein synthetisches Analysenet zu anzuwenden. Vor der netzweiten Anwendung des Verfahrens ist es zunächst notwendig, Fragen in Bezug auf die Datenqualität, Datenvollständigkeit, Abschnittsbildung und Kennzahlen zu klären. Einige Fragestellungen wurden bereits in dem Forschungsbericht von KRAUSE und MAERSCHALK (2010) zusammengefasst (vgl. Kapitel 2.1.3). Sie sind vor dem Hintergrund der hier entwickelten Erweiterungen erneut zu diskutieren und allenfalls zu ergänzen.

Die Rechenmodelle des PMS verwenden Berechnungseingangswerte, die für die homogenen Abschnitte ermittelt werden. Diese werden mit PMS-I/O auf Grundlage der aus den Straßendatenbanken zur Verfügung stehenden Daten berechnet. Die erforderlichen Daten müssen möglichst vollständig vorliegen. Wenn für den gesamten Bereich eines homogenen Abschnitts Daten fehlen, können nicht alle Eingangswerte ermittelt werden. Die Ergebnisse des PMS-Rechenlaufs sind damit unvollständig. Sind lediglich netzweite Prognosen durchzuführen, können solche Lücken verkräftet werden. Die auf Grundlage der lückenhaften Datengrundlage ermittelten Ergebnisse lassen sich entsprechend auf das gesamte Netz hochrechnen. Dennoch ist für eine objektscharfe Analyse eine möglichst vollständige Datengrundlage anzustreben, da dadurch eine höhere Präzision der Ergebnisse erzielt, systematische Fehler vermieden und die Akzeptanz des Verfahrens gesteigert werden kann.

In Bezug auf die Vollständigkeit der für PMS-Rechnungen erforderlichen Daten gibt es keine systematischen Untersuchungen. Die nachfolgenden Ausführungen spiegeln daher das Erfahrungswissen der Autoren wider.

Nach dem Bundesfernstraßengesetz obliegt die Straßenbauverwaltung der Bundesfernstraßen den Bundesländern. Mit der ASB und dem OKSTRA verfügen diese über ein bundesweit einheitliches Datenmodell, sodass grundsätzlich ein Zusammenführen der Daten möglich ist. In jedem Bundesland ist jedoch der Erfassungs- und Pflegeprozess für Straßendaten unterschiedlich geregelt. Nicht alle für das PMS relevanten Daten liegen überall in den

erforderlichen Strukturen vor, nicht alle Daten werden netzweit erfasst oder qualitätsgesichert. Die Folge ist, dass zum Beispiel Informationen zur Verkehrsbelastung für einen großen Teil des Netzes fehlen, Zustandsdaten aufgrund zwischenzeitlicher Netzänderungen nicht mehr zuordenbar oder Daten zum Straßenaufbau unvollständig sind.

Mit dem Bundesinformationssystem Straße (BISStra) und dem IT-ZEB-Server verfügt die Bundesanstalt für Straßenwesen über zwei Straßeninformationssysteme für die Bundesfernstraßen. Diese Systeme decken jedoch nicht alle für das PMS erforderlichen Daten ab.

Der Datenbestand in BISStra basiert im Wesentlichen auf den Straßendatenbanken der Länder, die ihren Datenbestand regelmäßig aktualisieren. Die Datenbanken sind allerdings nicht miteinander synchronisiert, die Datenlieferung erfolgt in turnusmäßigen Abständen. Die Zustandsdaten auf dem IT-ZEB-Server sind zwar nahezu vollständig, jedoch erfolgt dort keine Netzfortschreibung, sodass die ZEB-Daten bei Verwendung in einem PMS dem Netz neu zugeordnet werden müssen.

Aufgrund dieser Problemfelder werden im Zuge der Datenaufbereitung für die PMS-Rechnungen zunächst Analysen durchgeführt, um Netzänderungen zu berücksichtigen, unplausible Daten zu identifizieren und aus der Betrachtung auszuschließen. Anschließend werden Annahmen getroffen, um diese Lücken zu schließen (SOCINA, KOMMA 2015) bzw. unplausible Daten zu korrigieren. Methoden für die Überprüfung und die Schließung der Lücken sind vorhanden, jedoch nicht standardisiert. Sie können sich daher von Projekt zu Projekt unterscheiden.

Die im vorliegenden Projekt erarbeitete Erweiterung des PMS-Verfahrens stellt höhere Anforderungen an die Eingangsdaten als dies bei der Anwendung des momentan üblichen AP 9/S der Fall ist, da zusätzlich Material- und Klimadaten erforderlich werden. Mit dem Vorschlag zur Modellierung von Baustoff-Prüfdaten im Straßenbau (www.okstra.de) steht seit Anfang 2018 zum ersten Mal ein Datenschema zur einheitlichen Ablage und zum Austausch von Materialdaten zur Verfügung. Einzelproben können dabei einer Probeentnahmestelle zugeordnet werden. Probeentnahmestellen sind Punktobjekte, sodass ein Bezug zum Straßennetz hergestellt werden kann. Einer Einzelprobe kann zudem eine Bezugsfläche zugeordnet werden, die zur Angabe des

Bereichs dient, in dem die vorgefundenen Verhältnisse als repräsentativ betrachtet werden. Diese Bezugsfläche, die analog den Aufbaudaten modelliert ist, ist für die weitere Verwendung der Materialdaten in einem PMS absolut wichtig.

Mit diesem Datenschema ist eine wichtige Grundlage geschaffen worden. Jedoch fehlen in den Straßenbauverwaltungen noch die entsprechenden Systeme und Prozesse, um die Materialdaten netzweit systematisch zu erfassen. Ein Beispiel für ein System, in welchem zukünftig die relevanten Daten erfasst und gepflegt werden könnten, ist das IKS (vgl. DRÖGE 2017). Es zeigt sich jedoch schon jetzt, dass es Zeit braucht, bis Daten in relevanter Menge eingepflegt sind.

3.3.2 Bildung homogener Abschnitte

Vor der PMS-Berechnung sind zunächst homogene Abschnitte zu bilden. Homogene Abschnitte zeichnen sich dadurch aus, dass die relevanten Merkmale eine gleiche oder zumindest vergleichbare Ausprägung aufweisen. Dabei stellt sich die Frage, welche Merkmale als relevant zu betrachten sind.

Das für PMS-Anwendungen etablierte Verfahren nach RÜBENSAM und SCHULZE (1996) basiert vor allem auf dem nach den ZTV ZEB-StB ermittelten Oberflächenzustand und kann optional bei Änderung anderer Parameter (zum Beispiel einem Wechsel der Bauweise) Abschnittsgrenzen setzen. Mit dem Verfahren werden oftmals sehr kurze, nicht praxisgerechte Abschnitte gebildet und auch die Zustandshomogenität ist nicht immer gegeben. Es wurde daher ein neues Verfahren zur Bildung und Beschreibung zustandshomogener Abschnitte und repräsentativer Kennzahlen für das Erhaltungsmangement entwickelt (BERTHOLD et al. 2019). Die Forschungsarbeit konnte jedoch die diametralen Zielvorgaben (möglichst lange und trotzdem zustandshomogene Abschnitte) nicht abschließend in Einklang bringen.

Es ist wichtig, dass die Bildung homogener Abschnitte und die in den PMS-Berechnungen verwendeten Modelle aufeinander abgestimmt sind. Wird ein auf wenigen Kennzahlen basierendes, einfaches PMS-Modell verwendet, so sind bei der Abschnittsbildung wenige Randbedingungen zu beachten. Die Folge ist, dass die gebildeten Abschnitte durchschnittlich länger werden und auf den ersten Blick praxistauglicher erscheinen.

Parallel dazu sind in der RSO Asphalt Methoden für die Abschnittsbildung beschrieben. Hierbei werden in Abhängigkeit vom Aufbau, der Tragfähigkeit, der Verkehrsbelastung und ggf. des Substanzwertes (Oberfläche) nach den ZTV ZEB-StB Abschnittsgrenzen gesetzt.

Mit zunehmender Komplexität des angewendeten PMS-Modells müssen bei der Abschnittsbildung auch mehr Parameter in Betracht gezogen werden. Unterscheiden sich in einem ansonsten homogenen Abschnitt beispielsweise die Materialkennwerte an zwei Probeentnahmestellen in erheblichem Maße, so ist der Abschnitt unter Berücksichtigung der Bezugsfläche zu teilen. Folglich werden mit einer zunehmenden Anzahl an Parametern zunehmend kleinere Abschnitte gebildet werden. Deren Verhalten kann dann zwar präziser vorhergesagt werden, jedoch sind die Ergebnisse nicht mit einem Bauprogramm vergleichbar und somit ggf. nicht praxisgerecht.

Eine mögliche Lösung kann die Aggregation von kurzen homogenen Abschnitten zu längeren Abschnitten darstellen. Die so erzeugten längeren Abschnitte können anschließend als Grundlage für ein Erhaltungsprogramm verwendet werden. Diese naheliegende Lösung führt jedoch dazu, dass die netzweite Optimierung innerhalb des PMS ad absurdum geführt wird. Schließlich ermittelt das PMS ein optimiertes Ergebnis auf Basis der homogenen Abschnitte. Eine nachträgliche Veränderung zerstört dieses Optimum, sodass folgerichtig erneut netzweit optimiert werden muss, um die Auswirkungen der Änderungen abzuschätzen.

Ein anderer Lösungsansatz ist, dass bei der Erstellung der homogenen Abschnitte weniger Parameter, als modelltechnisch erforderlich, berücksichtigt werden. Damit besteht jedoch die Gefahr, dass die Qualität der Vorhersagen im PMS sinkt. In jedem Fall spielen dann die Methoden für die Ermittlung der Kennzahlen für den homogenen Abschnitt eine noch wichtigere Rolle. Diese müssten dann praktisch die fachlichen Defizite der Abschnittsbildung kompensieren.

3.3.3 Kennzahlen

Vor der Verwendung in einem PMS sind für die homogenen Abschnitte die relevanten Merkmale bzw. Kennzahlen zu ermitteln, z. B. die repräsentative Verkehrsbelastung, die Belastungsklasse oder der Oberflächenzustand. Die Standardverfahren hierfür

sind in der Software PMS-I/O hinterlegt, eine im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur entwickelte Softwarelösung. Änderungen an PMS-I/O sind aufwändig, da die monolithische Struktur des Programms nur eine geringe Modularität aufweist und sich somit die Integration neuer bzw. alternativer Algorithmen als schwierig erweist. Dazu erfolgen die Anpassungen in einem veralteten Framework. (SKAKUJ, GRUND 2019)

Für die im vorliegenden Projekt erarbeitete Erweiterung des PMS-Verfahrens mussten individuelle Access-Module erstellt werden, um die Schnittstellendatei für ADtoPave bereit zu stellen und die entsprechenden Berechnungsergebnisse aus ADtoPave zu integrieren. Für eine netzweite Anwendung ist ADtoPave (oder eine vergleichbare Software) sinnvollerweise entweder in PMS-I/O zu integrieren oder PMS-I/O muss zu einem offenen, erweiterbaren System umgebaut werden. Die letztgenannte Lösung wird derzeit diskutiert und in einem Grobkonzept beschrieben. (SKAKUJ, GRUND 2019) Aus Sicht des vorliegenden Projekts wäre diese Lösung anzustreben, da dies ermöglicht, dass externe Programme, wie ADtoPave, angebunden und die Eingangsdaten flexibler gehandhabt werden können. Zudem erlaubt ein offenes System, auf die Berechnung der Kennzahlen direkt einzuwirken. Das ist nicht nur aus Sicht des aktuellen Projekts, sondern auch generell notwendig, da seit der ursprünglichen Erstellung des PMS-I/O neue Lösungen erarbeitet wurden, um eine Verbesserung der Kennzahlenberechnung zu erreichen. (KOMMA, GRUND 2019)

Eine modifizierte PMS-I/O-Software sollte für die Berücksichtigung der RSO-Methodik zumindest die Schnittstellendatei für ADtoPave in der in Bild 28 beschriebenen Form bereitstellen. Die Berechnungsergebnisse aus ADtoPave (Nutzungsdauern, Restnutzungsdauern, ggf. auch die noch ertragbaren Lastwechselzahlen) sind den homogenen Abschnitten zuzuordnen. Dies ermöglicht dann die Bereitstellung der erweiterten Berechnungseingangsdaten (Tabelle 18) für das PMS.

Es zeigt sich somit, dass vor der Anwendung des in dem vorliegenden Forschungsprojekt erarbeiteten Verfahrens auf Netzebene einige wichtige Aspekte neu zu durchdenken und erforderlichenfalls zu entwickeln sind. Dies betrifft die Datenqualität und -vollständigkeit (Verfügbarkeit von Daten), die Bildung homogener Abschnitte, die Flexibilität der

Standardprogramme sowie die Berechnung von Kennzahlen. Wichtig ist dabei eine ganzheitliche Betrachtung dieser Aspekte, da es verschiedene Rückkopplungsprozesse gibt.

4. Integration des Verfahrens zur Bewertung der strukturellen Substanz in die rechnergestützte Erhaltungsplanung

4.1 Ermittlung allgemeingültiger Materialeigenschaften

Im Rahmen des Forschungsvorhabens ist das in den RSO Asphalt beschriebene Verfahren an das Pavement Management System (PMS) anzubinden. Hierfür wird ein synthetisches Analysenetz, bestehend aus realen Abschnitten, erstellt und als Grundlage für die Entwicklung eines gekoppelten Modells verwendet. In einem ersten Schritt sind zum Vergleich und zur besseren Bewertung der voran beschriebenen Verfahren, Vergleichsrechnungen nach den RSO Asphalt und dem AP 9/S durchzuführen.

Um eine Restsubstanzbewertung nach den RSO Asphalt durchführen zu können, sind insbesondere Materialkennwerte für die einzelnen Schichten der zu bewertenden Straßenbefestigung Voraussetzung. Zur Ermittlung solcher Kennwerte, vornehmlich zur Beschreibung des jeweiligen materialspezifischen Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens, sind auf den einzelnen Streckenabschnitten, je nach Länge des Untersuchungsabschnittes, mindestens 16 Bohrkerne zu entnehmen und anschließend im Labor prüftechnisch zu untersuchen.

Da solch eine Beprobung auf Objektebene mit einem merklichen zeitlichen und finanziellen Aufwand

verbunden ist, ist eine Beprobung auf Netzebene innerhalb des Forschungsvorhabens undenkbar. Für die angedachten Vergleichsrechnungen müssen somit zur Anwendung der RSO Asphalt auf Netzebene Materialparameter angenommen werden. Um die Wahl der Materialien bzw. Materialparameter bestmöglich bewerten zu können, soll die Auswahl einzubeziehender Materialien sehr gezielt erfolgen.

Hierfür wurden alle den Autoren zugänglichen Materialuntersuchungen gesammelt und ausgewertet. Die Gewährleistung von Datenqualität und Diversität der Datensätze ist dabei unabdingbar.

Gemäß den RSO Asphalt finden lediglich Ergebnisse aus Spaltzug-Schwellversuchen, die das Steifigkeits- und Ermüdungsverhalten von Asphaltgemischen beschreiben, Berücksichtigung. Jeder Datensatz war zunächst hinsichtlich seiner Eignung zu sichten, bevor im Anschluss notwendige Materialparameter unter Anwendung der Vorgaben der FGSV TP Asphalt, Teil 24 (2018) und der FGSV TP Asphalt, Teil 26 (2018) ermittelt wurden. Das heißt, alle verfügbaren Datensätze waren auf die gleiche Art und Weise erneut auszuwerten bzw. aufzubereiten.

Getrennt nach Schichtart sowie Steifigkeits- und Ermüdungskriterium (repräsentiert durch Masterfunktionen, auch Hauptkurven genannt, und Ermüdungsfunktionen) wurden die Ergebnisse aller als „brauchbar“ eingestuft Datensätze zu Funktionsgruppen zusammengefasst. In einem nächsten Schritt wurden weitere Kriterien einbezogen, um eventuelle materialspezifische Ausrichtungen einzelner Funktionsscharteile herauszuarbeiten. Eine Auflistung aller untersuchten Kriterien wird in Tabelle 8 geboten.

In Tabelle 9 sind die im Rahmen des Forschungsvorhabens gesichteten und als brauchbar bewerte-

Differenzierungskriterien
1. Steifigkeit getrennt für Asphaltdeck-/binder-/tragschichtgemische; Ermüdung für Asphalttragschichtgemische (Ermüdungsbeständigkeit der Deck- und Binderschichtgemische ist für eine Substanzbewertung nach den RSO Asphalt nicht relevant)
2. Unterscheidung zwischen „Frisch“ (ohne Verkehrsbelastung; Material von Mischanlage oder durch Herstellung im Labor, sowie Material durch Bohrkernentnahme direkt nach Einbau in Befestigung) und „Bestand“ (mit Verkehrsbelastung; Bohrkernentnahme nach Liegezeit x)
3. Differenzierung Frisch: „Laborverdichtung“ vs. „in-situ Verdichtung“
4. Überprüfung hinsichtlich zu berücksichtigender Relevanz: Bindemittelart/-sorte; Materialalter/-historie
5. Einbeziehung und Kenntlichmachung von Sondermaterialien

Tab. 8: Differenzierungskriterien

ten Materialien, differenziert nach Schichtart sowie Materialart, d. h. getrennt nach „Materialien aus dem Bestand“ und „frischen“ Materialien, zahlenmäßig zusammengefasst.

Eine Unterscheidung nach den in Tabelle 8 aufgezeigten Differenzierungskriterien 3 bis 5 bedingt keine Auffälligkeiten in den Materialgruppierungen. Auf eine entsprechende grafische Darstellung wird deshalb verzichtet. Auf die Kriterien 1 und 2 wird nachfolgend ausführlicher eingegangen. In Bild 14 bis Bild 17 sind die dazugehörigen Funktionsscharen angeführt. Hauptkurven und Ermüdungsfunktionen von Materialien aus dem Bestand sind rot markiert, Materialien, die noch keine Verkehrsbelastung er-

tragen haben (unbelastete Materialien), sind blau markiert.

Bei dem Vergleich der in Bild 14 bis Bild 17, getrennt nach Schichtart und Gebrauchseigenschaft dargestellten Verläufe der Funktionen, die die frischen, unbelasteten Materialien (ohne vorangegangene Verkehrsbelastung) repräsentieren (blau), und denen, die das Verhalten von Bestandsmaterialien aufzeigen (rot), wird deutlich, dass für die untersuchten Fälle die blau- und rot-dargestellten Funktionen weitestgehend deckungsgleich liegen. D. h., dass die natürlichen Streubreiten der Hauptkurven und Ermüdungsfunktionen der frischen Materialien, bedingt durch deren unterschiedliche Ge-

Spaltzug-Schwellversuch			
Kriterium Steifigkeit		Kriterium Ermüdung	
Deckschichtgemische	71	Deckschichtgemische	-
Frisch	45	Frisch	-
Bestand	26	Bestand	-
Binderschichtgemische	45	Binderschichtgemische	-
Frisch	24	Frisch	-
Bestand	21	Bestand	-
Tragschichtgemische	81	Tragschichtgemische	77
Frisch	53	Frisch	50
Bestand	28	Bestand	27
Frisch gesamt	122	Frisch gesamt	50
Bestand gesamt	75	Bestand gesamt	27
	Σ 197		Σ 77

Tab. 9: Anzahl einbezogener Materialien

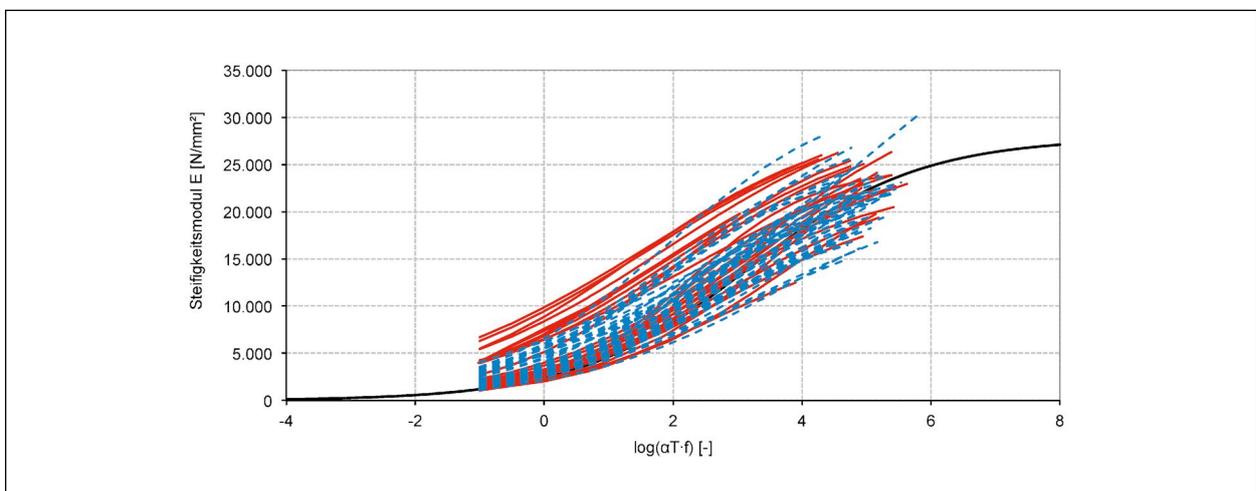


Bild 14: Hauptkurven Asphaltdeckschichtgemische (blau: Frisch, rot: Bestand, schwarz: Kalibrierasphalt Asphaltdeckschichtgemisch)

mischzusammensetzungen (d. h. durch die verwendete Bindemittelart und -sorte, die volumetrische Zusammensetzung und anschließende Verdich-

tung), denen der bereits vorbelasteten Materialien (trotz zusätzlich ertragener Verkehrsbelastungen und verschiedener Alterungsprozesse) sehr ähnlich

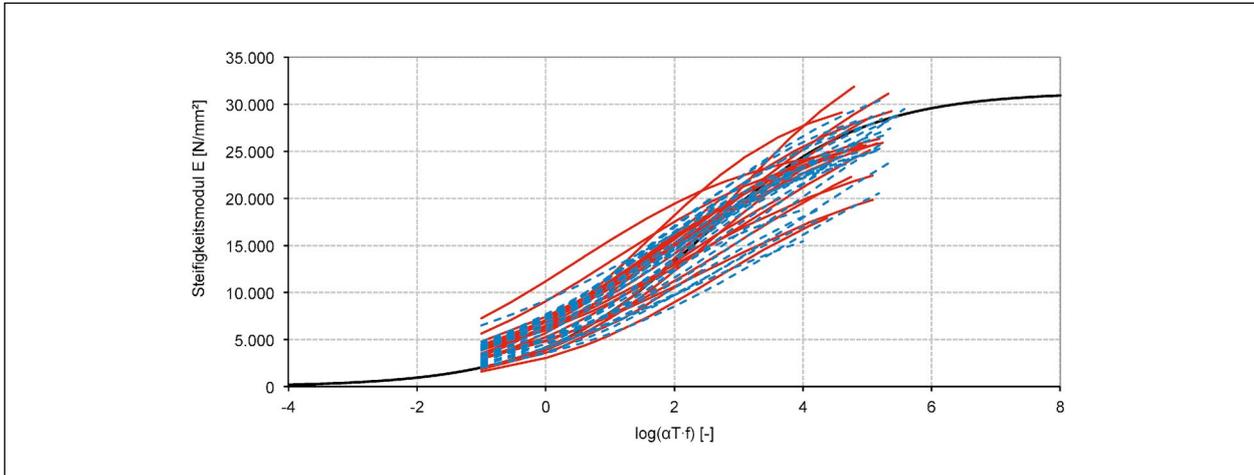


Bild 15: Hauptkurven Asphaltbinderschichtgemische (blau: Frisch, rot: Bestand, schwarz: Kalibrierasphalt Asphaltbinderschichtgemisch)

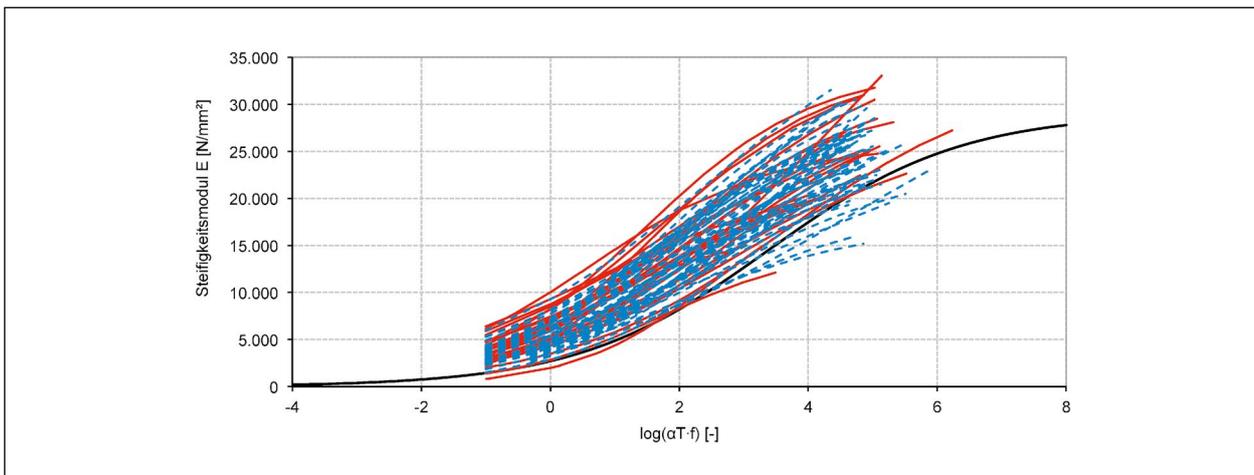


Bild 16: Hauptkurven Asphalttragschichtgemische (blau: Frisch, rot: Bestand, schwarz: Kalibrierasphalt Asphalttragschichtgemisch)

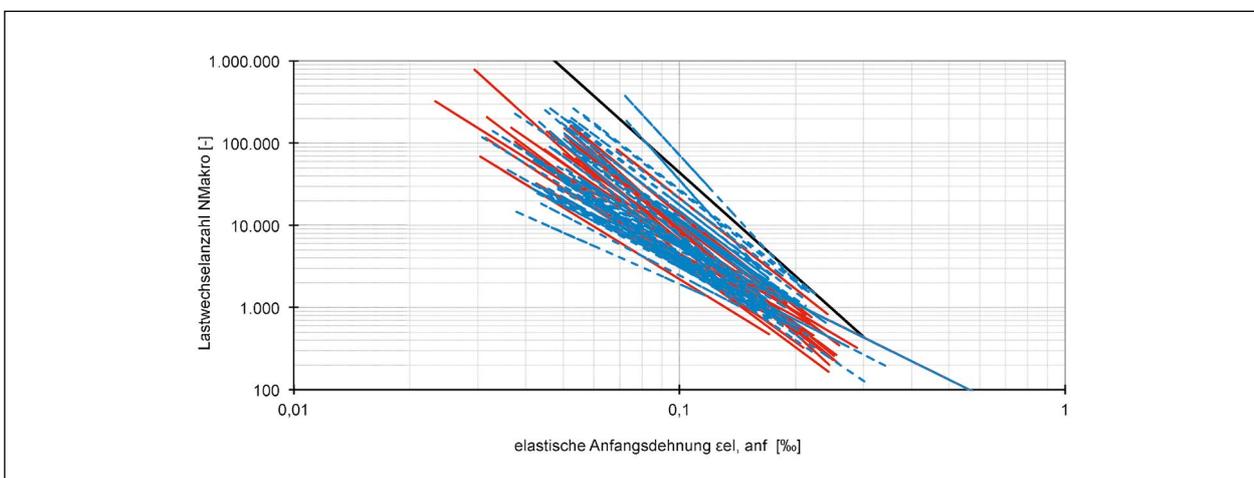


Bild 17: Ermüdungsfunktionen Asphalttragschichtgemische (blau: Frisch, rot: Bestand, schwarz: Kalibrierasphalt Asphalttragschichtgemisch)

sind. Lediglich bei den Hauptkurven der Deckschichtgemische zeigen einige wenige Bestandmaterialien, eine vergleichsweise höhere Steifigkeit als die nicht vorbelasteten (frischen) Materialien. Aufgrund der ähnlichen Streubreiten der in Bild 14 bis Bild 17 dargestellten Materialgruppen (Frisch und Bestand) wurde beschlossen, für nachfolgende Bearbeitungsschritte innerhalb des vorliegenden Forschungsvorhabens lediglich eine Differenzierung hinsichtlich der Materialart (bezogen auf die Schichtart) zu berücksichtigen. Die in einem Diagramm dargestellten Funktionen werden somit jeweils einer Materialschar zugeordnet, die als Grundlage zur Ableitung sogenannter allgemeingültiger Materialeigenschaften dient.

Unter dem Begriff „allgemeingültige Materialeigenschaften“ sind innerhalb des Forschungsvorhabens materialspezifische Funktionen wie Hauptkurven und Ermüdungsfunktionen zu verstehen, die die erarbeiteten Funktionsscharen in definierte Bereiche einteilen und somit verschiedene Qualitätsstufen repräsentieren. Die abgeleiteten allgemeingültigen Materialeigenschaften werden als Eingangsdaten für die nach den RSO Asphalt durchzuführenden Vergleichsrechnungen auf Netzebene verwendet. Für eine Bewertung der Restsubstanz einer Asphaltbefestigung gemäß den RSO Asphalt werden insbesondere Informationen zum Steifigkeitsverhalten aller eingebauten Materialien bzw. Schichten sowie zum Ermüdungsverhalten der für den Ermüdungsnachweis maßgebenden Tragschicht benötigt.

Folglich wurden für die in Bild 14 bis Bild 17 zusammengefassten Asphaltgemische jeweils drei Funktionen unterschiedlichen Verhaltens selektiert (sowohl Hauptkurven als auch Ermüdungsfunktionen). Einzelne sichtlich abweichende Funktionen in den Randbereichen wurden nicht berücksichtigt. Die ausgewählten Funktionen werden nachfolgend als obere, mittlere bzw. als untere Funktionen bezeichnet und stehen für vergleichsweise hohe/mittlere/geringe Steifigkeiten (repräsentativ für den untersuchten Temperaturbereich von -10°C bis $+20^{\circ}\text{C}$ und den Frequenzbereich von 10 Hz bis 0,1 Hz) bzw. ein vergleichsweise hohes/mittleres/geringes Ermüdungsverhalten. Die mittleren Funktionen ergeben sich dabei aus den jeweiligen oberen und unteren Funktionen. Die Funktionsparameter der mittleren Funktionen wurden so gewählt, dass eine optisch gemittelte Funktion resultiert. Die ausgewählten Funktionen sind in Bild 18 bis Bild 21 dargestellt. Die dazugehörigen Materialparameter sind in Tabelle 10 und Tabelle 11 aufgelistet und werden als Eingangsdaten für die sich anschließenden Berechnungen genutzt.

Asphaltmaterial	C1	C2
Tragschicht „oben“	6,49415208	-3,62690871
Tragschicht „mitte“	4,92836355	-3,21161007
Tragschicht „unten“	2,86861266	-2,88895022

Tab. 11: Materialparameter der ausgewählten Ermüdungsfunktionen der Asphalttragschichtgemische, ermittelt mit den Funktionsansätzen der FGSV TP Asphalt, Teil 24 (2018)

Asphaltmaterial	E_{\min}	E_{\max}	m	b_1	b_0	T_0
Deckschicht „oben“	0	32.386	19.556	-0,51787024	0,82641921	20
Deckschicht „mitte“	0	26.788	21.449	-0,56000000	1,20000000	20
Deckschicht „unten“	0	21.189	23.341	-0,69966359	1,93953901	20
Binderschicht „oben“	0	34.991	24.924	-0,61407542	1,29698078	20
Binderschicht „mitte“	0	32.233	24.832	-0,57922442	1,64229150	20
Binderschicht „unten“	0	29.474	24.739	-0,54437342	1,98760222	20
Tragschicht „oben“	0	42.490	19.822	-0,53552959	1,27376477	20
Tragschicht „mitte“	0	35.105	21.445	-0,60000000	1,59000000	20
Tragschicht „unten“	0	27.719	23.067	-0,69891164	2,15419615	20

Tab. 10: Materialparameter der ausgewählten Hauptkurven der Asphaltdeck-, -binder- und -tragschichtgemische, ermittelt mit den Funktionsansätzen der FGSV TP Asphalt, Teil 26 (2018)

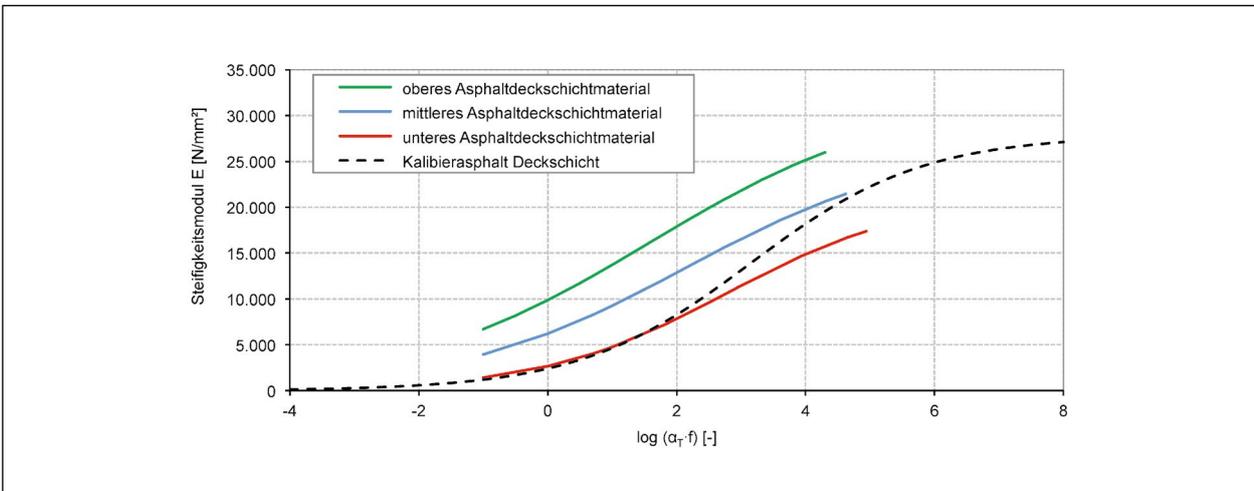


Bild 18: Ausgewählte Hauptkurven Asphaltdeckschichtgemische

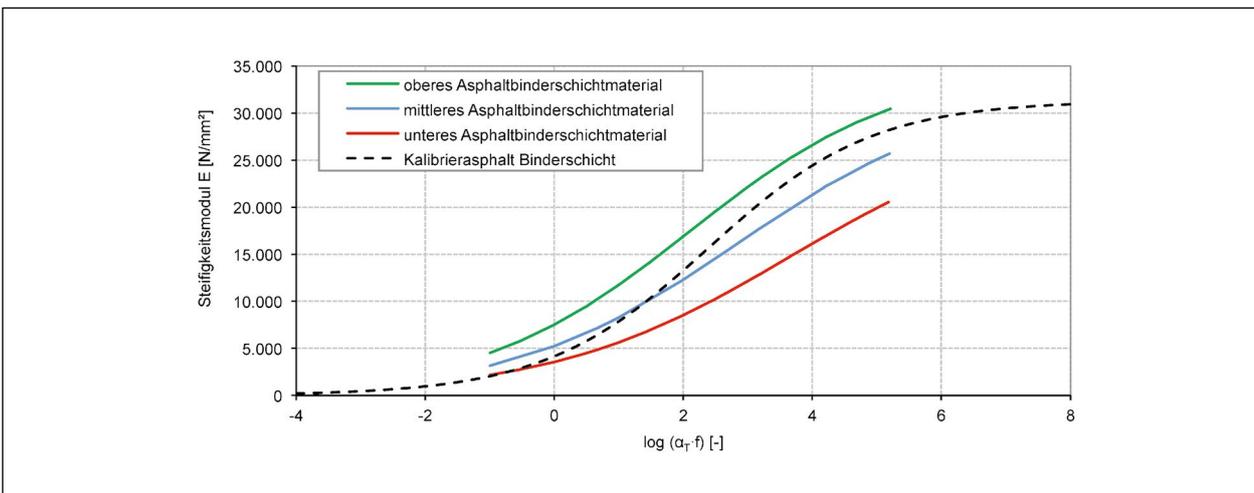


Bild 19: Ausgewählte Hauptkurven Asphaltbinderschichtgemische

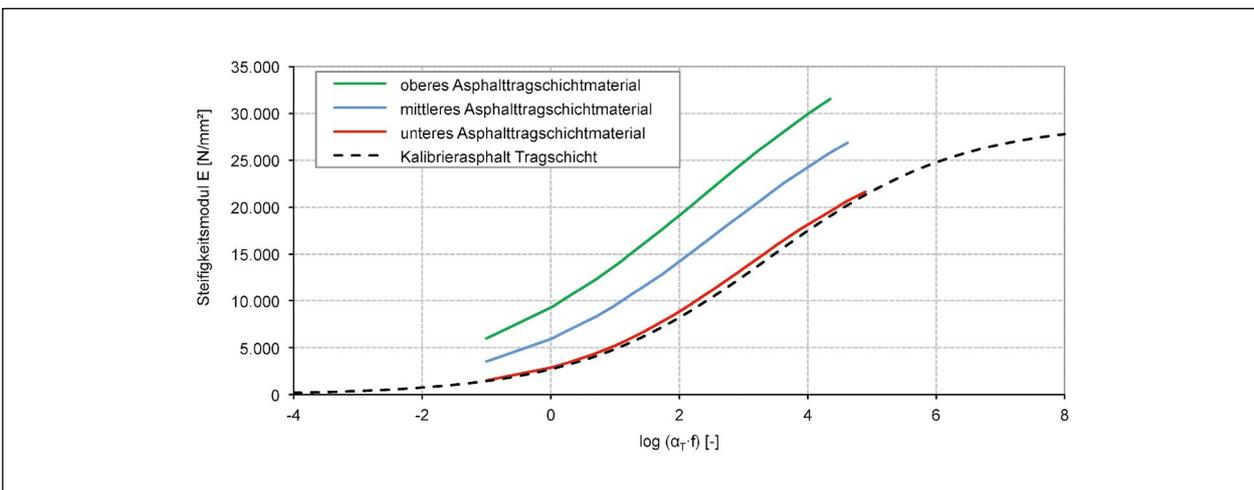


Bild 20: Ausgewählte Hauptkurven Asphaltbinderschichtgemische

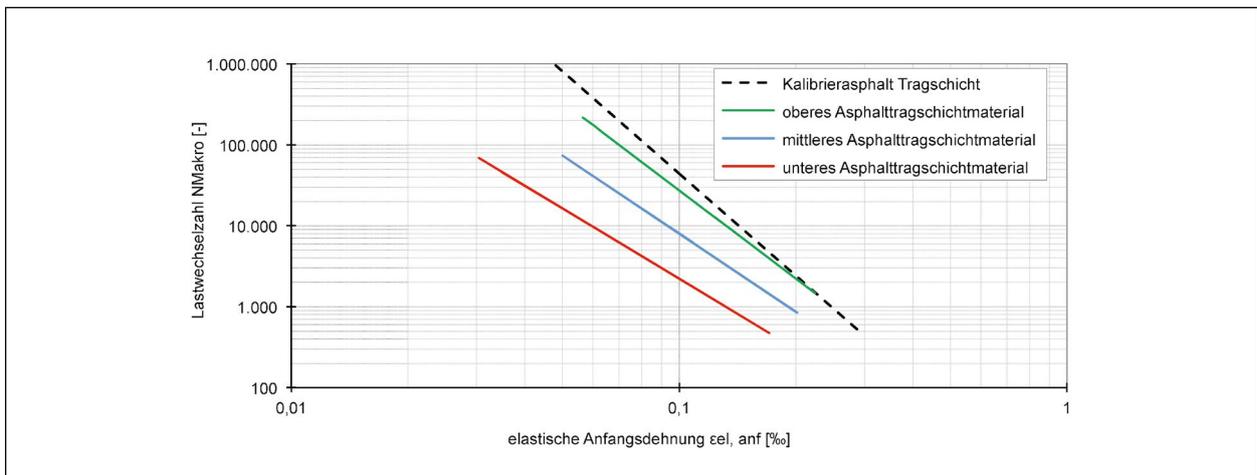


Bild 21: Ausgewählte Ermüdungsfunktionen Asphalttragschichtgemische

4.2 Vergleichsrechnungen

4.2.1 Vergleichsrechnungen auf Objektebene

Im Rahmen des Projektes sollten Vergleichsrechnungen nach den RSO Asphalt und dem AP 9/S für verschiedene reale Untersuchungsabschnitte (Asphaltbefestigungen) durchgeführt werden, um ein Verfahren zur netzweiten Beurteilung der Befestigungssubstanz zu validieren. Voraussetzung hierfür ist, dass für jeden einzubeziehenden Abschnitt sowohl ZEB-Daten als auch schichtspezifische Materialeigenschaften vorhanden sind.

Idealerweise wären diese Vergleichsrechnungen anhand von Autobahnabschnitten (zum Beispiel anhand der sogenannten RSO-Pilotstrecken) Vorrang zu gewähren gewesen, da das Analysenetz (Bild 25) hauptsächlich Autobahnen beinhaltet. Da zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung keine vollständigen Untersuchungsergebnisse aus Beprobungen von Autobahnen zur Verfügung standen, wurden in Absprache mit dem Auftraggeber gemäß dem ursprünglichen Forschungsauftrag fünf Abschnitte der Staatsstraße 286 bei Mülsen im Freistaat Sachsen beprobt und in Anlehnung an den Entwurf der RSO Asphalt bewertet (vgl. Kapitel 4.2.7).

Eine Verfahrensvalidierung bzw. -kalibrierung anhand von fünf Untersuchungsabschnitten ist jedoch als ungenügend zu bewerten, weshalb im Rahmen weiterer Forschungstätigkeiten beispielsweise die Beprobungsergebnisse der RSO-Pilotstrecken einbezogen werden sollten (vgl. Kapitel 5).

Als Berechnung auf Objektebene werden die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten objektspezifischen Berechnungen bezeichnet,

die sich jeweils auf einen Untersuchungsabschnitt (d. h. homogenen Abschnitt) beziehen. Zu den Berechnungen auf Objektebene zählen zum einen die Vergleichsrechnungen auf Objektebene (d. h. beprobte Abschnitte) und zum anderen die Einzelrechnungen für das Analysenetz, d. h. die Berechnungen auf Netzebene. Jede Einzelrechnung auf Netzebene entspricht einer Berechnung auf Objektebene.

Zur Durchführung der Vergleichsrechnungen auf Objekt- und auf Netzebene, in Anlehnung an die RSO Asphalt, sind grundsätzlich die gleichen Rahmenbedingungen in Anwendung zu bringen. Dies gilt insbesondere für die zu verwendende Temperaturzonenkarte sowie die zu berücksichtigenden Anpassungsfaktoren. Für die automatisierte klimatische Zuordnung eines jeden Einzelabschnittes wurde seitens des Auftraggebers die aktualisierte koordinatenreferenzierte Temperaturzonenkarte zur Verfügung gestellt (vgl. Bild 22). Die den einzelnen Zonen zuzuordnenden Häufigkeitsverteilungen, die anzusetzende Achslastverteilung für Fernverkehr (Bild 23) und die im Rahmen der nach den RSO Asphalt beim deterministischen Verfahren zu berücksichtigenden Anpassungsfaktoren (Tabelle 12) wurden ebenfalls seitens des Auftraggebers den Projektarbeitern zur Verfügung gestellt. Für die beispielhaften objektspezifischen Berechnungen der Staatsstraße S 286 bei Mülsen im Freistaat Sachsen wurde hingegen ein spezifisches Achslastkollektiv, dargestellt in Bild 24, angesetzt.

Für alle Untersuchungsabschnitte wurde eine Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 % vereinbart. Für die Berechnungen auf Netzebene (objektspezifisch im Analysenetz) wurde zwischen ge-

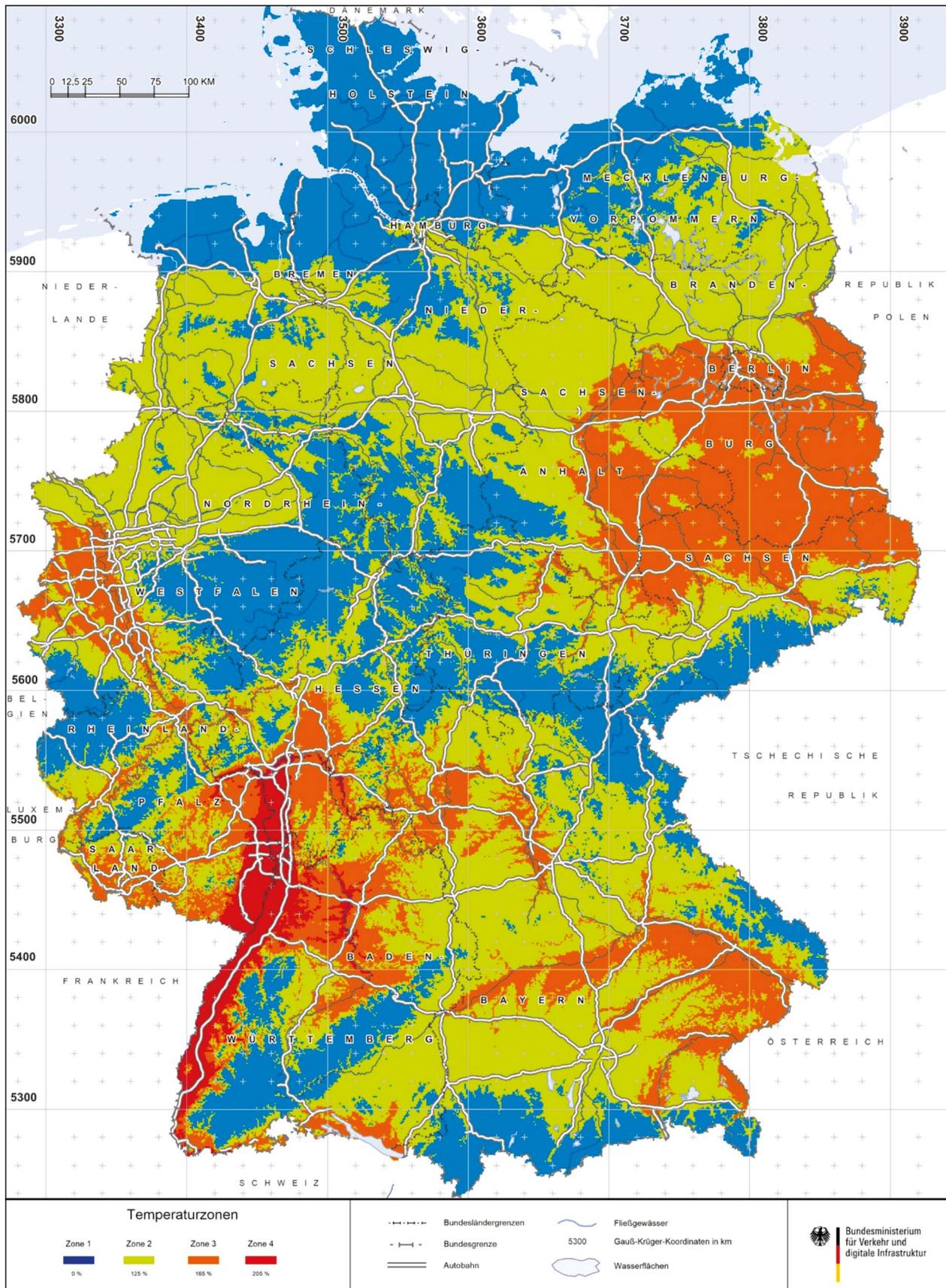


Bild 22: Temperaturzonenkarte Deutschland (seitens des Auftraggebers zur Verfügung gestellt)

bundenen Befestigungsschichten ein Schichtenverbund von 100 % angenommen, zwischen gebundenen und ungebundenen Schichten wurde hingegen im Berechnungsmodell „kein Schichtenverbund“ definiert. Die auf Netzebene nach den RSO Asphalt durchgeführten Berechnungen wurden unter Einbe-

ziehung der aus der Beprobung realer Streckenabschnitte resultierenden Materialkenngrößen (abgeleitete allgemeingültige Materialeigenschaften vgl. Kapitel 4.1) und den jeweils zuzuordnenden Verkehrsbelastungen und Temperaturzonen vorgenommen.

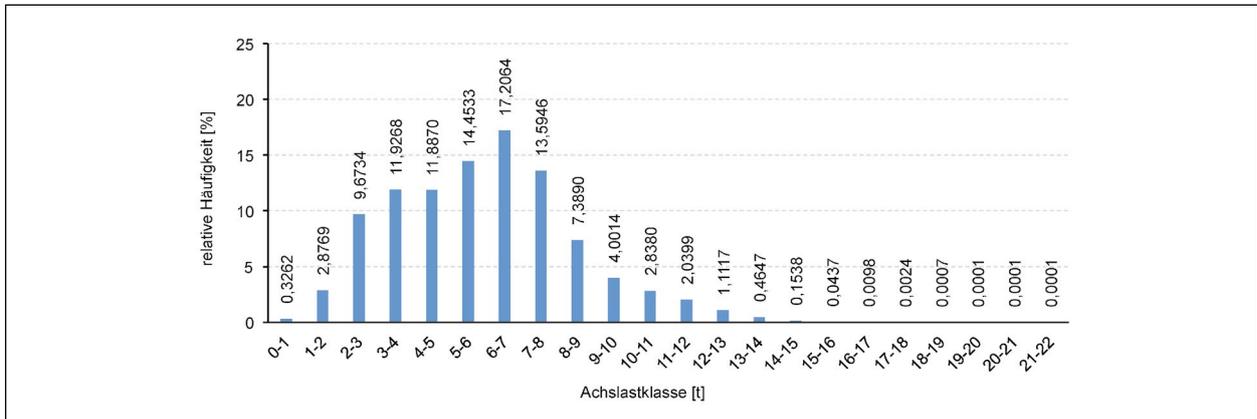


Bild 23: Häufigkeitsverteilung des Achslastkollektives BAB Fernverkehr, rel. Häufigkeit für 1-t-Achslastklassen (seitens des Auftraggebers zur Verfügung gestellt)

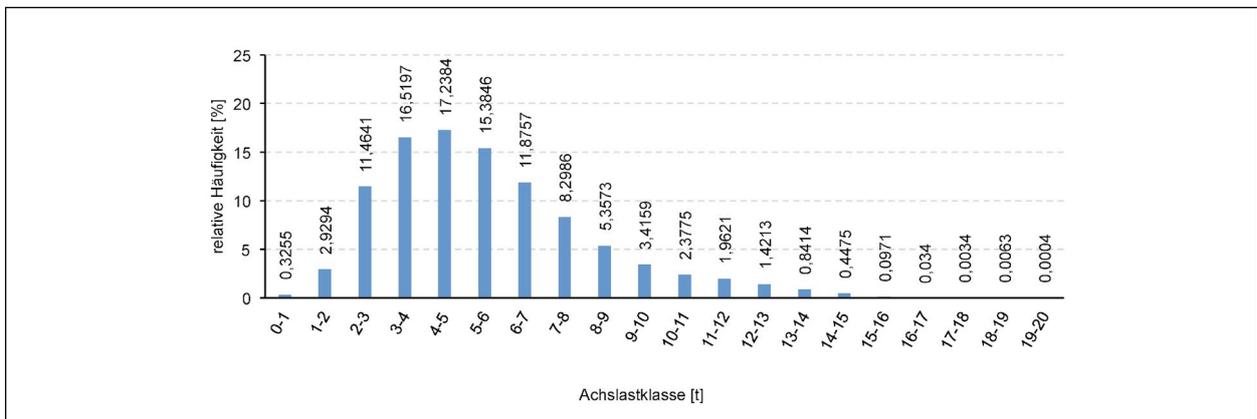


Bild 24: Häufigkeitsverteilung des Achslastkollektives Mülsen (HENNIG 2009)

Zeile der Tafel 1	Bk100	Bk32	Bk10	Bk3,2	Bk1,8
1	1.867	1.360	1.037	1.031	1.093
2.1	8.398	6.249	2.958	-	-
2.2	4.053	3.073	2.337	1.316	1.869
2.3	3.543	2.610	1.894	959	2.503
3	4.766	3.791	3.140	2.015	3.738
4	5.060	4.116	3.509	2.269	4.451
5 (STS)	4.534	3.649	3.030	1.730	3.043
5 (KTS)	4.558	3.732	3.202	1.838	4.649
Zeile der Tafel 4	Bk100	Bk32	Bk10	Bk3,2	Bk1,8
1 (vgOB)	242	152	101	51	43

Tab. 12: Anpassungsfaktoren (AF) deterministisches Verfahren, ermittelt für jede Zeile der Tafel 1 (bzw. Tafel 4) der RStO 12 in Abhängigkeit der jeweiligen Belastungsklasse (seitens des Auftraggebers zur Verfügung gestellt)

Für die Berechnung der zu erwartenden Restnutzungsdauern der fünf Untersuchungsabschnitte auf der Staatsstraße 286 bei Mülsen (Kapitel 4.2.7) wurden hingegen die tatsächlich vorhandenen Materialeigenschaften der in den einzelnen Abschnitten bei der Beprobung (Bohrkernentnahme) vorgefundenen Materialien berücksichtigt. Zusätzliche objektspezifische Annahmen sind in Kapitel 4.2.7 dargestellt.

Die Berechnungen nach dem AP 9/S erfolgten auf Netzebene mit dem in den Straßendatenbanken für die einzelnen Strecken hinterlegten Schichtaufbau und -alter. Für die Vergleichsrechnungen auf Objektebene (d. h. die tatsächlich beprobten Abschnitte) wurden die am Bohrkern bestimmten Schichtdicken verwendet.

4.2.2 Vergleichsrechnungen auf Netzebene

Voraussetzung für die Vergleichsrechnungen auf Netzebene ist zum einen das Vorhandensein allgemeingültiger Materialeigenschaften für Asphaltdeck-, -binder- und -tragschichtgemische und zum anderen die Definition mindestens eines synthetischen Analysenetzes bestehend aus ca. 500 realen Straßenabschnitten, die auf das gesamte Einzugsgebiet der Bundesrepublik Deutschland verteilt sind. Aus der Kombination der in Kapitel 4.1 definierten allgemeingültigen Materialeigenschaften und des Analysenetzes ergibt sich die Betrachtung einzelner Objekte auf Netzebene.

Zur Bildung des Analysenetzes wurden zunächst die Beprobungsstrecken lokalisiert und dem Netzknoten-Stationierungs-System zugeordnet. Die beprobten Strecken bilden das Grundgerüst des Analysenetzes. Um die angestrebte Anzahl an Untersuchungsabschnitten (von ca. 500 Einzelabschnitten) zu erreichen wurden des Weiteren benachbarte Abschnitte und die Dauermessstrecke auf der A5 hinzugezogen (Bild 25). Da der überwiegende Teil an Beprobungsstrecken auf Autobahnen liegt und die Datenqualität und Datenvollständigkeit für diese Bereiche hinreichend sichergestellt ist, beinhaltet das Analysenetz nur BAB-Abschnitte. Für diese wurde eine fiktive Abschnittsfolgetabelle (ABF) erstellt.

Um einen ersten Eindruck über die Strecken des Analysenetzes zu erhalten, ist in Bild 26 die Anzahl der im Analysenetz enthaltenen homogenen Abschnitte, unterteilt nach der Anzahl der gebundenen

Schichten, dargestellt. Dabei wird ersichtlich, dass in dem untersuchten Analysenetz auch Strecken mit einer merklich größeren Anzahl an gebundenen Schichten vorhanden sind.

In Bild 27 sind des Weiteren alle Schichten im Analysenetz mit identischem Baujahr zahlenmäßig zusammengefasst und die daraus resultierende kumulierte Häufigkeit mit abnehmendem Schichtalter dargestellt. Die Bildung der kumulierten Häufigkeit wird in Kapitel 4.2.5 erläutert. Bild 26 und Bild 27 verdeutlichen, dass sich in dem untersuchten Analysenetz Abschnitte mit auffällig vielen Asphalt-schichten befinden und dass im Analysenetz Strecken mit historischen Aufbauten enthalten sind. Eine detailliertere Betrachtung der dem Analysenetz zugrundeliegenden Datenbankeinträge bestätigt, dass eine eindeutige Korrelation zwischen Schichtanzahl und Schichthistorie besteht. Diese Erkenntnis ist für die Interpretation der Berechnungsergebnisse wichtig.

Nachdem eine Vorauswahl an Untersuchungsabschnitten zur Bildung des Analysenetzes erfolgt war, konnten alle erforderlichen Datengruppen (vgl. Tabelle 2) anhand der jeweils zugehörigen Netzknotenabschnitte dem Analysenetz zugeordnet werden. Zusätzlich wurde die Lokalisierung der Strecken über Gauß-Krüger-Koordinaten vorgehalten (über Mittelwert aus von-Netzknoten (VNK) und nach-Netzknoten (NNK) der betrachteten Strecken), um bei Bedarf die klimatische Einordnung auf Projektebene automatisiert vornehmen zu können. Für die Ermittlung der Gauß-Krüger-Koordinaten wurde die Mitte des Netzknotenabschnittes gewählt, auf dem sich der betrachtete homogene Abschnitt befindet. Dabei wurde keine Unterscheidung nach Fahrstreifen bzw. Stationierung vorgesehen. Diese vereinfachte Berechnung wurde bei der Betrachtung des Aufwandes für den Rechenalgorithmus hinsichtlich des Nutzens als hinreichend erachtet.

Aus den abgeleiteten allgemeingültigen Materialparametern (vgl. Kapitel 4.1) resultieren je Abschnitt (Objekt) 81 mögliche Modellvarianten, die sich in den Materialeigenschaften der jeweils maßgebenden Asphalttragschicht in Kombination mit den darüber liegenden Asphaltdeck- und -binderschichten unterscheiden (vgl. Tabelle 13).

Für ein Analysenetz, bestehend aus 500 Untersuchungsabschnitten, ergeben sich somit 40.500 Einzelrechnungen (81 Modellvarianten je Untersu-

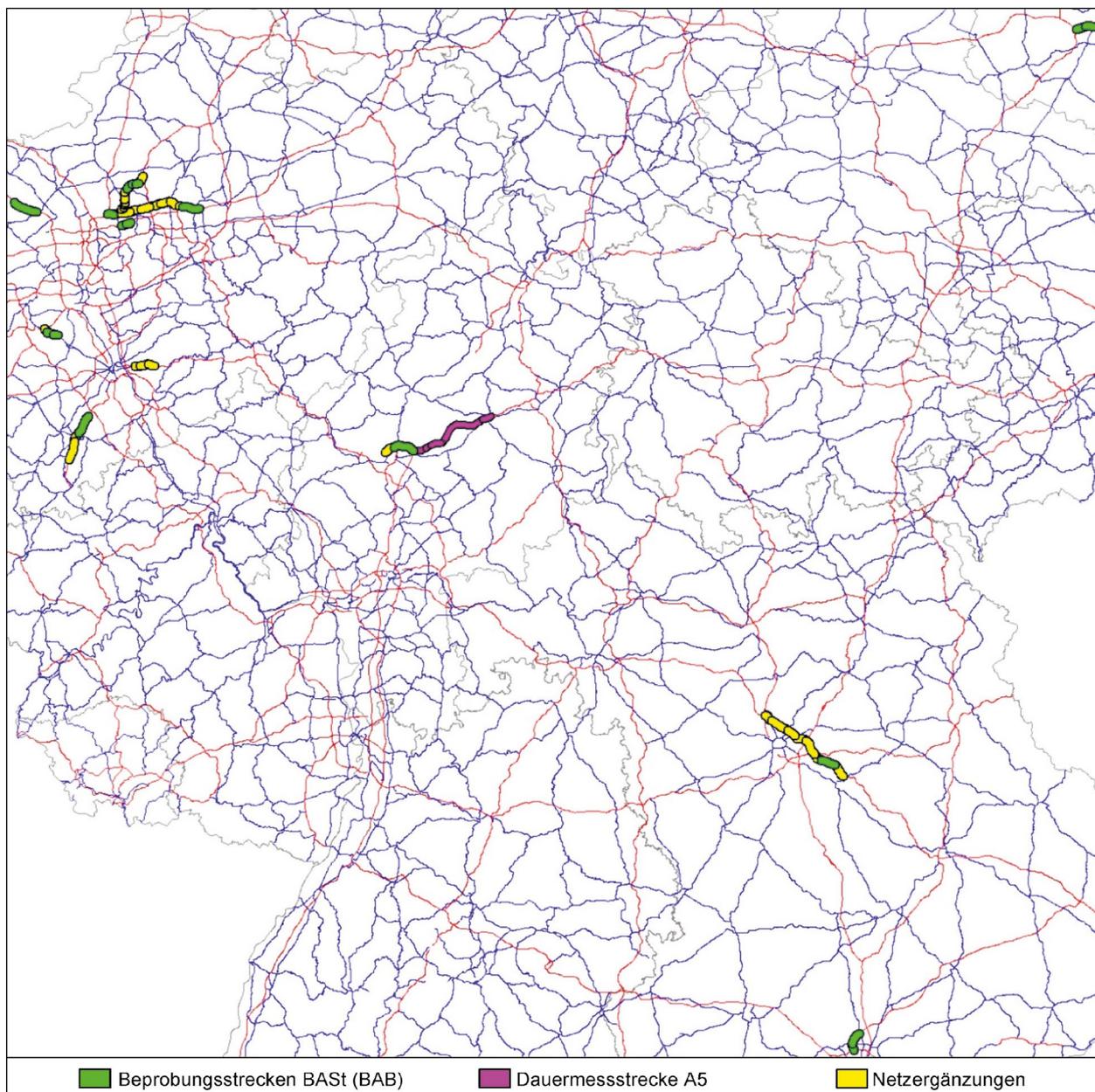


Bild 25: Ausschnitt Bundesfernstraßennetz sowie Markierung des Analysenetzes

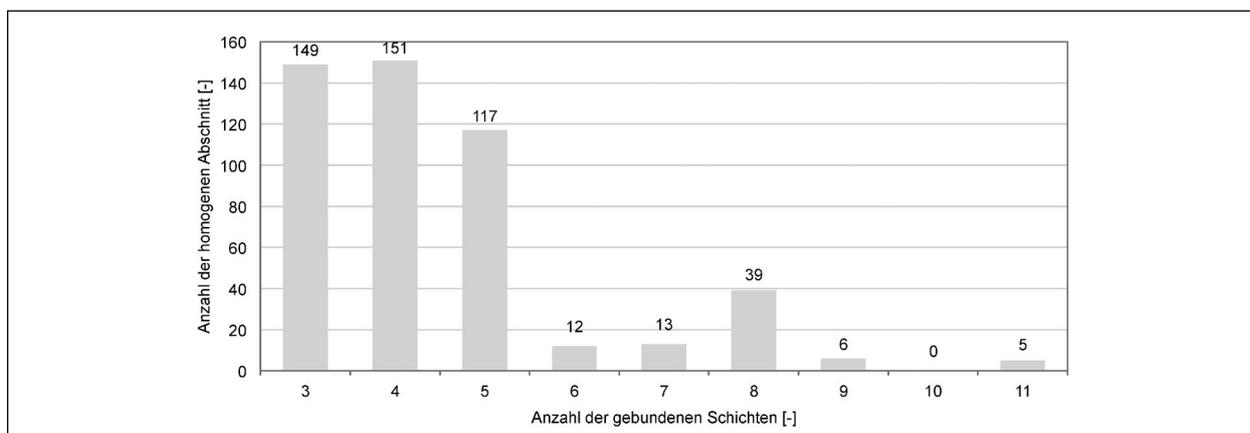


Bild 26: Anzahl der im Analysenetz enthaltenen homogenen Abschnitte, unterteilt nach der Anzahl der gebundenen Schichten nach BRZUSKA (2018)

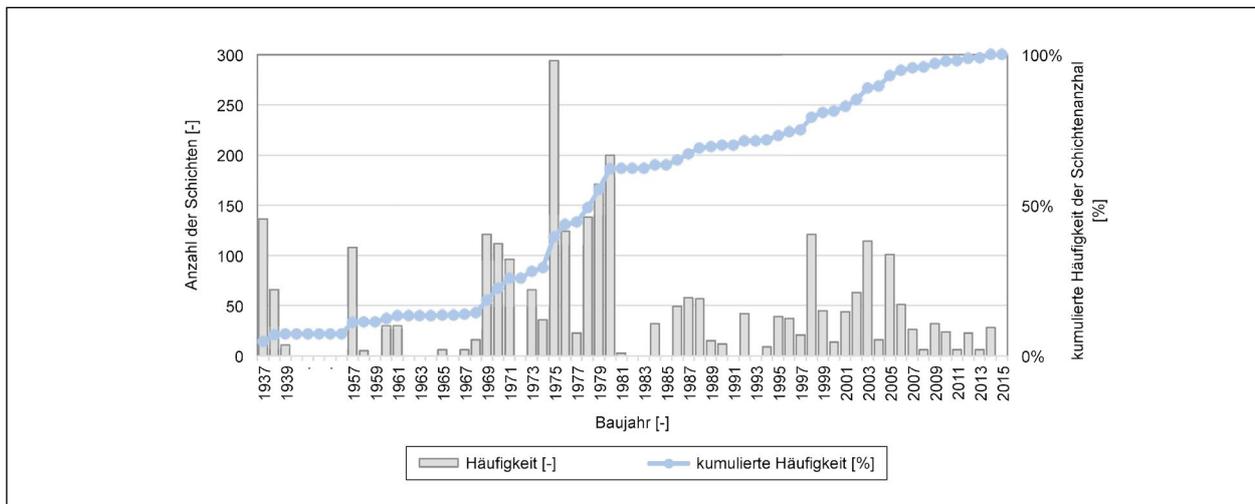


Bild 27: Altersverteilung der im Analysenetze enthaltenen Schichten nach BRZUSKA (2018)

chungsabschnitt). Zur Begrenzung des Rechenaufwandes wurde in Absprache mit dem Auftraggeber vereinbart, für alle zu berücksichtigenden Asphaltdeckschichtvarianten grundsätzlich die Eigenschaften eines Asphaltdeckschichtgemisches mittlerer Steifigkeit einzubeziehen. Somit ergeben sich je Abschnitt 27 mögliche Modellvarianten, aus denen 13.500 Einzelrechnungen resultieren. Ergänzend hierzu wurden weitere Berechnungen durchgeführt, die nachfolgend ebenfalls detailliert beschrieben werden. Eine Auflistung aller durchgeführten Prognoserechnungen wird abschließend in Tabelle 14 bereitgestellt.

Um die Durchführung von über 13.500 Einzelrechnungen weitestgehend automatisiert zu ermöglichen, wurde das Programm ADtoPave, mit dem die Vergleichsrechnungen nach den RSO Asphalt auf Projektebene erfolgen, für eine effektive Nutzung angepasst. D. h., es wurde eine Schnittstelle im ADtoPave-Programm geschaffen, die es erlaubt, mittels Serienrechnung notwendige Eingangsdaten (wie Aufbaudaten, Verkehrsbelastung und klimatische Einordnung) systematisch zu gebrauchen, sodass eine händische Verarbeitung der abschnittsspezifischen Eingangsdaten weitestgehend entfällt.

Mithilfe der Schnittstelle werden die Daten zu Lokalisierung, Querschnitt, Befestigungsaufbau und Verkehrsbelastung übergeben. Die aktuelle Definition der Schnittstelle erlaubt die Berücksichtigung von bis zu 12 Einzelschichten eines Abschnittes. Damit können die Berechnungen nicht nur auf Basis des PMS-Schichtmodells mit sechs Schichten nach der vertikalen Schichtzusammenfassung, sondern auch mit der in der Datenbank hinterlegten vollständigen

Schichtfolge vorgenommen werden, was grundsätzlich der in den RSO Asphalt beschriebenen Vorgehensweise entspricht.

Bild 28 zeigt die Struktur der als Schnittstelle fungierenden Datei. Die Datei umfasst 95 Spalten und beinhaltet alle wesentlichen Informationen zu den Unterabschnitten des Analysenetzes. Grau hinterlegte Spalten sind händisch zu vervollständigen bevor eine Serienrechnung gestartet werden kann. Neben den zu verwendenden allgemeingültigen Materialparametern (definiert über eine Materialnummer) ist in Spalte 81 die Nummer der Schicht einzutragen, für die ein rechnerischer Nachweis durchzuführen ist. Je Befestigungsaufbau kann nur ein Nachweispunkt festgelegt werden. Sollen auf einem Abschnitt (für eine Befestigungsvariante) mehrere Nachweispunkte berücksichtigt werden, so ist der jeweilige Datensatz (Zeile im Datenblatt) zu duplizieren und ein neuer Nachweispunkt einzutragen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens erfolgt die Nachweisführung grundsätzlich nur für Asphaltbefestigungen, im Speziellen für die jeweils für den Ermüdungsnachweis der Asphalttragschichten als maßgebend definierte Asphalttschicht. In Ausnahmefällen, bei Vorhandensein besonders alter Befestigungsschichten (beispielsweise von 1937), wurde der Nachweispunkt für den Ermüdungsnachweis an die Unterseite einer jüngeren Asphalttschicht, das heißt an die Unterseite der untersten als maßgebend anzunehmenden Asphalttschicht, gelegt.

Für hydraulisch gebundene Tragschichten unter Asphalttragschichten wurde in Absprache mit dem Auftraggeber, kein Nachweis innerhalb des Forschungsvorhabens durchgeführt.

$f_{(A)}$	Achszahlfaktor	Anz. Schichten	Anzahl Schichten im Konstruktionsaufbau (maximal 12, fixe Feldgröße)
$f_{(1)}$	Fahrstreifenfaktor		
$f_{(2)}$	Fahrstreifenbreitenfaktor	NP SNr.	Schichtnummer für Nachweispunkt
$f_{(3)}$	Steigungsfaktor	AF	Anpassungsfaktor für Berechnung, wenn manuelle Vorgabe erfolgen soll
Bk	Belastungsklasse		

Schicht-/Materialzuordnung PMS		Schicht-/Materialzuordnung ADtoPave		
KENNUNG	LANGTEXT	KENNUNG SCHICHTART	KENNUNG MATERIALART	LANGTEXT
D SO	Deckschicht (oben; Hocheinbau)			
OB	Oberflächenbehandlung	?		
MS	bit. Schlämme/Mikrobelag	?		
DB	Dünnschichtbelag	ADS	ADS_1,..., ADS_3	Asphaltdeckschicht mit Asphaltdeckschichtmaterial 1...3
AB	Asphaltbetondeckschicht	ADS	ADS_1,..., ADS_3	Asphaltdeckschicht mit Asphaltdeckschichtmaterial 1...3
GA	Gußasphalt	ADS	ADS_1,..., ADS_3	Asphaltdeckschicht mit Asphaltdeckschichtmaterial 1...3
SMA	Spülmastixasphalt	ADS	ADS_1,..., ADS_3	Asphaltdeckschicht mit Asphaltdeckschichtmaterial 1...3
D S	Deckschicht			
OB	Oberflächenbehandlung	?		
MS	bit. Schlämme/Mikrobelag	?		
DB	Dünnschichtbelag	ADS	ADS_1,..., ADS_3	Asphaltdeckschicht mit Asphaltdeckschichtmaterial 1...3
AB	Asphaltbetondeckschicht	ADS	ADS_1,..., ADS_3	Asphaltdeckschicht mit Asphaltdeckschichtmaterial 1...3
GA	Gußasphalt	ADS	ADS_1,..., ADS_3	Asphaltdeckschicht mit Asphaltdeckschichtmaterial 1...3
SMA	Spülmastixasphalt	ADS	ADS_1,..., ADS_3	Asphaltdeckschicht mit Asphaltdeckschichtmaterial 1...3
MAK	Makadamdecke (hohlraumreich)	?		
PF	Pflaster	?		
BET	Betondecke	?		
BEF	Fertigteilplatten Fahrbahn	?		
BEP	Fertigteilplatten (außer Fahrbahn)	?		
TDS	Tragdeckschicht	ATS	ATS_1,..., ATS_9	Asphalttragschicht mit Asphalttragschichtmaterial 1...9
ABR	Asphaltbeton (Recycling)	ADS	ADS_1,..., ADS_3	Asphaltdeckschicht mit Asphaltdeckschichtmaterial 1...3
B S	Binderschicht			
ABB	Asphalt(beton)binder	ABS	ABS_1,..., ABS_3	Asphaltbinderschicht mit Asphaltbinderschichtmaterial 1...3
ARB	Asphalt(recycling)binder	ABS	ABS_1,..., ABS_3	Asphaltbinderschicht mit Asphaltbinderschichtmaterial 1...3
T S2	obere Tragschicht			
BGK	bit. Tragschicht - gebrochenes Korn	ATS	ATS_1,..., ATS_9	Asphalttragschicht mit Asphalttragschichtmaterial 1...9
BRK	bit. Tragschicht - Rundkorn	ATS	ATS_1,..., ATS_9	Asphalttragschicht mit Asphalttragschichtmaterial 1...9
HGK	hydraul. Tragschicht - gebrochenes Korn	HGT	HGT	hydraulisch gebundene Tragschicht
HRK	hydraul. Tragschicht - Rundkorn	HGT	HGT	hydraulisch gebundene Tragschicht
UAB	überbaute Asphaltbetondecke	ADS	ADS_1,..., ADS_3	Asphaltdeckschicht mit Asphaltdeckschichtmaterial 1...3
UMK	überbaute Makadamdecke	HGT	TS_1000	Berücksichtigung wie HGT, E: 1000 MPa
UPF	überbautes Pflaster	HGT	TS_400	Berücksichtigung wie HGT, E: 400 MPa
UZB	überbaute Betondecke	HGT	HGT	hydraulisch gebundene Tragschicht
T S1	untere Tragschicht			
BGK	bit. Tragschicht - gebrochenes Korn	ATS	ATS_1,..., ATS_9	Asphalttragschicht mit Asphalttragschichtmaterial 1...9
BRK	bit. Tragschicht - Rundkorn	ATS	ATS_1,..., ATS_9	Asphalttragschicht mit Asphalttragschichtmaterial 1...9
HGK	hydraul. Tragschicht - gebrochenes Korn	HGT	HGT	hydraulisch gebundene Tragschicht, E: 2000 MPa/5000 MPa
HRK	hydraul. Tragschicht - Rundkorn	HGT	HGT	hydraulisch gebundene Tragschicht, E: 2000 MPa/5000 MPa
UAB	überbaute Asphaltbetondecke	ADS	ADS_1,..., ADS_3	Asphaltdeckschicht mit Asphaltdeckschichtmaterial 1...3
UMK	überbaute Makadamdecke	HGT	TS_1000	Berücksichtigung wie HGT, E: 1000 MPa
UPF	überbautes Pflaster	HGT	TS_400	Berücksichtigung wie HGT, E: 400 MPa
UZB	überbaute Betondecke	HGT	HGT	hydraulisch gebundene Tragschicht, E: 2000 MPa/5000 MPa
VFS	Verfestigung	HGT	VFS	Verfestigung, Berücksichtigung wie HGT, E: 2000 MPa/5000 MPa
GBS	Schottertragschicht (gebr. Gestein)	ToB	STS_150	Schottertragschicht, EV2: 150 MPa, max ES: 300 MPa
KIG	Kiestragschicht mit gebrochenerem Gestein	ToB	KTS_150	Kiestragschicht, EV2: 150 MPa, max ES: 300 MPa
KIS	Kiestragschicht	ToB	KTS_150	Kiestragschicht, EV2: 150 MPa, max ES: 300 MPa
PKL	Packlage	ToB	ToB_150	ungebundene Tragschicht, EV2: 150 MPa, max ES: 300 MPa
GSB	Gemische aus Splitt und Brechsand	ToB	ToB_150	ungebundene Tragschicht, EV2: 150 MPa, max ES: 300 MPa
URC	ungebund. TS aus Recyclingbaustoffen	ToB	ToB_120	ungebundene Tragschicht, EV2: 120 MPa, max ES: 250 MPa
AUF	Auffüllung	?		
DAM	Dammerschüttung	?		
AFS	Ausbauasphalt ohne Bindemittel	ToB	STS_150	Schottertragschicht, EV2: 150 MPa, max ES: 300 MPa
F S S	Frostschuttschicht			
FGB	gebrochenes Gestein	FSS	FSS_120	Frostschuttschicht, EV2: 120 MPa, max ES: 250 MPa
FKI	Kies oder Kiessand	FSS	FSS_120	Frostschuttschicht, EV2: 120 MPa, max ES: 250 MPa
PKL	Packlage	ToB	ToB_150	ungebundene Tragschicht, EV2: 150 MPa, max ES: 300 MPa
FRC	Recyclingmaterial	FSS	FSS_120	Frostschuttschicht, EV2: 120 MPa, max ES: 250 MPa
U	Unterg rund			
UNF	Unterg rund nicht frostsicher	Boden	Boden_15	Boden, EV2: 15 MPa
UFS	Unterg rund frostsicher	Boden	Boden_45	Boden, EV2: 45 MPa
UVF	Unterg rund verfestigt	Boden	Boden_80	Boden, EV2: 80 MPa
-	keine Angaben zum Unterg rund	Boden	Boden_45	Boden, EV2: 45 MPa

Bild 29: Übersetzung der Schicht-/Materialzuordnung aus der vorhandenen PMS-Struktur in die vorgegebene ADtoPave-Struktur

Zusätzlich übergeben werden die Kennung/Materialbezeichnung sowie die Schichtdicke und das Baujahr einer jeden Schicht und das jeweilige Jahr der Zustandserfassung.

ID-Nr. laufende Streckennummer

NP für SNr. Schichtnummer für Nachweispunkt

Nachweise Art des Nachweises (ASP etc.)

ND (Ber.) berechnete Nutzungsdauer [Jahre]; bezogen auf 100 % Ermüdung, maximal 100 Jahre

Erm.-Status berechneter Ermüdungsstatus [%]; bezogen auf 100 Jahre ND

Baujahr Baujahr der maßgebenden Trag-schicht

Jahr ZEF Jahr der Zustandserfassung

Rest ND Restnutzungsdauer bezogen auf bisherige Nutzungsdauer

Kl.-Zone Klimazone aus KIST Karte

AF gewählter Anpassungsfaktor für Berechnung

Nach erfolgreichem Einlesen und Übersetzen der Schnittstellendatei können die Vergleichsrechnungen nach den RSO Asphalt durchgeführt werden. Für jede Einzelrechnung wird eine Berechnungsdatei abgelegt, die differenziert betrachtet werden kann. Die Ergebnisse (insbesondere Nutzungsdauern bzw. Restnutzungsdauern) aller Einzelrechnungen, zugehörig zu einer Serienrechnung, sowie wesentliche Berechnungsannahmen, werden in einer Ausgabedatei zusammengefasst (vgl. Bild 31).

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden grundsätzlich drei Asphaltdeckschichtgemische

Eingangsdaten aus PMS Übergabe													
ID-Nr.	HW GK	RW GK	Kl.-Zone	DTV(SV)	Z.-SV	f(A)	f(1)	f(2)	f(3)	BK	Anz. Schichten	NP SNr.	AF
1	5610969,54	3337609,23	T.-Zone 2	3890	3	4,5	0,45	1,1	1	100	4	3	8398
2	5610969,54	3337609,23	T.-Zone 2	3890	3	4,5	0,45	1,1	1	100	5	3	8398
3	5610969,54	3337609,23	T.-Zone 2	3890	3	4,5	0,45	1,1	1	100	4	3	8398
4	5610969,54	3337609,23	T.-Zone 2	3890	3	4,5	0,45	1,1	1	100	4	3	8398
5	5610969,54	3337609,23	T.-Zone 2	3890	3	4,5	0,45	1,1	1	100	5	3	8398
6	5610969,54	3337609,23	T.-Zone 2	3890	3	4,5	0,45	1,1	1	100	5	3	8398
7	5610969,54	3337609,23	T.-Zone 2	3890	3	4,5	0,45	1,1	1	100	4	3	8398
8	5612833,05	3338683,97	T.-Zone 2	5169	3	4,5	0,45	1	1	100	5	3	8398
9	5612833,05	3338683,97	T.-Zone 2	5238	3	4,5	0,45	1	1	100	6	4	8398
10	5622290,88	3343073,69	T.-Zone 2	5298	3	4,5	0,45	1	1	100	5	3	8398

Bild 30: Aus Schnittstellendatei gefilterte Eingangsdaten, mit Angabe der innerhalb von ADtoPave automatisiert ermittelten Klimazonen

Ergebnisdaten für PMS Berechnung									
ID-Nr.	NP für SNr.	Nachweis	ND (Ber.)	Erm.-Status	Baujahr	Jahr ZEF	Rest ND	Kl.-Zone	AF
1	3	ASP	57,8	403,6	2003	2014	46,8	T.-Zone 2	8398
2	3	ASP	63,3	331,4	1975	2014	24,3	T.-Zone 2	8398
3	3	ASP	57,8	403,6	2003	2014	46,8	T.-Zone 2	8398
4	3	ASP	57,8	403,6	2003	2014	46,8	T.-Zone 2	8398
5	3	ASP	63,3	331,4	1975	2014	24,3	T.-Zone 2	8398
6	3	ASP	63,3	331,4	1975	2014	24,3	T.-Zone 2	8398
7	3	ASP	57,8	403,6	2004	2014	47,8	T.-Zone 2	8398
8	3	ASP	58,1	398,5	1975	2014	19,1	T.-Zone 2	8398
9	4	ASP	34	1000	1984	2014	4	T.-Zone 2	8398
10	3	ASP	57,4	408,5	1975	2014	18,4	T.-Zone 2	8398

Bild 31: Ausgabedatei von ADtoPave

(ADS_1...ADS_3), drei Asphaltbinderschichtgemische (ABS_1...ABS_3) und neun Asphalttragschichtgemische (ATS_1...ATS_9) als mögliche Gemischvarianten definiert (vgl. Bild 29). Tabelle 13 gibt eine Übersicht über die (in ADtoPave) verwendeten Materialbezeichnungen für Asphaltgemische sowie die jeweils hinterlegten tatsächlichen Materialeigenschaften, repräsentiert durch die abgeleiteten allgemeingültigen Materialeigenschaften (vgl. Tabelle 10 und Tabelle 11). Die neun fiktiven Asphalttragschichtgemische ergeben sich aus der Kreuzkombination von drei Hauptkurven (oben, mitte, unten) mit drei unterschiedlichen Ermüdungsfunktionen (oben, mitte, unten). „Best case“ und „worst case“ Szenarien, die die Materialkombinationen ATS_1 und ATS_9 berücksichtigen, sind grundsätzlich in der Praxis anzutreffen – wenn auch nur selten.

Für die Bewertung der auf Netzebene durchgeführten Berechnungen sollten die voran genannten Überlegungen Berücksichtigung finden und im Weiteren geprüft werden, ob eine gezielte, d. h. realitätsnahe, Auswahl anzunehmender Materialeigenschaften für jeden Prognoseabschnitt möglich ist.

4.2.3 Berechnungen nach den RSO Asphalt

Insgesamt wurden 28.000 Vergleichsrechnungen nach den RSO Asphalt auf Netzebene in die Überlegungen innerhalb dieses Forschungsvorhabens einbezogen.

Nachfolgend werden die Ergebnisse aller für das Forschungsvorhaben relevanten Vergleichsrechnungen auf Netzebene vorgestellt. Die Darstellung und der Vergleich der Einzelergebnisse erfolgt auf Grundlage der mittels ADtoPave berechneten Nutzungsdauern bzw. Restnutzungsdauern, welche als ADtoPave-Rückgabewerte vorab definiert wurden und als zusätzliche Eingangsdaten für sich anschließende PMS-Berechnungen fungieren. Sowohl die ermittelten Nutzungsdauern als auch Restnutzungsdauern wurden innerhalb des Berechnungsalgorithmus auf maximal 100 Jahre begrenzt, als Minimalwert wurde „0“ vereinbart, um sich rechnerisch ergebende negative Restnutzungsdauern zu vermeiden. Dies erweist sich als erforderlich, da die Berechnung der dargestellten Restnutzungsdauern durch Abzug der vermuteten Liegezeiten der betrachteten Straßenabschnitte von den mit ADtoPave errechneten Nutzungsdauern erfolgt. Die angenommenen Liegezeiten ergeben sich aus der Differenz des Jahres der Zustandserfassung, wel-

ches als fiktives Beprobungsjahr angenommen wird, und des Baujahres der Asphalttragschicht, welche für den Ermüdungsnachweis als maßgebend definiert wurde.

Bild 32 und Bild 33 zeigen exemplarisch die Nutzungsdauern bzw. Restnutzungsdauern für neun sogenannte Serienrechnungen. Als Serienrechnung wird ein Berechnungsvorgang bezeichnet, bei dem für alle in einer Schnittstellendatei/Übergabedatei aufgelisteten Befestigungsaufbauten Prognoserechnungen auf Objektebene automatisiert durchgeführt werden. Eine Übergabedatei beinhaltet im vorliegenden Projekt ca. 500 Aufbauten, die für äquivalent viele homogene Abschnitte stehen, die wiederum das innerhalb des Forschungsvorhabens definierte Analysenetz repräsentieren. In Summe beinhalten beide Bilder jeweils ca. 4.500 Datenpunkte, die somit neun Serienrechnungen á 500 Abschnitten also 4.500 Einzelrechnungen repräsentieren.

In Bild 32 und Bild 33 übereinanderliegende Datenpunkte (jeweils neun Werte) gehören zu einem homogenen Abschnitt, d. h. zu einem Objekt. Die jeweils zugrundeliegenden Modellvarianten (Berechnungsvarianten) übereinanderliegender Datenpunkte unterscheiden sich in der Wahl des Asphalttragschichtmaterials (ATS_1...ATS_9) für die jeweils für den Ermüdungsnachweis maßgebende Asphalttragschicht. Für Asphalttragschichten unterhalb der Nachweisschicht wurden hingegen stets mittlere Materialeigenschaften (ATS_5) angenommen. Für das Asphaltdeck- und -binderschichtmaterial wurden mittlere Materialeigenschaften (ADS_2 und ABS_2) angenommen.

Innerhalb einer Serienrechnung werden (soweit realistisch) die Materialeigenschaften der Asphaltdeck-, -binder- und Asphalttragschichtmaterialien i. d. R. nicht variiert, sodass in diesem Fall eine Serienrechnung eine Modellvariante berücksichtigt (d. h. vergleichsweise identische Materialkombination in den unterschiedlichen Schichtarten verschiedener Prognoseabschnitte, gemäß Tabelle 13).

Aus der Kombination der ausgewählten Materialeigenschaften für ADS, ABS und ATS innerhalb einer Serienrechnung (d. h. in Abhängigkeit der gewählten Modellvariante, vgl. Tabelle 13) geht die Beschriftung einer jeden Serienrechnung mit jeweils drei Ziffern hervor (vgl. Tabelle 13). Die erste Ziffer definiert die Materialwahl für Asphaltdeckschichten, die zweite Ziffer die Materialwahl für Asphaltbinderschichten und die letzte Ziffer die Materialwahl für

die maßgebende Asphalttragschicht. Bei den Asphaltdeck- und -binderschichten steht „1“ für eine hohe Steifigkeit, „2“ für eine mittlere und „3“ für eine geringe Steifigkeit. Die Eigenschaften der Asphalttragschichten werden hingegen über neun verschiedene Ziffern definiert, die unterschiedliche Kombinationen aus Steifigkeit und Ermüdung kodieren (vgl. Tabelle 13). Beispielweise steht die Bezeichnung 225 einer Serienrechnung für ein Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichtmaterial mittlerer Steifigkeit sowie ein Asphalttragschichtmaterial mit mittlerer Steifigkeit sowie mittlerem Ermüdungsverhalten.

Symbole ähnlicher Farbrichtung (blau, rot/orange oder grün) repräsentieren Modellvarianten mit Asphalttragschichtmaterialien gleicher Steifigkeit in den maßgebenden Asphalttragschichten. Gleiche Symbole (Dreieck, Kreis, Raute) wiederum stehen für identische Ermüdungseigenschaften der Asphalttragschichtmaterialien in den maßgebenden Asphalttragschichten.

Aus den in Bild 32 und Bild 33 dargestellten Einzelergebnissen (auf Objektebene), lassen sich die in Bild 34 und Bild 35 zusammengefassten Abhängigkeiten formulieren. Die hier dargestellten Grafen

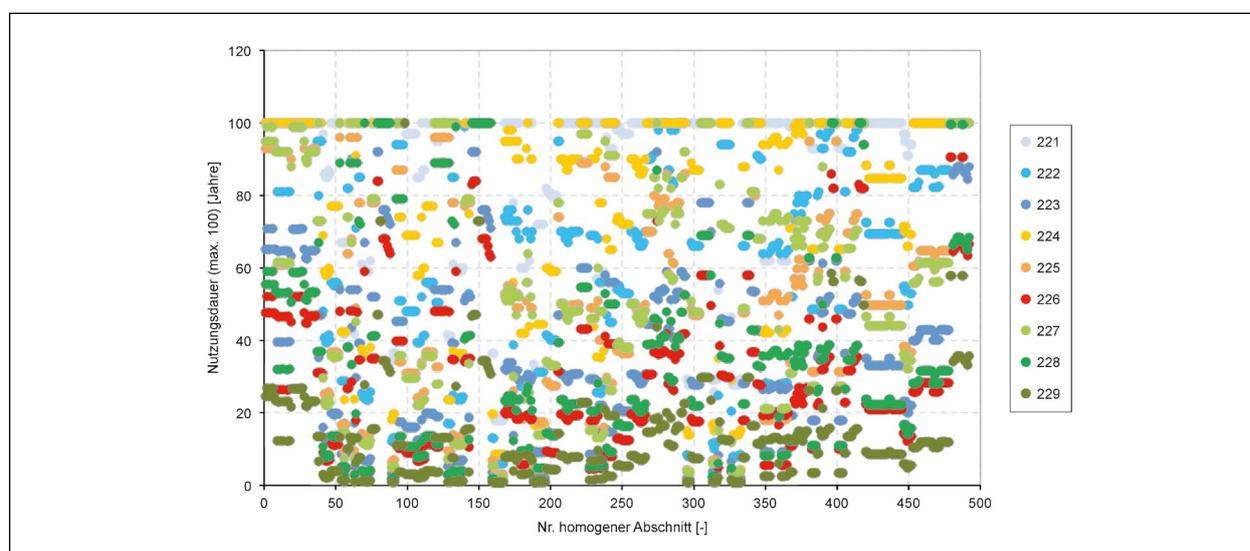


Bild 32: Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Abschnitts-ID; je Abschnitt für neun Befestigungsvarianten berechnet, die sich in der Wahl des Asphaltmaterials der für den Ermüdungsnachweis maßgebenden Asphalttragschicht unterscheiden; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %

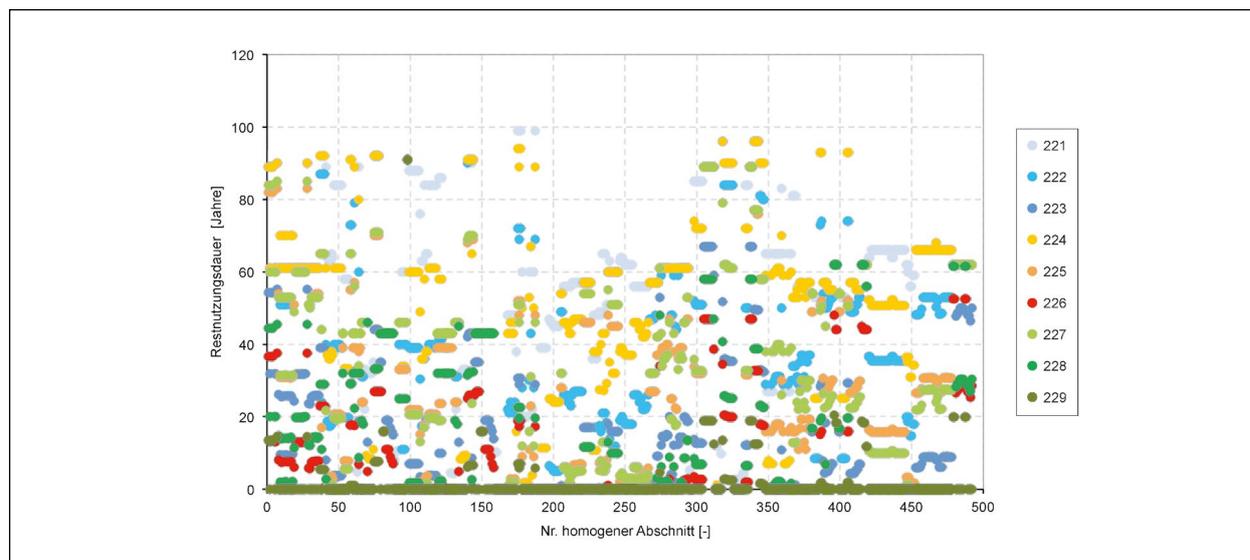


Bild 33: Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Abschnitts-ID; je Abschnitt für neun Befestigungsvarianten berechnet, die sich in der Wahl des Asphaltmaterials der für den Ermüdungsnachweis maßgebenden Asphalttragschicht unterscheiden; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %

zeigen die Abhängigkeit der Nutzungsdauern bzw. Restnutzungsdauern vom verwendeten Asphalttragschichtmaterial (ATS_1...ATS_9) auf Netzebene. Für diese Darstellung wurden die Einzelergebnisse des gesamten Analysenetzes, jeweils unter Einbeziehung eines Berechnungsmodells, d. h. bei Berücksichtigung des gleichen Asphalttragschichtmaterials in der Nachweisschicht für alle Netzabschnitte, der Größe nach sortiert und als zusammenhängende Funktion dargestellt. Eine Farbe repräsentiert somit die Berechnungsergebnisse für alle Einzelabschnitte des Analysenetzes (entspricht Darstellung auf Netzebene) unter Berücksichtigung identischer Asphalttragschichteigenschaften (Er-

müdung und Steifigkeit). Unterschiedliche Farben zeigen die Varianz der Ergebnisse bei Berücksichtigung unterschiedlicher Asphalttragschichteigenschaften. Aus „Nr. homogener Abschnitt“ (x-Achse Bild 32 und Bild 33) wird infolge der Sortierung nach Nutzungsdauern, jeweils für eine Serie gleicher Asphalttragschichteigenschaften (d. h. Punkte gleicher Farbe), ein sogenannter Laufindex (x-Achse Bild 34 ff.) eingeführt. Bild 34 und Bild 35 erlauben somit eine Aussage über den Ausfall vorhandener Asphalttragschichten auf Netzebene in Abhängigkeit größtmöglicher Materialvarianz (u. a. „best case“- und „worst case“-Szenarien) in der nachzuweisenden Asphalttragschicht.

Asphalt-deckschicht-material		Asphalt-binderschicht-material		Asphalt-tragschicht-material			Kodierung Materialkombination (Modellvariante) (1. Ziffer ADS, 2. Ziffer ABS, 3. Ziffer ATS)
Steifigkeit	Bezeichnung in ADtoPave	Steifigkeit	Bezeichnung in ADtoPave	Steifigkeit	Ermüdung	Bezeichnung in ADtoPave	
„oben“	ADS_1	„oben“	ABS_1	„oben“	„oben“	ATS_1	111 ... 119
		„mitte“	ABS_2		„mitte“	ATS_2	121 ... 129
		„unten“	ABS_3		„unten“	ATS_3	131 ... 139
„mitte“	ADS_2	„oben“	ABS_4	„mitte“	„oben“	ATS_4	211 ... 219
		„mitte“	ABS_5		„mitte“	ATS_5	221 ... 229
		„unten“	ABS_6		„unten“	ATS_6	231 ... 239
„unten“	ADS_3	„oben“	ABS_7	„unten“	„oben“	ATS_7	311 ... 319
		„mitte“	ABS_8		„mitte“	ATS_8	321 ... 329
		„unten“	ABS_9		„unten“	ATS_9	331 ... 339

Tab. 13: Kodierung der in ADtoPave verwendeten Materialbezeichnungen für Asphaltgemische sowie jeweils hinterlegte tatsächliche Materialeigenschaften, repräsentiert durch die abgeleiteten allgemeingültigen Materialeigenschaften

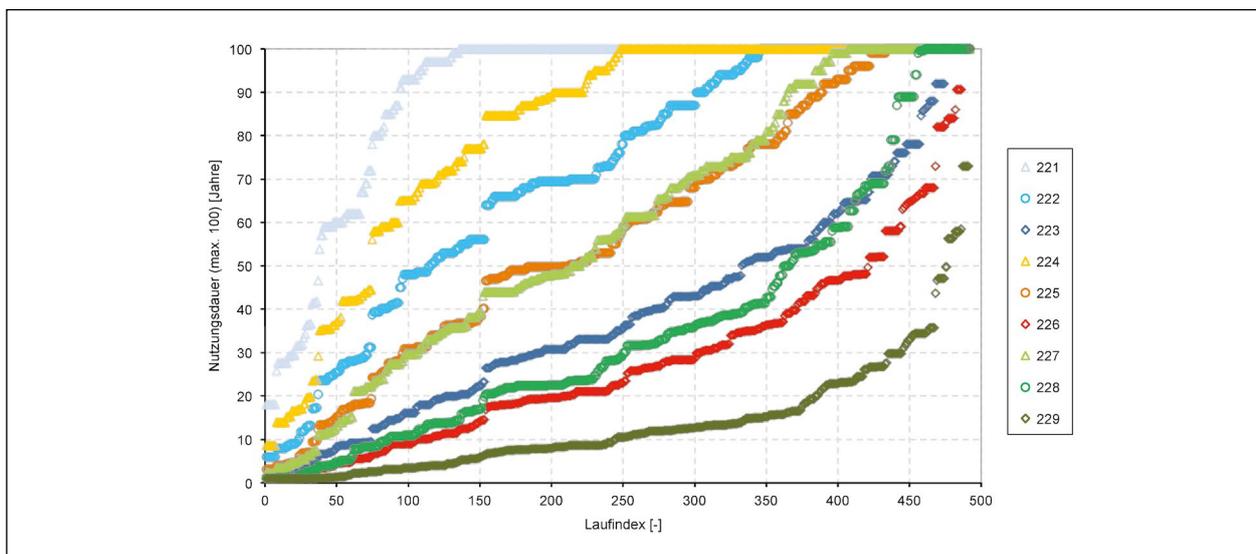


Bild 34: Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Nutzungsdauer; je Abschnitt für neun Befestigungsvarianten berechnet, die sich in der Wahl des Asphaltmaterials der für den Ermüdungsnachweis maßgebenden Asphalttragschicht unterscheiden; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %

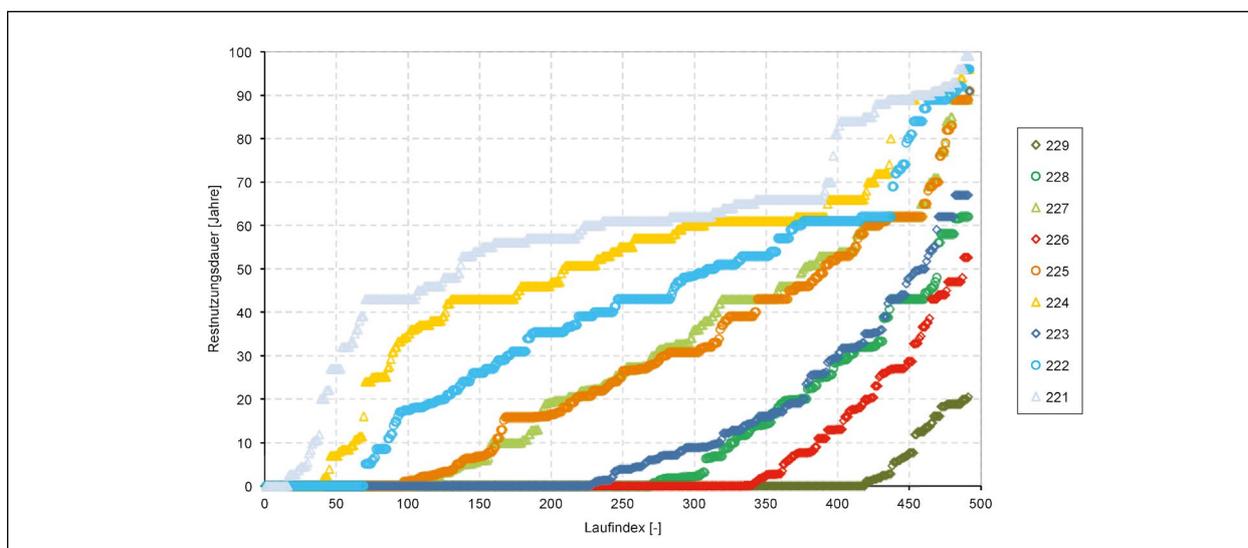


Bild 35: Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Restnutzungsdauer; je Abschnitt für neun Befestigungsvarianten berechnet, die sich in der Wahl des Asphaltmaterials der für den Ermüdungsnachweis maßgebenden Asphalttragschicht unterscheiden; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %

Auf Grundlage der berücksichtigten Varianz der einbezogenen Asphalttragschichteigenschaften lässt sich insbesondere aus Bild 34 und Bild 35 (Darstellung der Ergebnisse auf Netzebene) erwartungsgemäß ein größerer Einfluss der angenommenen Ermüdungseigenschaften gegenüber den ausgewählten Steifigkeitseigenschaften auf die berechneten Nutzungsdauern bzw. Restnutzungsdauern erkennen. Wird beispielsweise die Spreizung der Berechnungsergebnisse für die Varianten 227, 228 und 229 (mit Tragschichtmaterialien identischer Steifigkeit und variierenden Ermüdungseigenschaften) mit der Spreizung der Berechnungsergebnisse für die Varianten 223, 226 und 229 (mit Tragschichtmaterialien unterschiedlicher Steifigkeit und einheitlichen Ermüdungseigenschaften) verglichen, so bedingt eine Variation der Ermüdungseigenschaften eine größere Spreizung der Berechnungsergebnisse als eine Variation der Materialsteifigkeiten.

Zur Verdeutlichung des Einflusses des Schwerverkehrsanteils wurden vergleichend zu den vorangegangenen Berechnungen (Bild 32 bis Bild 35) Prognoserechnungen unter Vernachlässigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils durchgeführt. In Bild 36 werden die für unterschiedliche Zunahmen des Schwerverkehrsanteils (0 % und 3 %), sowie unter Annahme gleicher Modellvarianten, berechneten Restnutzungsdauern gegenübergestellt. Auf Grundlage dieser Betrachtungen kann festgehalten werden, dass eine Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 % zu einer sichtbaren Verringerung der Restnutzungsdauer führt.

Neben der Variation des Asphalttragschichtmaterials in den maßgebenden Asphalttragschichten wurde in einem weiteren Bearbeitungsschritt zusätzlich der Einfluss der Wahl der Binderschichtmaterialien untersucht. Hierfür wurden die vorangegangenen Berechnungen unter Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 % (vgl. Bild 32 bis Bild 36) wiederholt, wobei für sämtliche Asphaltbinderschichtmaterialien nun eine besonders hohe (ABS_1) bzw. besonders geringe (ABS_3) Steifigkeit angenommen wurde. Die Eigenschaften der Asphaltdeck- und -tragschichten wurden dabei nicht verändert (ADS_1; ATS_1...ATS_9). Folglich ergeben sich 18 weitere Serienrechnungen à 500 Einzelrechnungen. Die daraus resultierenden Restnutzungsdauern (für ABS_1 und ABS_3) sind in Bild 37 vergleichend dargestellt. Die den Bildern zugrundeliegenden Nutzungsdauern sind im Anhang dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Asphaltbinderschichtmaterial im Vergleich zu dem Asphalttragschichtmaterial nur einen sehr geringen Einfluss auf die Restnutzungsdauer hat, weshalb die Variation des Asphaltbinderschichtmaterials im vorliegenden Forschungsprojekt nicht weiterverfolgt wurde.

Im Gegensatz zum Einfluss der Wahl der Materialeigenschaften der Asphaltbinder- und Asphalttragschichten wurde der Einfluss der Asphaltdeckschichteigenschaften nur exemplarisch untersucht, und zwar für den Fall der Annahme eines Asphalttragschichtmaterials mittlerer Eigenschaften in den maßgebenden Asphalttragschichten bei variierenden Asphaltbinderschichteigenschaften. Somit er-

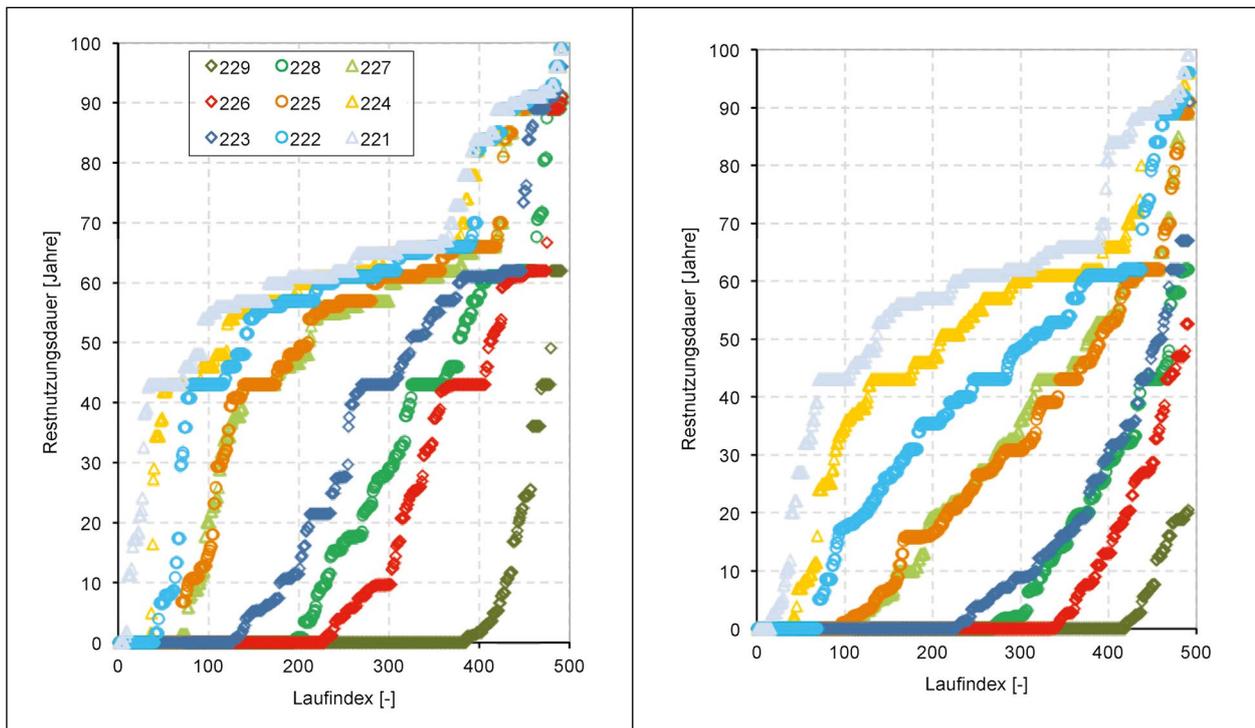


Bild 36: Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Restnutzungsdauer; je Abschnitt für neun Befestigungsvarianten berechnet, die sich in der Wahl des Asphaltmaterials der für den Ermüdungsnachweis maßgebenden Asphalttragschicht unterscheiden; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 0 % (links) und um 3 % (rechts)

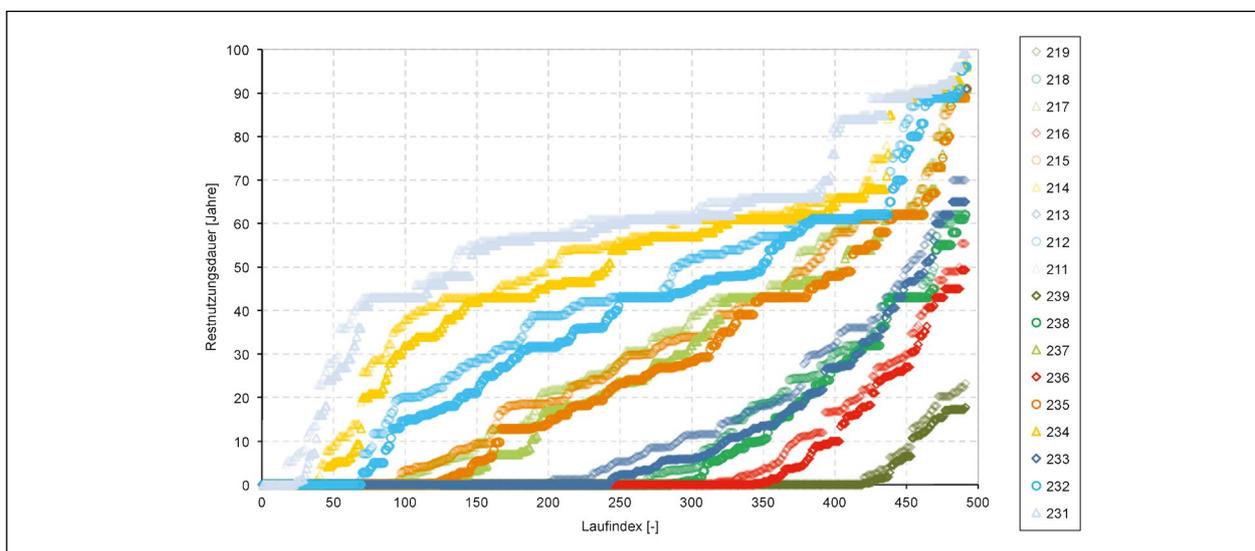


Bild 37: Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Restnutzungsdauer; je Abschnitt für 18 Befestigungsvarianten berechnet, die sich in der Wahl des Asphaltmaterials der Binderschichten und der für den Ermüdungsnachweis maßgebenden Asphalttragschicht unterscheiden; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %

geben sich sechs weitere Serienrechnungen à 500 Einzelrechnungen. Die zu vergleichenden Restnutzungsdauern (für ADS_1...ADS_3; ABS_1...ABS_3; ATS_5) sind in Bild 38 dargestellt. Die maximale Differenz der Restnutzungsdauern der Modellvariante 115 (ADS und ABS hohe Steifigkeit)

und 335 (ADS und ABS geringe Steifigkeit) beträgt 18 Jahre.

Eine vollständige Betrachtung des Einflusses der Variation der Asphaltdeckschichteigenschaften im Sinne der voran beschriebenen Prognoserechnun-

gen würde weitere 48 Serienrechnungen à 500 Einzelrechnungen infolge der zusätzlichen Variation der Asphalttragschichteigenschaften erfordern.

Aus Bild 37 und Bild 38 lässt sich bestätigend ableiten, dass das Steifigkeitsverhalten der Asphaltdeck- und -binderschichten der einzelnen Prognoseabschnitte im Vergleich zum Steifigkeits- und Ermüdungsverhalten der Asphalttragschichten nur einen geringen Einfluss auf die ermittelten Nutzungs- bzw. Restnutzungsdauern hat.

Um abschließend den Einfluss der für jeden homogenen Abschnitt angenommenen Temperaturzone zu bewerten, wurden für alle Schichten einer Seri-

enrechnung (d. h. für alle Untersuchungsabschnitte des Analysenetzes) mittlere Materialeigenschaften angenommen (ADS_2, ABS_2 und ATS_5) und vier weitere Serienrechnungen à 500 Einzelrechnungen durchgeführt. Innerhalb einer Serienrechnung wurde für alle Untersuchungsabschnitte die gleiche Temperaturzone (Temperaturzone Z1 bis Z4, vgl. Bild 22) angenommen. Die objektspezifischen Gauß-Krüger-Koordinaten für jeden Einzelabschnitt wurden somit nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse dieser vergleichenden Betrachtungen sind in Bild 39 dargestellt. Die maximale Differenz der berechneten Restnutzungsdauern bei Berücksichtigung einheitlicher Klimazonenzuordnungen beträgt 9

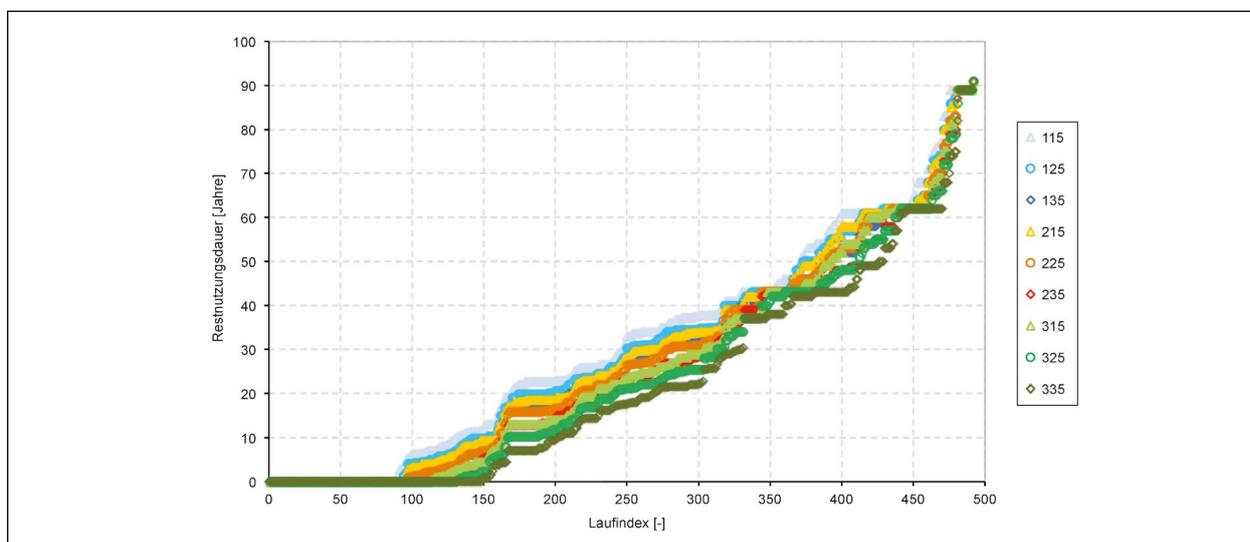


Bild 38: Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Restnutzungsdauer; je Abschnitt für neun Befestigungsvarianten berechnet, die sich in der Wahl des Asphaltdeck- und -binderschichtmaterials unterscheiden; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %

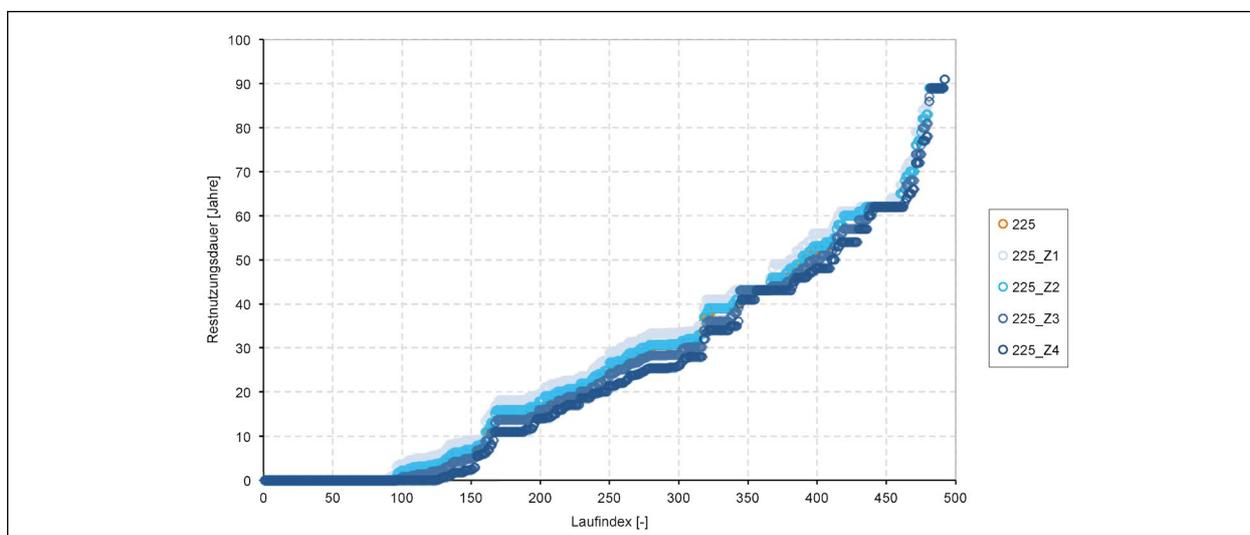


Bild 39: Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Restnutzungsdauer; je Abschnitt für eine Befestigungsvariante berechnet, Berechnungsvarianten unterscheiden sich in der Wahl der angenommenen Klimazone; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %

Jahre (d. h. Vergleich der Ergebnisse für Temperaturzone Z1 und Z4).

In Summe ergeben sich somit bisher 46 Serienrechnungen à 500 Einzelrechnungen, woraus 23.000 Prognoserechnungen resultieren. Eine tabellarische Zusammenfassung aller Berechnungsvarianten erfolgt in Tabelle 14 (die weiteren 10 Serienrechnungen/5.000 Prognoserechnungen sind in Kapitel 4.2.6 beschrieben).

Die dargestellten Berechnungsergebnisse verdeutlichen den Einfluss und die Bedeutung objektspezifischer Gegebenheiten, wie insbesondere vorhandene Materialeigenschaften in den einzelnen Schichten eines Untersuchungsabschnittes sowie vorherrschende klimatische Bedingungen. Für eine allumfassende Bewertung der strukturellen Substanz einer Straßenbefestigung ist somit die Einbeziehung objektspezifischer Merkmale unabdingbar.

4.2.4 Berechnungen nach dem AP 9/S

Voraussetzung für die AP 9/S-Berechnungen auf Netzebene ist das in Kapitel 4.2.1 definierte synthetische Analysenet, bestehend aus ca. 500 realen Einzelabschnitten, die auf das gesamte Einzugsgebiet der Bundesrepublik Deutschland verteilt sind, sowie die dazugehörigen in den Straßendatenbanken gespeicherten Angaben zum Befestigungsaufbau, mit den Attributen Schichtart, Schichtdicke und Einbaujahr, sowie zur Belastungsklasse.

Um auf Grundlage des klassisch nach dem AP 9/S berechneten Substanzwerts (Bestand) eine Gesamtnutzungsdauer abschätzen zu können, ist, wie in Kapitel 2.3.1 erläutert, eine Prognosefunktion notwendig, die dem Anwender im AP 9/S nicht an die Hand gelegt wird. Neben der in Kapitel 2.3.1 vorgestellten Prognosefunktion ist in der Literatur eine weitere Prognosefunktion zu finden. Diese beiden Prognosefunktionen unterscheiden sich, wie

Beschreibung Serienrechnung (Materialkombinationen/Modellvarianten)	Zunahme Schwer- verkehrsanteil	Anzahl Serien- rechnungen	Anzahl Prognose- rechnungen
<ul style="list-style-type: none"> • mittlere Steifigkeit in ADS (ADS_2) • Variation Materialeigenschaften in ABS (ABS_1...ABS_3) • Variation Materialeigenschaften in ATS (ATS_1...ATS_9) 	3 %	27	13.500
<ul style="list-style-type: none"> • mittlere Steifigkeit in ADS (ADS_2) • mittlere Steifigkeit in ABS (ABS_2) • Variation Materialeigenschaften in ATS (ATS_1...ATS_9) 	0 %	9	4.500
<ul style="list-style-type: none"> • Tastrechnung bezüglich des Einflusses der Steifigkeit der ADS-Materialien • Variation Materialeigenschaften in ADS (ADS_1...ADS_3) • Variation Materialeigenschaften in ABS (ABS_1...ABS_3) • mittlere Steifigkeit und mittleres Ermüdungsverhalten der ATS-Materialien (ATS_5) 	3 %	6	3.000
<ul style="list-style-type: none"> • Tastrechnung bezüglich des Einflusses der Temperaturzone • fiktive Annahme der Temperaturzone Z1-Z4 jeweils einheitlich für alle Untersuchungsabschnitte • mittlere Steifigkeit in ADS (ADS_2) • mittlere Steifigkeit in ABS (ABS_2) • mittlere Steifigkeit und mittleres Ermüdungsverhalten der ATS-Materialien (ATS_5) 	3 %	4	2.000
<ul style="list-style-type: none"> • Tastrechnung bezüglich des Einflusses des Aufbaus gemäß RStO 12, Tafel 1, Zeile 1 bzw. Zeile 1 und Zeile 2.1 • mittlere Steifigkeit in ADS (ADS_2) • mittlere Steifigkeit in ABS (ABS_2) • Variation Materialeigenschaften in ATS (ATS_1, ATS_2, ATS_5, ATS_8) 	3 %	8	4.000
<ul style="list-style-type: none"> • Kalibrierasphalt in allen Schichten 	3 %	1	500
<ul style="list-style-type: none"> • Tastrechnung bezüglich des Einflusses des Aufbaus gemäß RStO 12, Tafel 1, Zeile 1 bzw. Zeile 1 und Zeile 2.1 • Kalibrierasphalt in allen Schichten 	3 %	1	500
	Gesamt	56	28.000

Tab. 14: Zusammenfassung aller Berechnungsvarianten

aus Bild 40 ersichtlich, hauptsächlich anhand der durch den Exponenten ausgedrückten Zustandsverschlechterung über die Zeit.

Ablauf der Berechnungen im vorliegenden Projekt:

1. Klassische Berechnung des Substanzwertes (Bestand) nach AP 9/S für alle rund 500 Abschnitte des Analysenetzes unter Berücksichtigung aller angegebenen Schichten,
2. Prognose der Gesamtnutzungsdauer durch Zuhilfenahme der in Bild 40 dargestellten PMS-Prognosefunktionen,
 - Ende der Nutzungsdauer bei Erreichen eines Substanzwertes (Bestand) von 4,5
3. Bestimmung der Restnutzungsdauer auf Grundlage der prognostizierten Gesamtnutzungsdauer, dem Jahr der letzten Zustandserfassung und -bewertung (=fiktives Beprobungsjahr) sowie ggf. dem Alter der Nachweisschicht (vgl. Kapitel 4.2.3).

Für den Ablauf der AP 9/S-Berechnungen wurde ein Substanzwert (Bestand) von 4,5 als Ende der Nutzungsdauer definiert. Hintergrund hierfür ist, dass beispielsweise ein RStO 12 gerechter Aufbau nach klassischer AP 9/S-Berechnung niemals einen Substanzwert (Bestand) von 5,0 erreichen kann. Der Grund dafür liegt bei den, nach der Theorie des AP 9/S, verbleibenden Dickenäquivalenzfaktoren am Ende der Nutzungsdauer. Wird ein Substanzwert (Bestand) von 5,0 als Ende der Nutzungsdauer definiert, würde immer eine gewisse Restnutzungsdauer verbleiben. Ein sofortiger Eingriff auf Grund-

lage der AP 9/S-Berechnungen wäre in diesem Fall für RStO-gerechte Aufbauten nicht notwendig, der Ausfall würde erst aufgrund der Prognose innerhalb des PMS erreicht werden. Dieser Effekt ist auch bei historischen Aufbauten zu erwarten, weshalb im vorliegenden Projekt als Ende der Nutzungsdauer ein Substanzwert (Bestand) von 4,5 als sinnvoll erachtet wird. Dies steht auch im Einklang mit der Definition des Schwellenwertes für den Oberflächenzustand nach den ZTV ZEB-StB.

In Bild 41 und Bild 42 sind die Ergebnisse der Berechnungen nach dem AP 9/S, unter Zuhilfenahme der in Bild 40 dargestellten Prognosefunktionen, für eine Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 % dargestellt. In vertikaler Richtung übereinanderliegende Werte gehören zu einem homogenen Abschnitt, das heißt zu einem Objekt. Die jeweils zugrundeliegende Berechnungsvariante übereinanderliegender Datenpunkte unterscheidet sich in der Wahl der Prognosefunktion (vgl. Bild 40).

Die in Bild 41 und Bild 42 dargestellten Ergebnisse wurden anschließend gemäß der voran beschriebenen Vorgehensweise (vgl. Kapitel 4.2.3) der Größe nach sortiert und in Bild 43 und Bild 44 dargestellt. Aufgrund dieser Sortierung ist in Bild 43 leicht zu erkennen, dass zunächst unabhängig von der genutzten Prognosefunktion etwa 90 % der betrachteten homogenen Abschnitte mit einer Lebensdauer größer 30 Jahren ausgewiesen werden. Die maximal erreichbare Nutzungsdauer beträgt je nach Prognosefunktion zwischen 71 und 96 Jahren. Ergänzend sind in Bild 45 die nach dem AP 9/S berechneten Restnutzungsdauern bei einer Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 0 % dargestellt, die da-

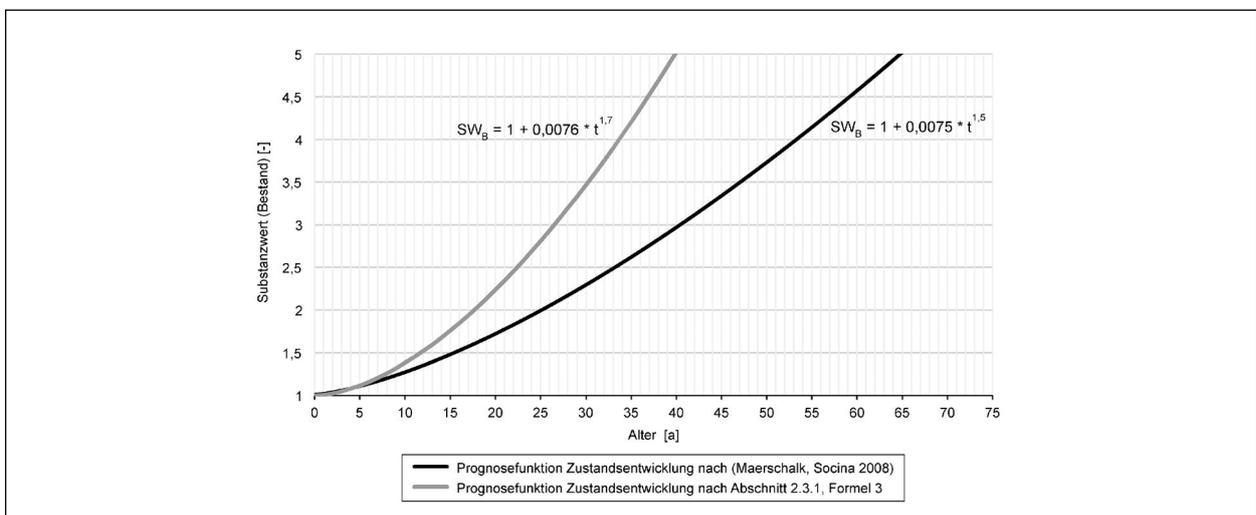


Bild 40: PMS-Prognosefunktionen Zustandsentwicklung als Ergänzung zum AP 9/S

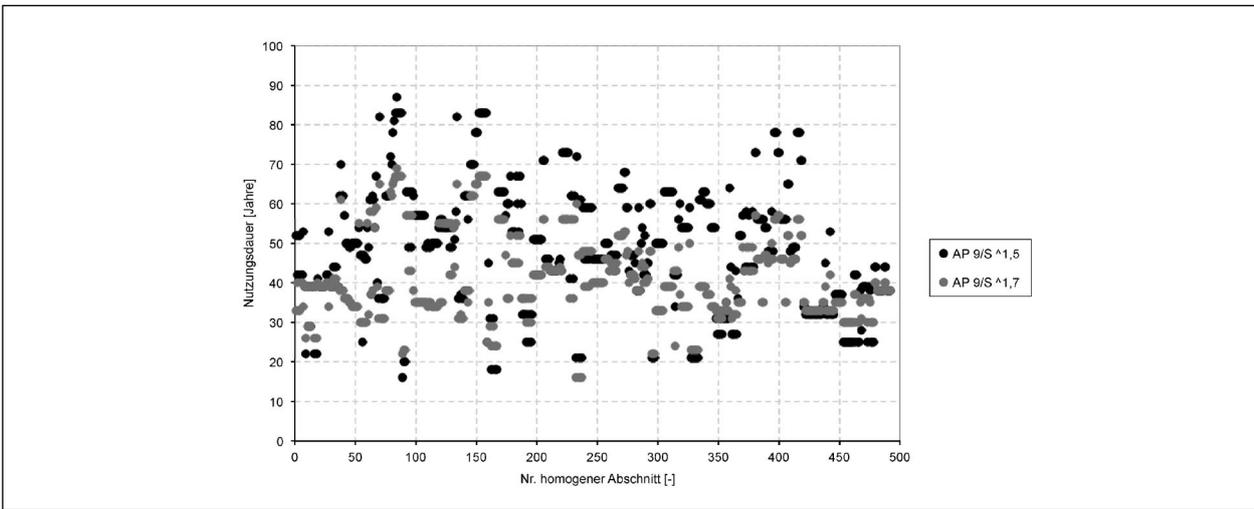


Bild 41: Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte sortiert nach Abschnitts-ID; je Abschnitt für die beiden Prognosefunktionen aus Bild 40 berechnet; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %

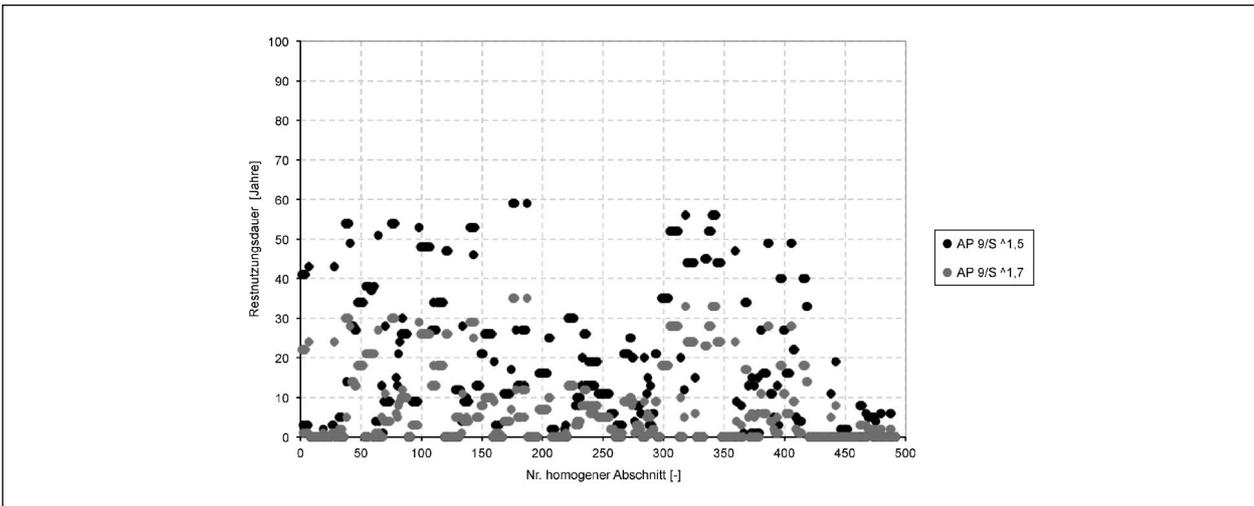


Bild 42: Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte sortiert nach Abschnitts-ID; je Abschnitt für die beiden Prognosefunktionen aus Bild 40 berechnet; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %

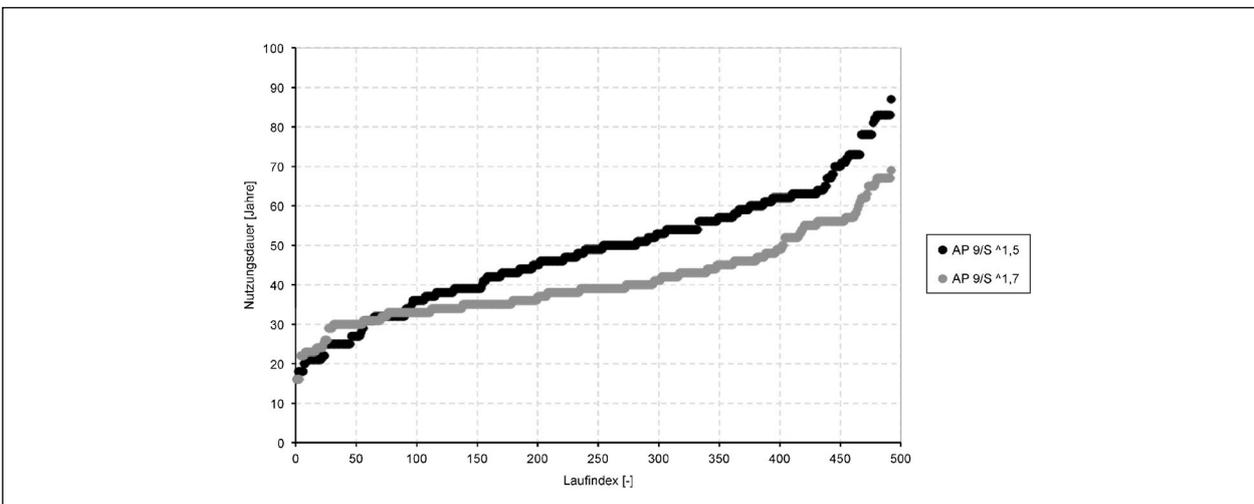


Bild 43: Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte sortiert nach Nutzungsdauer; je Abschnitt für die beiden Prognosefunktionen aus Bild 40 berechnet; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %

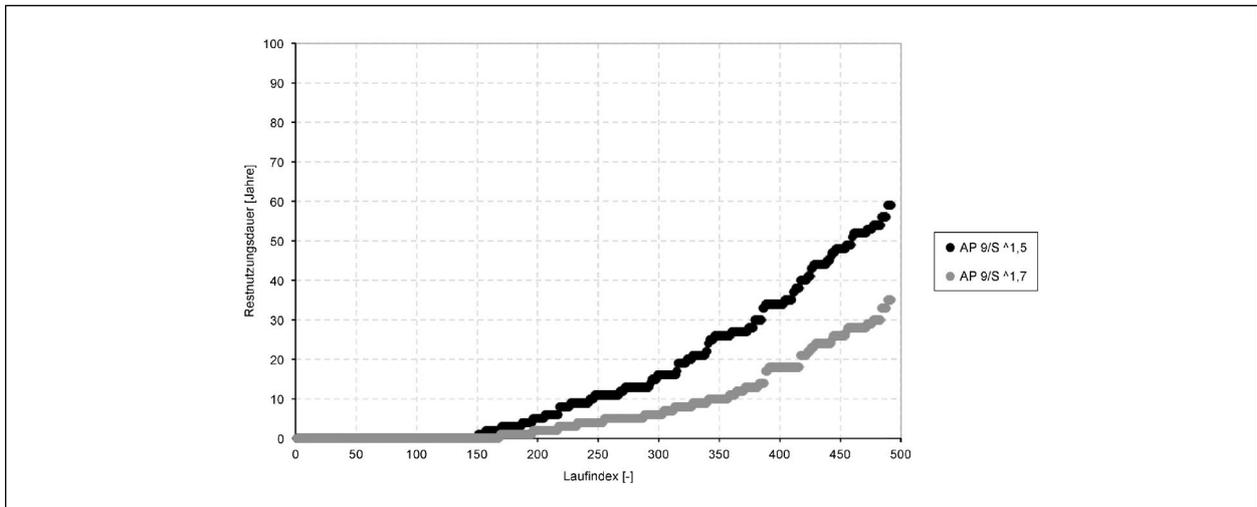


Bild 44: Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte sortiert nach Nutzungsdauer; je Abschnitt für die beiden Prognosefunktionen aus Bild 40 berechnet; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %

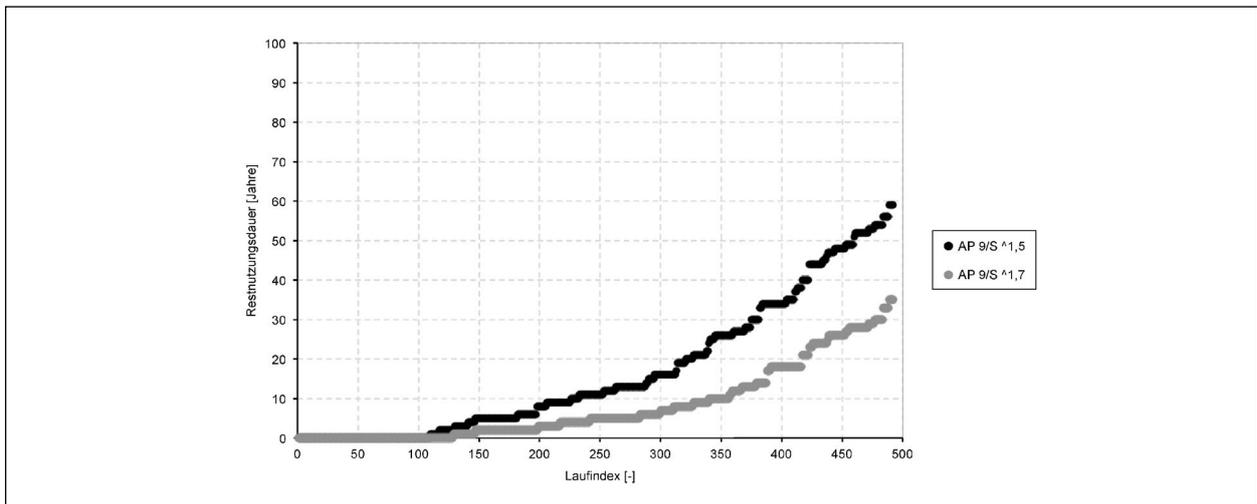


Bild 45: Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte sortiert nach Nutzungsdauer; je Abschnitt für die beiden Prognosefunktionen aus Bild 40 berechnet; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 0 %

zugehörigen Nutzungsdauern befinden sich im Anhang. Dabei sind im Vergleich zu Bild 44 keine signifikanten Unterschiede zu erkennen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei den meisten Untersuchungsabschnitten die Wahl des Anteils der Schwerverkehrszunahme (0 oder 3 %) keine Auswirkungen auf die errechnete Belastungsklasse bedingt.

Die große Varianz der berechneten Nutzungsdauern (Bild 43) kann auf folgende Ursachen zurückgeführt werden:

- Historische Aufbauten: Wie bereits in Kapitel 2.3.2 erläutert, kann die Verstärkung im Hocheinbau dazu führen, dass ein Abschnitt aufgrund der nach dem Rechenverfahren stets verbleibenden Restnutzungsdauer als besonders langlebig eingestuft wird.
- Verkehrsbelastung: Wie bereits BRZUSKA (2018) feststellte, beinhaltet das gewählte Analysenetz auch Strecken, die einer dimensionierungsrelevanten Beanspruchung von über 100 Mio. äquivalenten 10-t-Achsübergängen ausgesetzt sind. Da gemäß dem AP 9/S die Zuordnung der Belastungsklasse zur Verkehrsbelastung bei Bk 100 endet, können Strecken, die eine dimensionierungsrelevante Beanspruchung von über 100 Mio. aufweisen, maximal einer Bk 100 zugeordnet werden, wodurch gegebenenfalls zu hohe Nutzungsdauern berechnet werden.

- Vorzeitiges Versagen aufgrund von ungünstigen Materialeigenschaften kann nicht berücksichtigt werden.
- Ggf. längere Nutzungsdauern aufgrund günstiger Materialeigenschaften können nicht berücksichtigt werden.

4.2.5 Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse

Für den Vergleich der nach den RSO Asphalt und dem AP 9/S ermittelten Ergebnisse stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Die jeweils ermittelten Nutzungsdauern bzw. Restnutzungsdauern können sowohl direkt als auch indirekt miteinander verglichen werden.

Bild 46 zeigt exemplarisch einen direkten Vergleich der nach den RSO Asphalt und dem AP 9/S berechneten Restnutzungsdauern, wobei sich die den RSO Asphalt zugrundeliegenden Berechnungsvarianten in der Wahl der Asphalttragschichtmaterialien (ATS_1...ATS_9) in den jeweils maßgebenden Asphalttragschichten unterscheiden.

Eine weitere und aufschlussreichere Vergleichsmöglichkeit bietet die Darstellung kumulierter Häufigkeiten. Hierfür werden die berechneten Nutzungsdauern bzw. Restnutzungsdauern zunächst in Klassen nahezu beliebiger Breite eingeteilt. Für die nachfolgenden Darstellungen wurden Klassenbreiten von jeweils 2,5 Jahren definiert und die absoluten Häufigkeiten der jeweils einer Klasse zugeordneten Nutzungsdauern bzw. Restnutzungsdauern

ern bestimmt. Anschließend wurden die Einzelhäufigkeiten entsprechend der Klassengröße aufsteigend aufsummiert, wodurch sich kumulierte Häufigkeiten ergeben.

Die Darstellung kumulierter relativer Häufigkeiten bietet die Möglichkeit, den prozentualen Anteil an Untersuchungsabschnitten, deren Nutzungs- bzw. Restnutzungsdauern ober- oder unterhalb einer beliebigen Klasse liegen, direkt aus einer grafischen Darstellung abzulesen. Somit wird durch einen indirekten Vergleich der berechneten Nutzungsdauern bzw. Restnutzungsdauern ein direkter Vergleich der nach den RSO Asphalt und dem AP 9/S ermittelten Ergebnisse geboten.

In Bild 47 bis Bild 51 werden die kumulierten relativen Häufigkeiten ausgewählter Restnutzungsdauern, berechnet nach den RSO Asphalt und dem AP 9/S, vergleichend zusammengefasst. Auf eine differenzierte Gegenüberstellung der kumulierten Häufigkeiten der den berechneten Restnutzungsdauern zugrundeliegenden Nutzungsdauern wird an dieser Stelle verzichtet. Entsprechende Darstellungen können dem Anhang dieses Berichtes entnommen werden.

Der weitestgehend gleichmäßige Verlauf der beiden AP 9/S Berechnungsergebnisse in Bild 47 bis Bild 51 ist auf das Abschreibungsmodell (material- und zeitabhängige Abminderung der Schichtdicken (vgl. Kapitel 2.3.1)) zurückzuführen. Die Verläufe der RSO-Berechnungsergebnisse weisen hingegen deutlich größere Unterschiede auf. Die dargestellte Bandbreite an möglichen Nutzungsdauern ist hier auf die in den durchgeführten Berechnungen be-

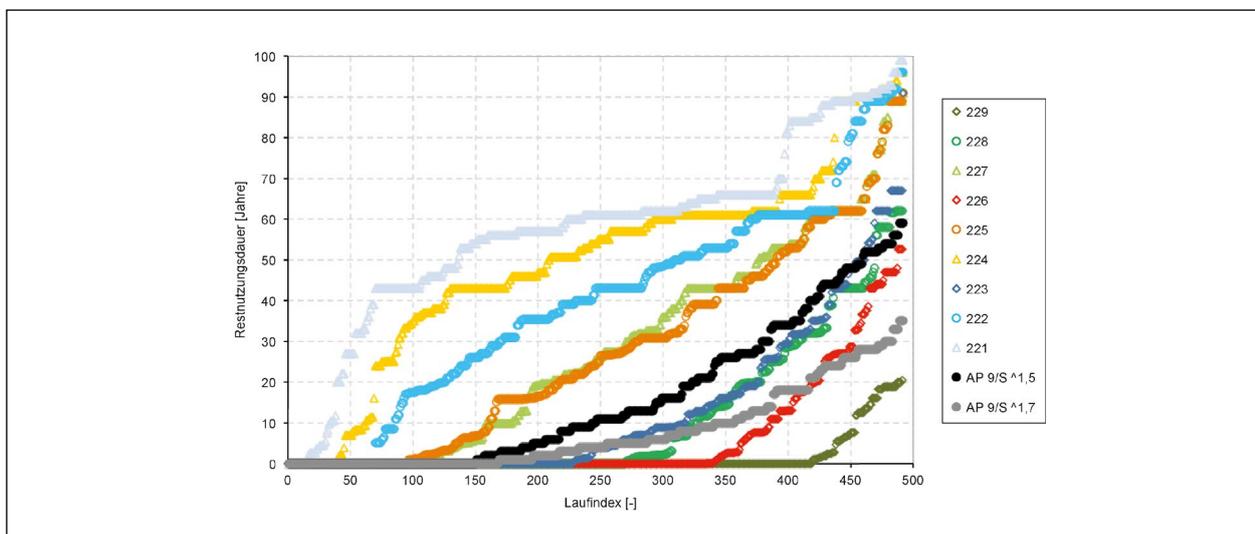


Bild 46: Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Restnutzungsdauer; Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %; Berechnungsergebnisse basierend auf den RSO Asphalt und dem AP 9/S (vgl. Bild 35 und Bild 44)

rücksichtigten unterschiedlichen Materialqualitäten zurückzuführen (vgl. Kapitel 4.1).

Nach derzeitigem Kenntnisstand ist es nicht möglich, die einzelnen Untersuchungsabschnitte des Analysenetzes jeweils einer Modellvariante/einer Serienrechnung auf Grundlage lokaler Gegebenheiten zuzuordnen. Eine eindeutige Zuordnung ist nur durch eine Beprobung der Einzelabschnitte im Sinne der RSO Asphalt möglich. Folglich können für die ausgewählten Untersuchungsabschnitte keine belastbaren Aussagen hinsichtlich der zu erwarten-

den Nutzungs- bzw. Restnutzungsdauern getroffen werden. Die dargestellten Ergebnisbandbreiten können somit nur sehr bedingt eingegrenzt werden. Für einen ersten PMS-Rechenlauf wurde folglich eine Modellvariante mit Materialien mittlerer Eigenschaften gewählt (Modellvariante 225), d. h. mittlere Steifigkeit für alle Materialien (ADS, ABS und ATS) und mittleres Ermüdungsverhalten für die (für den Ermüdungsnachweis) maßgebende Asphalttragschicht. Des Weiteren gilt es zu bemerken, dass bei Anwendung des AP 9/S ebenfalls stets mittlere Materialqualitäten angenommen werden.

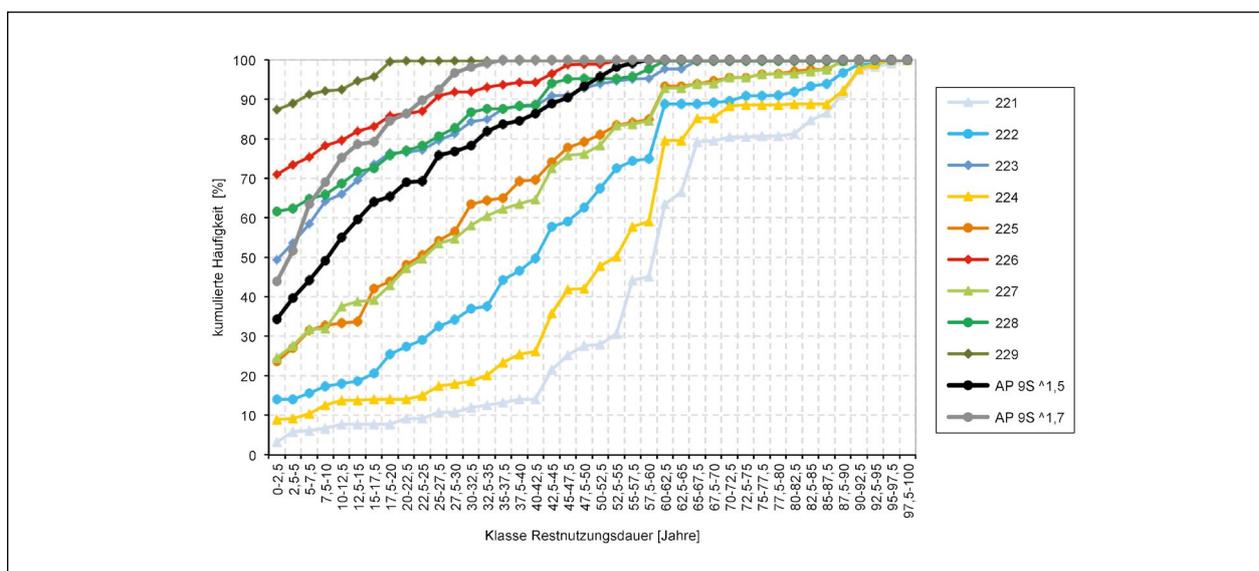


Bild 47: Kumulierte relative Häufigkeit der Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %; Berechnungsergebnisse nach den RSO Asphalt (Variation ATS-Material) und dem AP 9/S (vgl. Bild 35 und Bild 44)

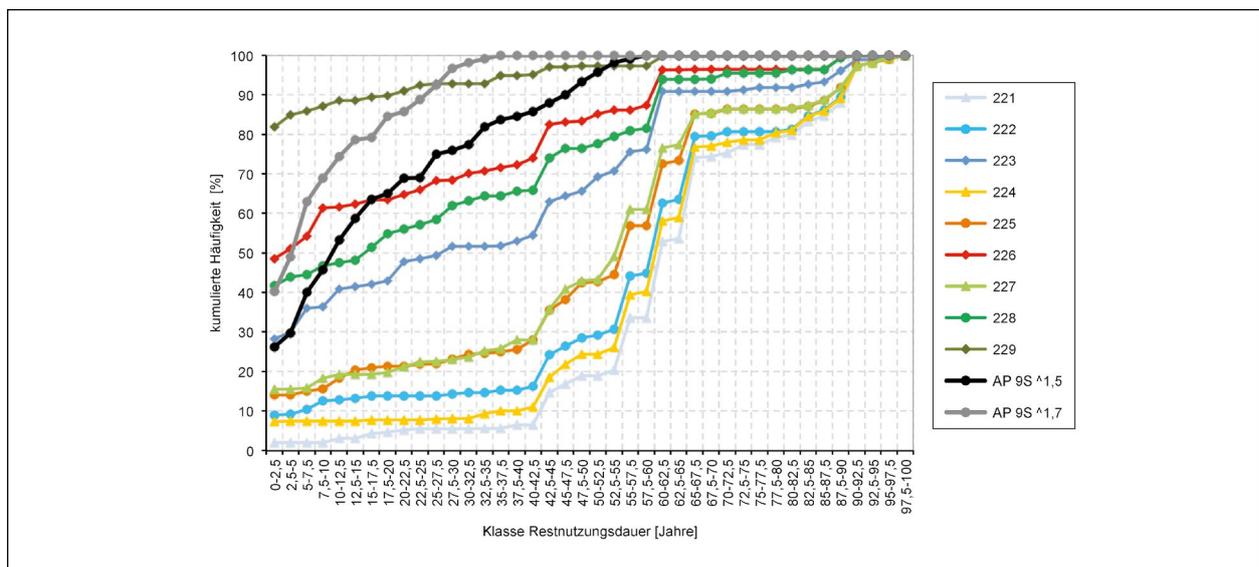


Bild 48: Kumulierte relative Häufigkeit der Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte; Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 0 %; Berechnungsergebnisse nach den RSO Asphalt (Variation ATS-Material) und dem AP 9/S (vgl. Bild 36 und Bild 45)

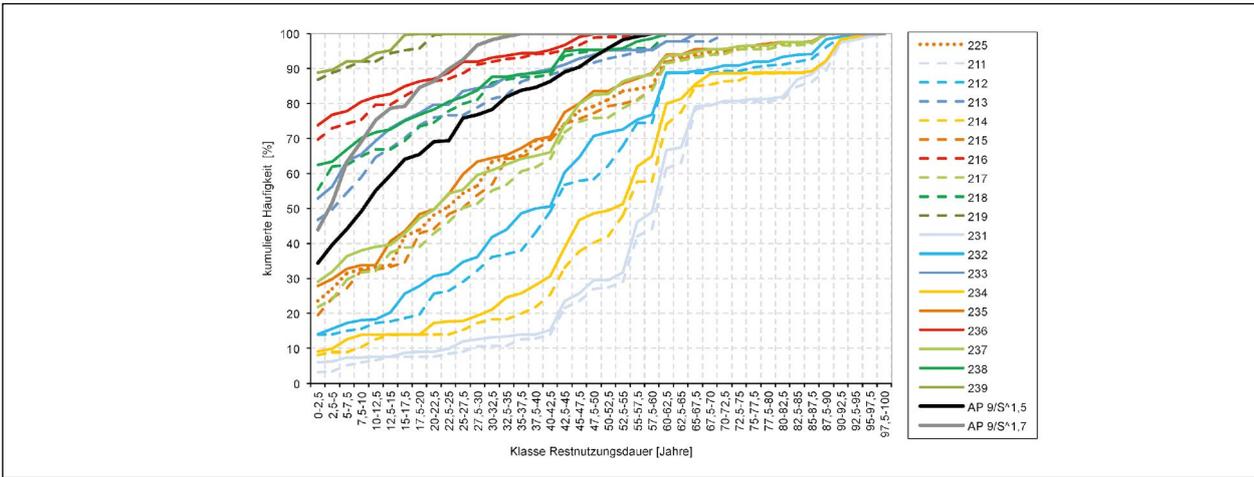


Bild 49: Kumulierte relative Häufigkeit der Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte; Zunahme des Schwerverkehrsan- teils um 3 %; Berechnungsergebnisse nach den RSO Asphalt (Variation ABS- und ATS-Material) und dem AP 9/S (vgl. Bild 37 und Bild 44)

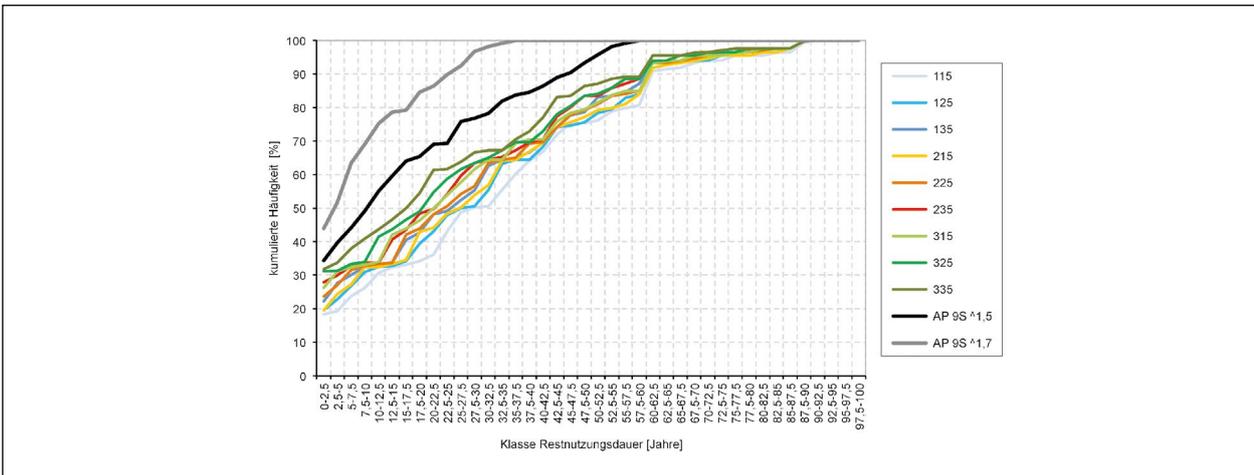


Bild 50: Kumulierte relative Häufigkeit der Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte; Zunahme des Schwerverkehrsan- teils um 3 %; Berechnungsergebnisse nach den RSO Asphalt (Variation ADS- und ABS-Material) und dem AP 9/S (vgl. Bild 38 und Bild 44)

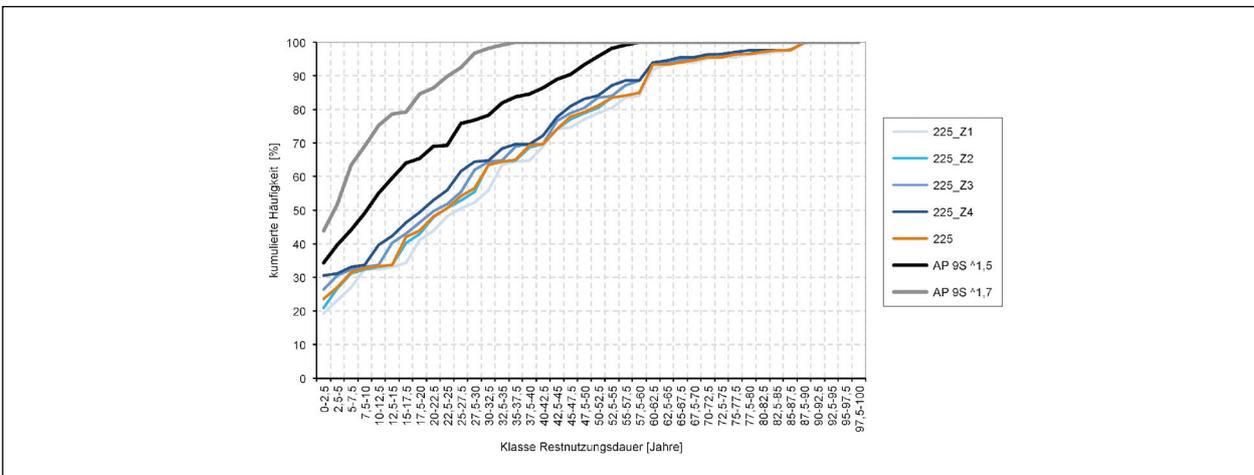


Bild 51: Kumulierte relative Häufigkeit der Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte; Zunahme des Schwerverkehrsan- teils um 3 %; Berechnungsergebnisse nach den RSO Asphalt (Variation Temperaturzone) und dem AP 9/S (vgl. Bild 39 und Bild 44)

4.2.6 Plausibilitätsprüfung der RSO-Berechnungsergebnisse anhand von RStO-Aufbauten

Die ausgewählten Untersuchungsabschnitte weisen laut den berücksichtigten Datenbankeinträgen zum Teil auffällig viele Schichten auf (vgl. Bild 26). Eine detaillierte Analyse der Aufbaudaten des gewählten Analysenetzes zeigt, dass lediglich ca. 40 der knapp 500 Untersuchungsabschnitte einen Aufbau nach den RStO 12, Tafel 1 aufweisen. Um den Einfluss dieser merklich von klassischen Befestigungsaufbauten nach den RStO 12 (FGSV RStO 2012) abweichenden Straßenkonstruktionen untersuchen und bewerten zu können, wurden Vergleichsrechnungen durchgeführt. Im Detail wurden dabei die Befestigungsaufbauten der RStO 12 Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1 bzw. zusätzlich der Aufbau aus Tafel 1, Spalte 1, Zeile 2.1 ausgewählt, da nur diese Aufbauten als maßgebend für das beschriebene Analysenetz anzusehen sind. Hinsichtlich der anzusetzenden Materialeigenschaften wurde entschieden, die Materialkombinationen 221, 222, 225, 228 (vgl. Tabelle 13) sowie den in den RDO Asphalt definierten Kalibrierasphalt einzubeziehen. Auf diese Weise wird ein relativ breites und dennoch realistisches Materialspektrum berücksichtigt und der Rechenaufwand gegenüber den voran beschriebenen Szenarien deutlich reduziert.

Nachfolgend werden in Bild 52 bis Bild 54 die Ergebnisse dieser ergänzenden Berechnungsszenarien dargestellt. Eine Aufschlüsselung der Bezeichnungen der durchgeführten Szenarien nach verwendetem Aufbau (A) und berücksichtigten Materialien (M) ist der Tabelle 15 bzw. im Detail der Tabel-

le 27 im Anhang zu entnehmen. Den Berechnungen wurde des Weiteren eine Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 % zugrunde gelegt.

In Bild 52 sind zunächst die Restnutzungsdauern für verschiedene Modellaufbauten (reale Aufbauten vs. RStO-Aufbauten) in Kombination mit dem Kalibrierasphalt und der Materialkombination 225 vergleichend dargestellt. Daraus ergeben sich sechs Berechnungsszenarien. Die Materialeigenschaften des Kalibrierasphaltes in der ATS (geringe Steifigkeit und gute Ermüdungsbeständigkeit in der ATS; vgl. Bild 20 und Bild 21) lassen sich bei näherer Betrachtung mit der Materialkombination ATS_7 (vgl. Tabelle 13) vergleichen. Da der Einfluss der Materialeigenschaften der Asphaltdeck- und -binderschicht im Vergleich zu denen der Asphalttragschicht verhältnismäßig gering ist, ergeben sich für beide Szenarien (227 und M_Kali-A_real (Bild 35 und Bild 52)), unabhängig von den ADS- und ABS-Materialien, ähnliche Restnutzungsdauern. Für die in Bild 52 dargestellten Berechnungsfälle resultieren für die RStO-Aufbauten geringere Restnutzungsdauern als für die Befestigungen mit realen Schichtdicken, unabhängig von der Materialwahl.

Für die zwei Szenarien „M_Kali-A_Z1“ und „M_Kali-A_Z1_Z2.1“ ergeben sich aufgrund der Kalibrierung beider Befestigungsvarianten mittels Kalibrierasphaltes erwartungsgemäß nahezu identische Nutzungs- bzw. Restnutzungsdauern. Geringfügige, im Diagramm nicht sichtbare Unterschiede sind auf die Anwendung unterschiedlicher Anpassungsfaktoren zurückzuführen (vgl. Tabelle 12).

Bezeichnung Material/Aufbau	Erklärung
M_Kali	Kalibrierasphalt in allen Schichten
M_221	Materialkombination 221 mit mittlerer Steifigkeit in der Asphaltdeck- und -binderschicht sowie mit hoher Steifigkeit und hoher Ermüdung in der Asphalttragschicht
M_222	Materialkombination 222 mit mittlerer Steifigkeit in der Asphaltdeck- und -binderschicht sowie mit hoher Steifigkeit und mittlerer Ermüdung in der Asphalttragschicht
M_225	Materialkombination 225 mit mittleren Materialeigenschaften (Steifigkeit und Ermüdung) in allen Schichten
M_228	Materialkombination 228 mit mittlerer Steifigkeit in der Asphaltdeck- und -binderschicht sowie mit niedriger Steifigkeit und mittlerer Ermüdung in der Asphalttragschicht
A_real	realer Aufbau der Untersuchungsabschnitte
A_Z1	Aufbau gemäß RStO 12 Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1 für alle Untersuchungsabschnitte
A_Z1_Z2.1	Aufbau gemäß RStO 12 Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1 für alle Untersuchungsabschnitte, die im realen Aufbau keine HGT enthalten und Tafel 1, Spalte 1, Zeile 2.1 für alle Untersuchungsabschnitte, die im realen Aufbau eine HGT enthalten

Tab. 15: Erläuterung der Legendeneinträge für die Bild 52 bis Bild 54 und Bild 77 bis Bild 79 (im Anhang)

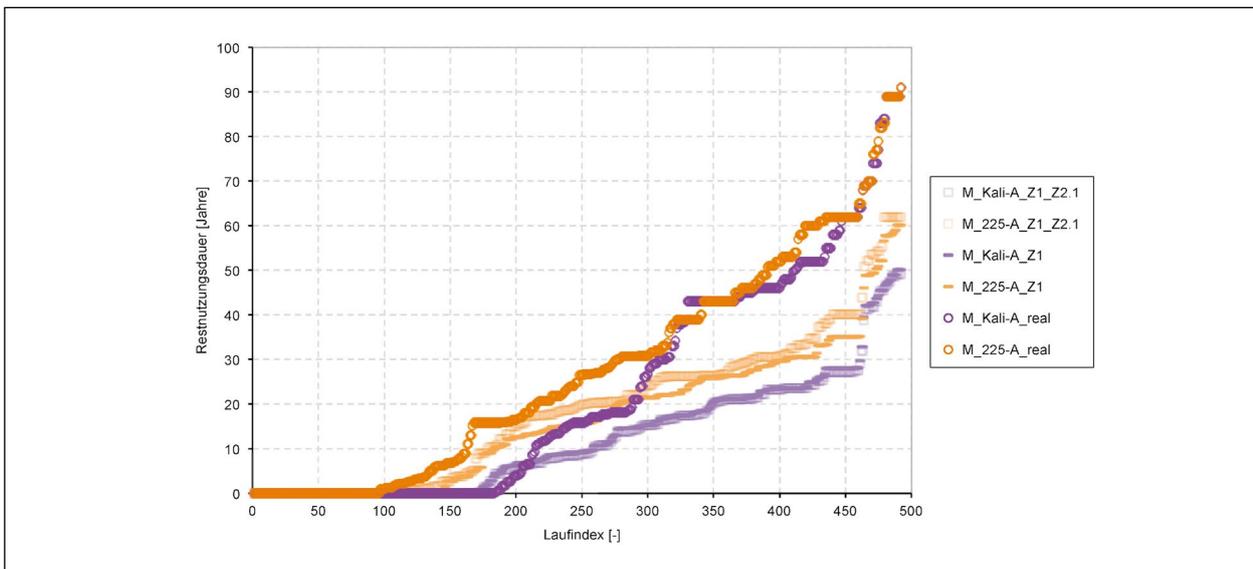


Bild 52: Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Restnutzungsdauer; Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %; Annahme verschiedener Materialkombinationen (225 und Kalibrierasphalt) und Befestigungsvarianten (realer Aufbau der Untersuchungsabschnitte, Aufbau gemäß RStO 12, Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1 und RStO 12, Tafel 1, Spalte 1, Zeile 2.1), Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 % (detaillierte Aufschlüsselung der Legende in Tabelle 15)

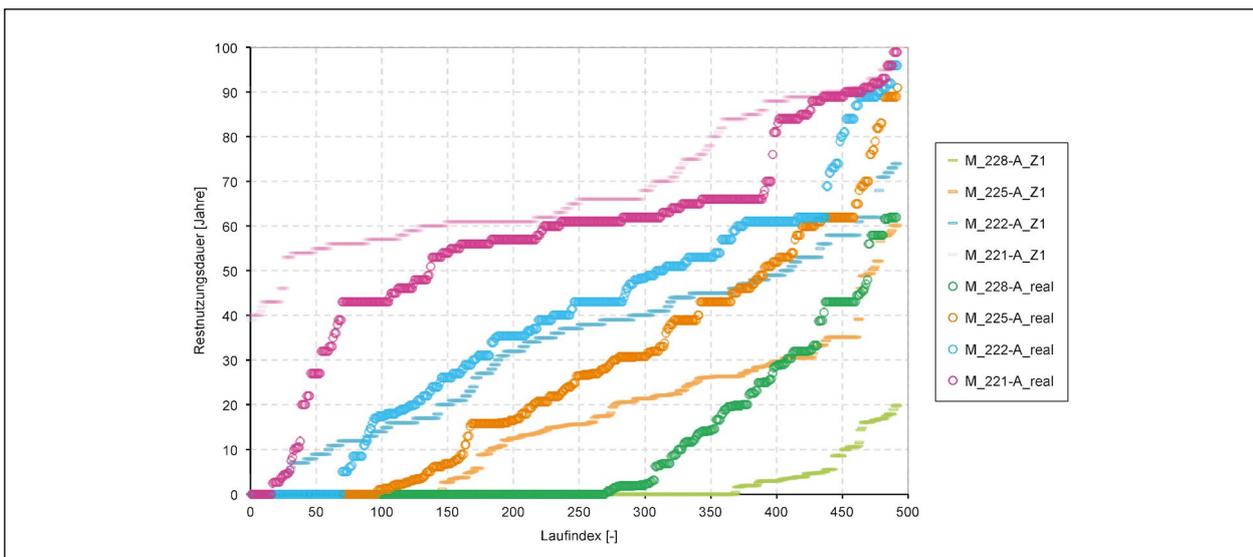


Bild 53: Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Restnutzungsdauer; Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %; Annahme verschiedener Materialkombinationen (221, 222, 225 und 228) in Kombination mit zwei Befestigungsvarianten (realer Aufbau der Untersuchungsabschnitte und Aufbau gemäß RStO 12, Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1) (Detaillierte Aufschlüsselung der Legende in Tabelle 15)

Grundsätzlich gilt anzumerken, dass die ursprüngliche Kalibrierung der verschiedenen RStO-Aufbauten jeweils unter Einbeziehung der Verkehrsbelastung an der oberen Grenze der Belastungsklassen der in Tafel 1 der RStO 12 dargestellten Befestigungen für einen Nutzungszeitraum von 30 Jahren erfolgte. Daraus resultiert, dass sich bei tatsächlich geringeren Belastungen (jedoch innerhalb des Bereiches der jeweiligen Belastungsklasse) rechnerisch Nutzungs- und Restnutzungsdauern größer 30 Jahre ergeben.

Bild 53 zeigt für die zwei Aufbauvarianten „reale Aufbauten der Untersuchungsabschnitte“ und „Aufbau gemäß RStO 12, Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1“ vergleichend den Einfluss verschiedener Materialkombinationen in den einzelnen Schichten (221, 222, 225 und 228) in insgesamt acht Berechnungsszenarien. Für die Szenarien mit einem Aufbau nach den RStO 12 ergeben sich i. d. R. geringere Restnutzungsdauern als für die Szenarien mit den real vorhandenen Aufbauten der Untersuchungsabschnitte. Einzig für die Berechnungsvariante mit der

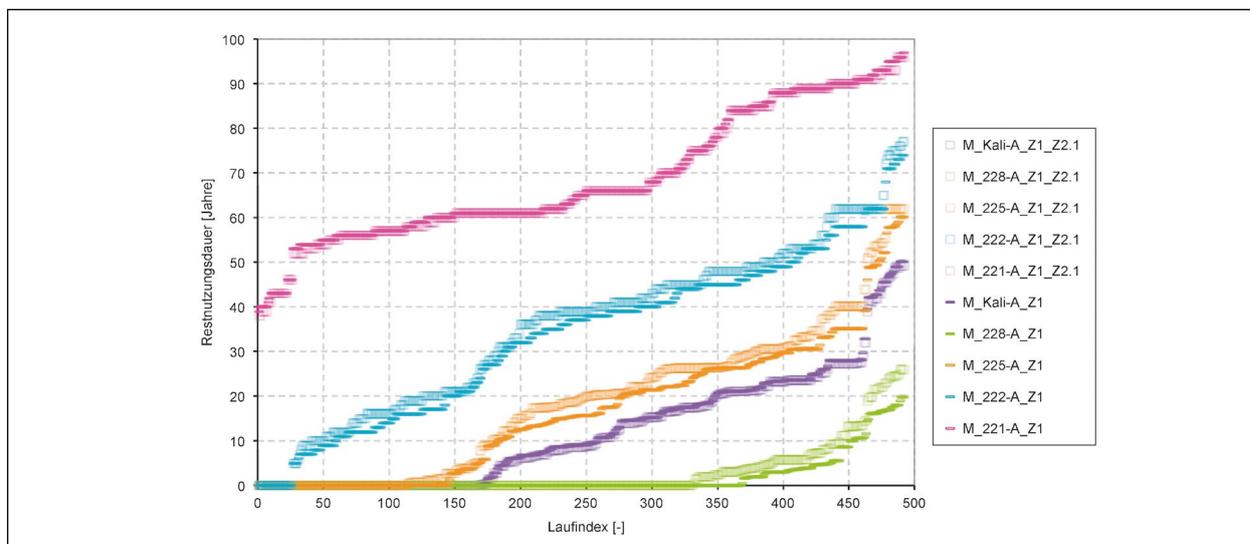


Bild 54: Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Restnutzungsdauer; Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %; Annahme verschiedener Materialkombinationen (221, 222, 225 und 228) in Kombination mit zwei Befestigungsvarianten (Aufbau gemäß RStO 12, Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1 und Aufbau gemäß RStO 12, Tafel 1, Spalte 1, Zeile 2.1) (detaillierte Aufschlüsselung der Legende in Tabelle 15)

Materialkombination 221 (hohe Steifigkeit und gute Ermüdungsbeständigkeit in der ATS) und einem Aufbau nach den RStO 12, Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1 ergeben sich durchgehend längere Rest-/Nutzungsdauern. Insbesondere unter Annahme von „schlechten“ Asphalteeigenschaften (M_228: geringe Steifigkeit, mittleres Ermüdungsverhalten) werden für die RStO-Aufbauten, anstelle der „realen“ Befestigungen aus der Datenbank, deutlich geringere Restnutzungsdauern berechnet. Bei dieser Kombination ist die Spreizung der Ergebnisse, das heißt die Abhängigkeit der Restnutzungsdauern von der Befestigungsvariante, am größten.

Zu beachten ist, dass „schlechte“ Asphalteeigenschaften der Tragschichten insbesondere durch geringe Bindemittelgehalte erzeugt werden. Praxis sind derzeit Bindemittelgehalte um 4,0 bis 4,5 %, welche beim Ausreizen der zulässigen Toleranzen nach den ZTV Asphalt-StB (FGSV ZTV Asphalt 07/13) bis nahe an den Mindestbindemittelgehalt von 3,5 % ohne Abzüge ausgeführt werden können. Dies ist eine Praxis, welche sich bezüglich der zu erwartenden Nutzungsdauern von Asphalttragschichten zukünftig äußerst negativ auswirken wird. (WELLNER, DRAGON 2011)

Zudem ist zu erkennen, dass die Größe der Abweichungen der Restnutzungsdauern zwischen Szenarienrechnungen mit unterschiedlichen Befestigungsaufbauten maßgeblich von den jeweils berücksichtigten Materialien (das heißt von den angenommenen Materialeigenschaften) abhängig ist.

Eine allgemeingültige Aussage kann in diesem Zusammenhang jedoch nicht getroffen werden. Dennoch kann und muss geschlussfolgert werden, dass die Gewährleistung ausreichender Materialqualitäten unabdingbar ist und einzig Anforderungen hinsichtlich Materialart und volumetrischer Zusammensetzung nicht genügen, um angestrebte Nutzungszeiten zu erreichen.

Ergänzend zu den vorangegangenen Betrachtungen wird nachfolgend der Einfluss der Wahl des RStO-Aufbaus auf die jeweiligen Restnutzungsdauern gezeigt. In Bild 54 sind die Restnutzungsdauern für zehn Berechnungsszenarien verschiedener Materialkombinationen (221, 222, 225, 228 und Kalibrierasphalt) für die beiden Befestigungsaufbauten in den RStO 12, Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1 und Zeile 2 dargestellt. Für die mit „...Z1“ bezeichneten Szenarien wurde für alle Prognoseabschnitte ein Aufbau gemäß Zeile 1 angesetzt. Für die mit „...Z1_Z2.1“ bezeichneten Szenarien wurden für reine Asphaltbefestigungen auf ungebundenen Tragschichten ebenfalls ein Aufbau gemäß Zeile 1 angenommen, für Aufbauten mit Asphalttragschicht auf hydraulisch gebundener Tragschicht (HGT) wurde hingegen ein Aufbau gemäß Zeile 2.1 angesetzt.

Die Unterscheidung hinsichtlich der Wahl des angenommenen RStO-Aufbaus wirkt sich erwartungsgemäß nur sehr geringfügig auf die berechneten Restnutzungsdauern aus und zeigt zudem keine Regelmäßigkeiten, sodass auf dieser Grundlage keine weiteren Erkenntnisse abgeleitet werden können.

4.2.7 Ergebnisse der Vergleichsrechnungen auf Objektebene anhand von realen Eingangsdaten der Beprobungsstrecke Staatsstraße 286 (S 286) bei Mülsen im Freistaat Sachsen

Wie in Kapitel 4.2.1 erläutert, sollten im Rahmen der Modellkalibrierung Vergleichsrechnungen nach den RSO Asphalt und dem AP 9/S für verschiedene reale Untersuchungsabschnitte (Asphaltbefestigungen) durchgeführt werden. Voraussetzung hierfür ist, dass für jeden einzubeziehenden Abschnitt sowohl ZEB-Daten als auch schichtspezifische Materialeigenschaften benötigt werden.

Da das voran genannte Analysenetzt hauptsächlich Autobahnen beinhaltet, wäre idealerweise einer Modellkalibrierung anhand von Autobahnabschnitten (zum Beispiel anhand der RSO-Pilotstrecken) Vorrang zu gewähren gewesen.

Da zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung keine vollständigen Untersuchungsergebnisse aus Beprobungen von Autobahnen zur Verfügung standen, wurden in Absprache mit dem Auftraggeber gemäß dem ursprünglichen Forschungsauftrag fünf Abschnitte der Untersuchungsstrecke (WELLNER, ZEIBLER 2013) Staatsstraße 286 bei Mülsen im Freistaat Sachsen beprobt und in Anlehnung an den Entwurf der RSO Asphalt bewertet.

Für die Berechnung der Nutzungsdauern bzw. Restnutzungsdauern, der im Rahmen des diesem Bericht zugrundeliegenden Forschungsvorhabens beprobten Abschnitte, der S 286 bei Mülsen (im Jahr 2018) wurden die in Tabelle 16 aufgelisteten Eingangsparameter zur Berechnung der anzusetzenden Verkehrsbelastung verwendet. Im Gegensatz zu den Vergleichsrechnungen auf Netzebene, die ausschließlich für Bundesautobahnen erfolgten und somit ein Achslastkollektiv explizit für Fernverkehr berücksichtigen, ist für die Berechnungen der Mülsen-Abschnitte im Freistaat Sachsen ein spezifisches Achslastkollektiv zu verwenden (Bild 24).

Zusätzlich zu belastungsrelevanten Parametern werden zur Bestimmung von Restnutzungsdauern nach den RSO Asphalt schichtspezifische Dicken und Materialeigenschaften für jeden Abschnitt benötigt.

In Tabelle 17 sind für die einzelnen Beprobungsabschnitte A0 bis A4 der S 286 bei Mülsen die am Bohrkern bestimmten mittleren Schichtdicken (MW) für alle Schichten sowie die für die Asphalttragschichten sich nach der Schichtdickenauswertung (SDA) ergebenden Dicken aufgelistet. Des Weiteren sind in Tabelle 17 die Baujahre, die ursprünglich geplanten Nutzungsdauern (WELLNER, ZEIBLER 2013), die Beprobungsjahre und die nach den RSO

Parameter/Abschnitt	Mülsen Abschnitt A0	Mülsen Abschnitt A1 bis A4
Frostsicherer Oberbau [mm]	800	800
Achslastkollektiv	Mülsen	Mülsen
Temperaturzone, Häufigkeitsverteilung der Asphaltoberflächentemperatur	Zone 2	Zone 2
DTV im Querschnitt [Kfz/24h]	6.500 (LASuV 2017)	6.300 (LASuV 2017)
Schwerverkehr [%]	10,9 (LASuV 2017)	13,3 (LASuV 2017)
DTV ^(SV) [Kfz/24h]	709	838
Achszahlfaktor f_A [-]	3,3	3,3
Mittlerer Lastkollektivquotient q_{Bm} [-]	0,23	0,23
Fahrstreifenfaktor f_1 [-]	0,5	0,5
Fahrstreifenbreitenfaktor f_2 [-]	1,1	1,1
Steigungsfaktor f_3 [-]	1,0	1,0
Zunahme Schwerverkehr [%]	3,0 (ab 1. Jahr)	3,0 (ab 1. Jahr)
B-Zahl	3.238.608	3.830.106
Belastungsklasse	Bk 10	Bk 10
Ursprünglich angestrebte Nutzungsdauer [Jahre]	30	5, 15 oder 30 (Tabelle 17)
Anpassungsfaktor AF [-]	1037	1037

Tab. 16: Dimensionierungsrelevante Eingangsparameter für den beprobten Streckenabschnitt S 286 Mülsen (LASuV 2017; FGSV RStO 2012)

Abschnitt	Schichtdicke				Baujahr	Beprobungs- jahr	Geplante Nutzungs- dauer	Ermüdungs- status nach 30 Jahren	RND nach den RSO Asphalt (ab 2018)
	ADS (MW)	ABS (MW)	ATS (MW)	ATS nach SDA					
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]					
A0	34	72	97	97	2006	2018	30,00	157,62	21,81
A1	38	79	137	136	2008	2018	30,00	11,46	87,92
A2	41	43	125	128	2008	2018	15,00	64,55	39,46
A3	38	39	87	90	2008	2018	5,00	108,17	28,46
A4	44	0	93	93	2008	2018	5,00	341,95	11,80

Tab. 17: Schichtdicken, Nutzungs- und Restnutzungsdauern der Abschnitte A0 bis A4 der S 286 bei Mülsen (eigene Berechnungen; WELLNER, ZEIBLER 2013)

Asphalt berechneten Restnutzungsdauern angegeben.

Zur Bestimmung bemessungsrelevanter Materialparameter wurden Spaltzug-Schwellversuche nach den FGSV TP Asphalt-StB, Teil 24 (2018) (Beständigkeit gegen Ermüdung) und FGSV TP Asphalt-StB, Teil 26 (2018) (Bestimmung der Steifigkeit) durchgeführt. Die somit ermittelten Hauptkurven und Ermüdungsfunktionen aller Asphaltmaterialien sind, getrennt nach Abschnitten, im Anhang in Bild 80 bis Bild 89 dargestellt, die zugehörigen Materialparameter sind in Tabelle 28 und Tabelle 29 aufgelistet. Die Versuchsergebnisse (auch als Stichproben bezeichnet) unterliegen einer gewöhnlichen Materialstreuung und zeigen im Funktionsverlauf keine Auffälligkeiten.

In Bild 55 sind für die Abschnitte A0 bis A4 die nach Berücksichtigung der ursprünglich geplanten Nutzungsdauer verbleibende theoretische Restnutzungsdauer (ab dem Baujahr 2006 bzw. 2008) und die nach den RSO Asphalt und dem AP 9/S berechneten Restnutzungsdauern ab dem Jahr 2018 vergleichend gegenübergestellt. Auffällig sind vor allem die Abschnitte 1 und 2: Dort werden, nach einer Liegezeit von 10 Jahren, nach den RSO Asphalt sehr hohe Restnutzungsdauern ermittelt. Zurückzuführen sind diese auf die zu unterschiedlichen Zeitpunkten verfügbaren Verkehrsdaten, der Art der Beprobung und den sich daraus ergebenden Materialeigenschaften. Die prognostizierten Nutzungsdauern zum Zeitpunkt der Realisierung der Untersuchungsabschnitte in den Jahren 2006 bzw. 2008 beruhen auf einer Verkehrsprognose mit einem Schwerverkehrsanteil von 20 % bei einer durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke von 8.250 Kfz/24h (HENNIG 2009). Anhand einer Verkehrszählung im Jahr 2015 ist eine deutliche Re-

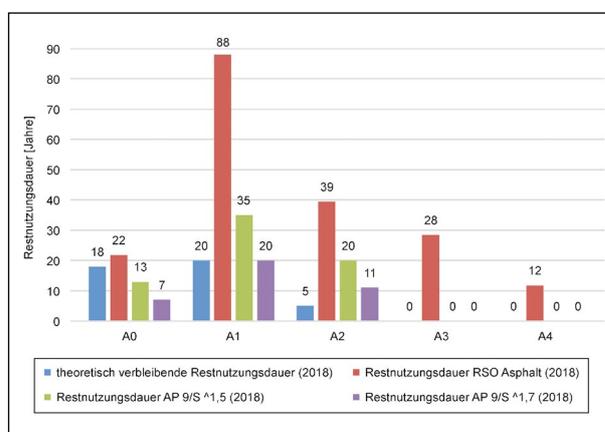


Bild 55: Vergleich der beim Bau geplanten Restnutzungsdauern mit den berechneten Restnutzungsdauern der Abschnitte A0 bis A4 der S 286 bei Mülsen in Bezug auf das Jahr 2018

duktion des Schwerverkehrs (um 30 – 50 %) bei gleichzeitiger Verringerung des DTV zu verzeichnen. Daraus geht ein Schwerverkehrsanteil von nur 10,9 % für den Abschnitt A0 und 13,3 % für A1-A4 bei einer durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke von 6.500 Kfz/24h für A0 und 6.300 Kfz/24h für A1-A4 hervor (vgl. Tabelle 16) (LASuV 2017).

Des Weiteren kann anhand von Bild 55 bestätigt werden, dass die Materialeigenschaften in den einzelnen Schichten signifikante Auswirkungen auf die resultierenden Restnutzungsdauern haben. Da unterschiedliche Materialeigenschaften innerhalb des AP 9/S-Verfahrens jedoch nicht berücksichtigt werden können, sondern lediglich ein standardisiertes Abschreibungsmodell angewendet wird, ist es nicht verwunderlich, dass die berechneten Restnutzungsdauern nach den RSO Asphalt und dem AP 9/S merklich voneinander abweichen. Dies bestätigt abermals die Notwendigkeit der Gewährleistung ausreichender Materialqualitäten.

Es ist anzumerken, dass auf allen Abschnitten A0 bis A4 lediglich eine Querschnittsbeprobung statt einer Abschnittsbeprobung durchgeführt wurde, wobei lediglich rissfreie Stellen beprobt wurden. Während einer Begehung des Abschnitts A4 wurden jedoch mehrere Felder mit Rissen gesichtet. Gemäß den RSO Asphalt dürfen bei einer Abschnittsbeprobung (und unter Anwendung des probabilistischen Verfahrens) nicht rissfreie Stellen (bzw. Bohrkern) für die Ermittlung der Materialparameter nicht ausgeschlossen werden. Daraus lässt sich ableiten, dass durch die erfolgten Querschnittsbeprobungen, außerhalb sichtlich geschädigter Stellen, ggf. bessere Materialeigenschaften ermittelt wurden, als es bei einer Abschnittsbeprobung der Fall gewesen wäre, was wiederum im Vergleich zur Bewertung des Straßenzustandes auf Grundlage einer Abschnittsbeprobung zu längeren Restnutzungsdauern führen kann.

4.3 PMS-Rechenlauf

4.3.1 Bereitstellung der Eingangsdaten

Voraussetzung für die Anwendung des Pavement Management Systems (PMS) ist das Vorhandensein der in Tabelle 2 dargestellten Datengruppen. Um plausible Ergebnisse zu erzielen, müssen diese Daten möglichst vollständig und aktuell vorliegen. Im Regelfall werden die Daten über die externe

Schnittstelle (ESS) der Straßeninformationsbank TT-SIB[®] bzw. der nordrhein-westfälischen Straßeninformationsbank (NWSIB) exportiert. Die Informationen sind in den verschiedenen Objekten bzw. Objektklassen gespeichert und werden als Dateien der ESS oder als XML bereitgestellt. Unabdingbare Basis für die PMS-Anwendung bilden die Zustandsdaten. Diese müssen für alle Merkmale der ZEB (vgl. Tabelle 1) für die zu betrachtenden Netzbereiche vorliegen.

Die Dateien der ESS werden miteinander verknüpft, um die Datentabellen für die Datengruppen nach Tabelle 2 zu erstellen. Bild 56 gibt einen Überblick zu den Beziehungen der einzelnen Dateien. Die Abschnittsfolgetabelle (ABF) ist die Grundlage für sämtliche Lokalisierungszuordnungen im Netz. Werden konsistente Daten in der Straßendatenbank vorausgesetzt, ermöglicht die ABF eine 1:1-Verknüpfung mit dem Geoteil der Straßendatenbanken (GIS) und somit zu den MapInfo-Layern des Straßennetzes. Damit können im Netzknoten-Stationierungs-System lokalisierte Daten auch grafisch in Karten dargestellt werden.

Die in den Tabellen der einzelnen Datengruppen zusammengefassten Informationen entstammen verschiedenen Objekten der TTSIB. Diese werden zunächst über die ABF den Straßen zugeordnet und miteinander verknüpft (Bild 56). Dabei sind in jedem Fall die Konsistenz und Plausibilität zu prüfen und ggf. Korrekturen vorzunehmen.

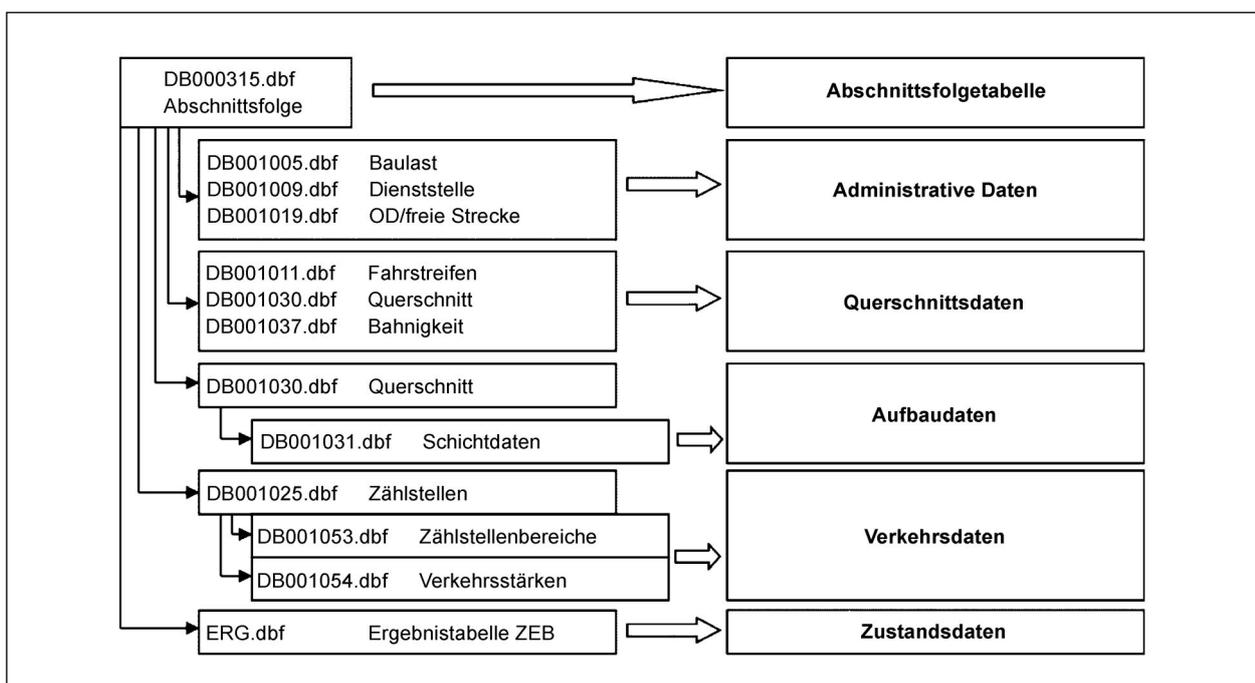


Bild 56: Verknüpfungsschema ESS zu PMS-Datengruppen (KRAUSE 2017)

Die Bezugseinheiten für das PMS sind immer die sogenannten (zustands-)homogenen Abschnitte (vgl. Kapitel 2.1.3). Diese werden mit standardisierten Programmen auf der Grundlage der ZEB-Erfassungsabschnitte (Ergebnistabelle der ZEB) gebildet (vgl. Kapitel 3.3.2). Um die Tabelle mit den PMS-Eingangsdaten zu erstellen, werden die Inhalte der einzelnen Datengruppen auf die homogenen Abschnitte projiziert und die Berechnungseingangswerte ermittelt. Das sind, neben den Informationen zur Lokalisierung des Abschnittes, zum Beispiel die Mittelwerte des Zustandes, längengewichtete mittlere Breiten und DTV-Zahlen, Erhaltungsfläche oder häufigste Werte für die Schichtdaten zur Berechnung des Substanzwertes (Bestand).

Bei der Standardanwendung des PMS wird die Tabelle mit den Berechnungseingangswerten für homogene Abschnitte mit einer spezifischen Software (PMS-I/O) generiert. Um die Schnittstellendatei für

ADtoPave bereit zu stellen und die entsprechenden Berechnungsergebnisse zu integrieren, wurde die Tabelle mit den Berechnungseingangswerten modifiziert und die Daten mithilfe individueller Access-Module erstellt. In Tabelle 18 ist die Struktur der Basisstabelle für das PMS zusammengestellt und der Inhalt der Felder kurz beschrieben.

Da das Analysenet (Bild 25) auch im Hinblick auf die Vollständigkeit der Daten ausgewählt wurde, sind die für die PMS-Berechnungen erforderlichen Daten für alle Abschnitte verfügbar. Die Restnutzungsdauer wird mit den in ADtoPave berechneten Werten besetzt. Die bei der Bewertung nach den ZTV ZEB-StB aus den Zustandswerten für die Einzelmerkmale zu ermittelnden Teilwerte, der Gesamtwert sowie der Zustandswert Restnutzungsdauer ZW_{RND} (vgl. Kapitel 3.2) werden im PMS intern berechnet und sind daher als Eingangswert nicht erforderlich.

Feldname	Beschreibung	Feldname	Beschreibung (Fortsetzung)
f_Key	interne ID	RND	Restnutzungsdauer nach den RSO
RoadName	Strassenname + Richtung	VAUN	Verhaltensklasse ZAUN
Name	Abschnitts-Code	VSPT	Verhaltensklasse ZSPT
From	interne Lokalisierung Anfang	VSPH	Verhaltensklasse ZSPH
To	interne Lokalisierung Ende	VGRI	Verhaltensklasse ZGRI
From_Descript	Beschreibung (Anfang)	VRIS	Verhaltensklasse ZRIS
To_Descript	Beschreibung (Ende)	VRSF	Verhaltensklasse ZRSF
STR_KL	Straßenklasse (A, B, L, K o.ä.)	VSUB	Verhaltensklasse ZSUB
STR_NR	Straßennummer	OAUN	Startwert Allg. Unebenheit
STR_BSTB	Zusatzbuchstabe bei Str.-Nr.	OSPT	Startwert Spurrinnen
LAGE	Lage in Stationierungsrichtung	OSPH	Startwert Wassertiefe
STREIFEN	Fahrstreifen	OGRI	Startwert Griffigkeit
VNK_A	von Netzknoten-Anfang	ORIS	Startwert Risse
NNK_A	nach Netzknoten-Anfang	ORSF	Startwert Restschadensfläche
ABSNR_A	Abschnittsnr.-Anfangsstationierung	OMKL	vorbesetzte Mängelklasse
STAT_A	Stationierung (m) Abschnittsanfang	OD	Ortsdurchfahrt (=0)/Freie Strecke (=1)
VNK_E	von Netzknoten-Ende	EFS	einbezogene Fahrstreifen
NNK_E	nach Netzknoten-Ende	HEZ	Zulässigkeit Hocheinbau
ABSNR_E	Abschnittsnr.-Endstationierung	DCK	vorhandene Deckenart
STAT_E	Stationierung (m) Abschnittsende	BKP	erf. Belastungsklasse Prognose
FLENGTH	Länge homogener Abschnitt in m	ERH	erf. Verstärkung in cm
TRAV_WAY	Erhaltungsbreite in m	HFR	verfügbare Höhe in cm
AADT	DTV des Erhaltungsquerschnitts	FRSI	Frostsicherheit
DTV	DTV (Gesamtquerschnitt) SVZ 2015	ABJ	geplantes Ausbaujahr

Tab. 18: Berechnungseingangswerte für das PMS

Feldname	Beschreibung	Feldname	Beschreibung (Fortsetzung)
DTVSV	DTV des Schwerverkehrs	ETW	Zustand Entwässerung
LMA	Art der letzten Maßnahme	EFL	Erhaltungsfläche in qm
YR_LSTWK	Jahr der letzten Maßnahme	ADMIN	Code für Land, SBA, SM
COM_TRT	vorgegebene Maßnahme – Art	SBA	Code für Straßenbauamt o.ä.
COM_YEAR	vorgegebene Maßnahme – Kosten	VEHTYPE_01	Anteil Pkw – Freie Strecke [%]
COM_COST	vorgegebene Maßnahme – Jahr	VEHTYPE_02	Anteil Bus – Freie Strecke [%]
COM_BUD	vorgegebene Maßnahme – Budget	VEHTYPE_03	Anteil Lkw – Freie Strecke [%]
ZAUN	Zustandswert Allgem. Unebenheiten	VEHTYPE_04	Anteil Lz – Freie Strecke [%]
ZSPT	Zustandswert Spurrinnen	VEHTYPE_05	Anteil Pkw – Ortsdurchfahrt [%]
ZSPH	Zustandswert Wassertiefe	VEHTYPE_06	Anteil Bus – Ortsdurchfahrt [%]
ZGRI	Zustandswert Griffigkeit	VEHTYPE_07	Anteil Lkw – Ortsdurchfahrt [%]
ZRIS	Zustandswert Risse	VEHTYPE_08	Anteil Lz – Ortsdurchfahrt [%]
ZRSF	Zustandswert Restschadensfläche	VEHTYPE_09	nicht benutzt
ZSUB	Zustandswert Substanz AP 9/S	VEHTYPE_10	nicht benutzt
MKL	Mängelklasse – berechnet	HOM_ABS	Bezeichnung homogener Abschnitt

Tab. 18: Fortsetzung

4.3.2 Grundlagen der Sensitivitätsanalyse

Der Einfluss ausgewählter Kombinationen der Materialkennwerte (Tabelle 13) auf die PMS-Ergebnisse wurde anhand verschiedener Vergleichsrechnungen untersucht. Als Standardkonfiguration wird nachfolgend das bei der Erhaltungsbedarfsprognose zum BVWP 2030 (MAERSCHALK et al. 2016) verwendete PMS-Setup bezeichnet und verwendet. Die Modellgrundlagen für diese Standardkonfiguration sind im Wesentlichen in der Literatur (MAERSCHALK, KRAUSE 2004; KRAUSE, MAERSCHALK 2010) dargestellt. Für die Vergleichsrechnungen wurden zusätzlich zur Standardkonfiguration die in Kapitel 3.2 beschriebenen Parameter und Bedingungen in das PMS implementiert. Die dafür erforderlichen Filter, Funktionen, Anwendungsbereiche und Rücksetzwerte wurden erstellt. Über einen vor der Analyse festzulegenden Eingangswert (0 – Standardberechnung auf Grundlage des AP 9/S; 1 – Berechnung auf Grundlage der nach den RSO Asphalt berechneten Restnutzungsdauern) wird die Berechnungsmethode im PMS ausgewählt.

Im PMS erfolgt eine Optimierung auf Grundlage eines Wirksamkeits-Kosten-Verhältnisses, um mit den verfügbaren Haushaltsmitteln einen möglichst großen Nutzen (Wirksamkeit) im betrachteten Analysenetz zu erzielen. Der Nutzen wird dabei durch die über den Analysezeitraum addierten Differenzen der Werte des internen Optimierungskriteriums für die Alternative ohne Maßnahme und mit Maß-

nahme (Wirksamkeitsintegral) gebildet. Das interne Optimierungskriterium ZGWI setzt sich aus den verschiedenen Teilwerten wie folgt zusammen.

Bei Standardkonfiguration:

$$\text{ZGWI} = 0,25 * \text{TWE} + 0,05 * \text{TWN} + 0,25 * \text{SUB} + 0,45 * \text{SWB} \quad (12)$$

mit

ZGWI Zustand Gesamtwert Intern (internes Optimierungskriterium im PMS)

TWE Teilwert Ebenheit nach (FGSV ZTV ZEB 06/18)

TWN Teilwert Nässe nach (FGSV ZTV ZEB 06/18)

SUB Substanzwert (Oberfläche) nach (FGSV ZTV ZEB 06/18)

SW_B Substanzwert (Bestand) nach (FGSV AP9/S 2019E)

Bei Konfiguration mit Restnutzungsdauer:

$$\text{ZGWI} = 0,25 * \text{TWE} + 0,05 * \text{TWN} + 0,25 * \text{SUB} + 0,45 * \text{ZW}_{\text{RND}} \quad (13)$$

mit

ZW_{RND} Zustandswert Restnutzungsdauer nach Bild 13

Damit haben die mit ADtoPave ermittelten Restnutzungsdauern einerseits durch die in Kapitel 3.2 beschriebenen Mängelklassen und Auswahlkriterien für die Maßnahmen sowie andererseits über das interne Optimierungskriterium (Substitution von SUB durch ZW_{RND}) Einfluss auf die Ergebnisse der PMS-Berechnungen.

Die Berechnungen im PMS mit Berücksichtigung der Restnutzungsdauer basieren auf den ADtoPave-Ergebnissen mit den Materialeigenschaften ADS_2, ABS_2 und verschiedenen Kombinationen der Materialeigenschaften in der ATS nach Tabelle 13 mit einer Verkehrszunahme des $DTV^{(SV)}$ um 3 %.

Zur Auswahl der für die Sensitivierung im PMS heranzuziehenden Berechnungsvarianten für die Restnutzungsdauer auf Netzebene (Bild 35), wurden die Verteilungen der Restnutzungsdauern analysiert und gegenüber gestellt. Bild 57 zeigt jeweils die prozentualen Anteile der Restnutzungsdauerklassen an der Gesamtfläche des Analysenetzes.

Das Bild verdeutlicht den gravierenden Einfluss der für die Berechnung mit ADtoPave abgeleiteten allgemeingültigen Materialeigenschaften (vgl. Kapitel 4.1) der neun fiktiven Asphalttragschichtgemische aus der Kreuzkombination von drei Hauptkurven (oben, mitte, unten) mit drei unterschiedlichen Ermüdungsfunktionen (oben, mitte, unten). Für die günstigste Kombination 221 ergeben sich auf rund 90 % der Fläche des Analysenetzes Restnutzungsdauern von über 30 Jahren. Bei der schlechtesten Kombination 229 können fast 85 % als ausgefallen ($RND < 2$ Jahre) deklariert werden.

Signifikante Auswirkungen auf die PMS-Berechnungen sind insbesondere für Restnutzungsdauern zwischen 2 und 30 Jahren zu erwarten (Kapitel 3.2, Fall 4 bis Fall 6). Die größte Spreizung in diesem Bereich ergibt sich für die Kombination 225, die daher als Referenzvariante bei der Berechnung mit Restnutzungsdauern im PMS gewählt wird. Bei quasi ausgefallenen Abschnitten ist nur noch eine grundlegende Erneuerung (E2) zulässig, wenn Schäden an der Oberfläche erkennbar werden (Kapitel 3.2, Fall 1 und Fall 2). Bei Nutzungsdauern über 30 Jahren greift die übliche Mängelklassenbildung auf Basis des Oberflächenzustandes (Kapitel 3.2, Fall 3). Treten hier unabhängig von der ermittelten Restnutzungsdauer gravierende Schäden an der Oberfläche auf (Hinweise hierzu liefern die ZEB Ergebnisse), sind aufgrund der gesetzlich vorgeschriebenen Verkehrssicherungspflicht an diesen Strecken Erhaltungsmaßnahmen erforderlich.

In Bild 58 wurden die Restnutzungsdauerklassen aus Bild 57 im Hinblick auf die o. g. Auswirkungen im PMS zusammengefasst. Neben der Referenzvariante 225 wurden zusätzlich die Kombinationen 222 und 228 für die Berechnungen im PMS herangezogen, um eine gewisse Spannweite für den Vergleich zu gewährleisten.

Bei den ursprünglichen Testrechnungen wurden die Rücksetzwerte für die Restnutzungsdauern nach Maßnahmen entsprechend Kapitel 3.2 implementiert. Dabei wurde die Restnutzungsdauer nicht nur bei E2-Maßnahmen, sondern auch bei E1-Maßnahmen erhöht (+ 10 Jahre). Da die Methodik nach den RSO Asphalt das Versagen der Tragschicht als

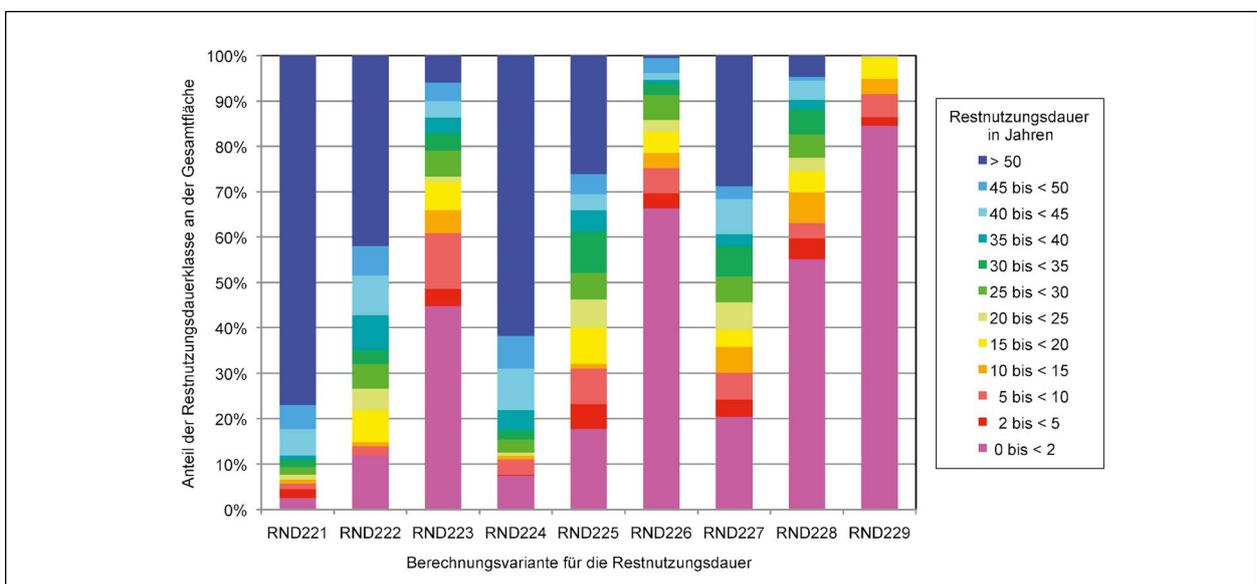


Bild 57: Verteilung der Restnutzungsdauerklassen im Analysenetz in % der Fläche

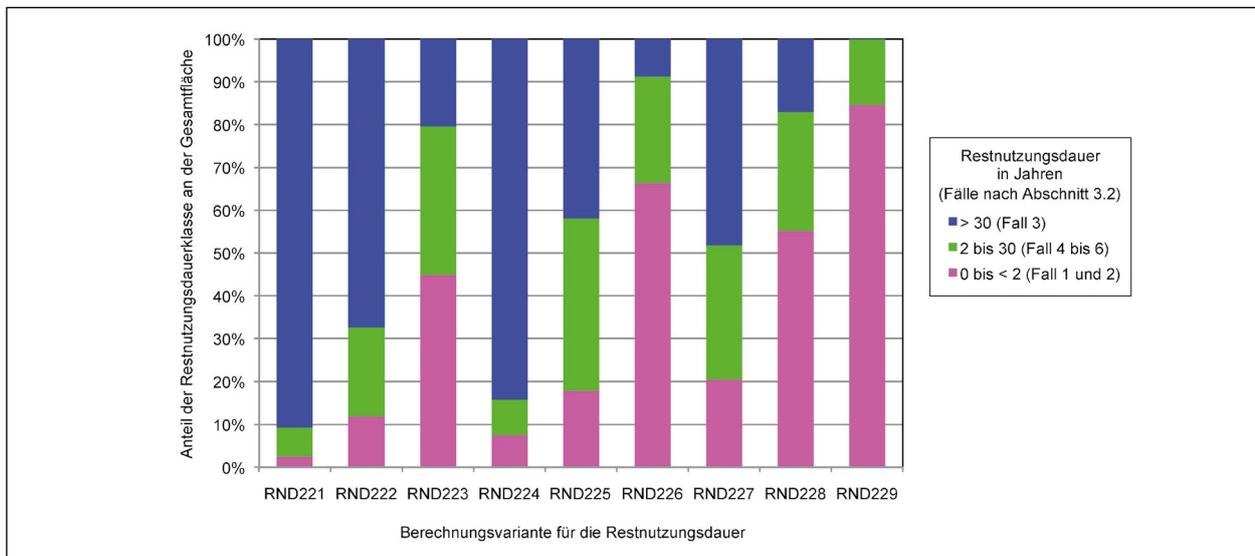


Bild 58: Verteilung der Restnutzungsdauern im Analysenetz nach Relevanz im PMS in % der Fläche

Ausfallkriterium zugrunde legt und ein Austausch der Decke (Deck- und Binderschicht) hierauf keinen direkten Einfluss hat, wurde bei den Vergleichsrechnungen für die Referenzvariante 225 und die Kombinationen 222 und 228 auf die Erhöhung der Nutzungsdauer bei E1 verzichtet. Zu Vergleichszwecken wurde dennoch für die Kombination 225 ein Rechenlauf mit Erhöhung der Nutzungsdauer bei E1-Maßnahmen durchgeführt.

Für die Auswertung der PMS-Ergebnisse werden die folgenden Berechnungsläufe herangezogen:

- Standardkonfiguration PMS mit Substanzwert (Bestand) nach dem AP 9/S (SUB225),
- Referenzvariante mit Berücksichtigung der Restnutzungsdauern für Kombination 225 (RSO225),
- Vergleichsvariante mit Berücksichtigung der Restnutzungsdauern für Kombination 222 (RSO222),
- Vergleichsvariante mit Berücksichtigung der Restnutzungsdauern für Kombination 228 (RSO 228),
- Vergleichsvariante mit Berücksichtigung der Restnutzungsdauern für Kombination 225 und Erhöhung der Restnutzungsdauern bei E1 (RSO225mE1R).

4.3.3 Ergebnisse der PMS-Berechnungen

Die PMS-Berechnungen erfolgen über einen Betrachtungszeitraum von 15 Jahren für ein Budget-

szenario von 10 Mio. Euro pro Jahr mit der PMS-Software dTIMS[®] Version 9.5. Zum Vergleich werden die zeitlichen Veränderungen (Zustandsentwicklung) folgender Analysevariablen:

- GEB Gebrauchswert nach (FGSV ZTV ZEB 2018),
- SUB Substanzwert (Oberfläche) nach (FGSV ZTV ZEB 2018),
- SW_B Substanzwert (Bestand) nach AP 9/S (FGSV AP9/S 2019E),
- RND Restnutzungsdauer im Analysejahr als Restnutzungsdauerklassen

sowie die Flächenanteile der Maßnahmenkategorien:

- I1 Instandsetzung auf der Deckschicht (Dünnschichtbeläge),
- I2 Instandsetzung an der Deckschicht (Deckschicht im Tief-/Hocheinbau),
- E1 Erneuerung der Decke (Deck- und Binderschicht im Tief-/Hocheinbau),
- E2 Erneuerung von mehr als der Decke (Tiefeinbau gebundene Befestigung/gesamter Oberbau)

dargestellt.

Bild 59 bis Bild 63 beinhalten jeweils die für die fünf in Kapitel 4.3.2 festgelegten Berechnungsvarianten prognostizierten Zustandsentwicklungen der o. g. Analysevariablen. Die verwendeten Farben veranschaulichen folgende Zustandsbereiche:

- < 1,5
- 3,5 bis < 4,5
- 1,5 bis < 2,5
- ≥ 4,5
- 2,5 bis < 3,5

Die Legende für die Restnutzungsdauerklassen ist in den jeweiligen Bildern enthalten.

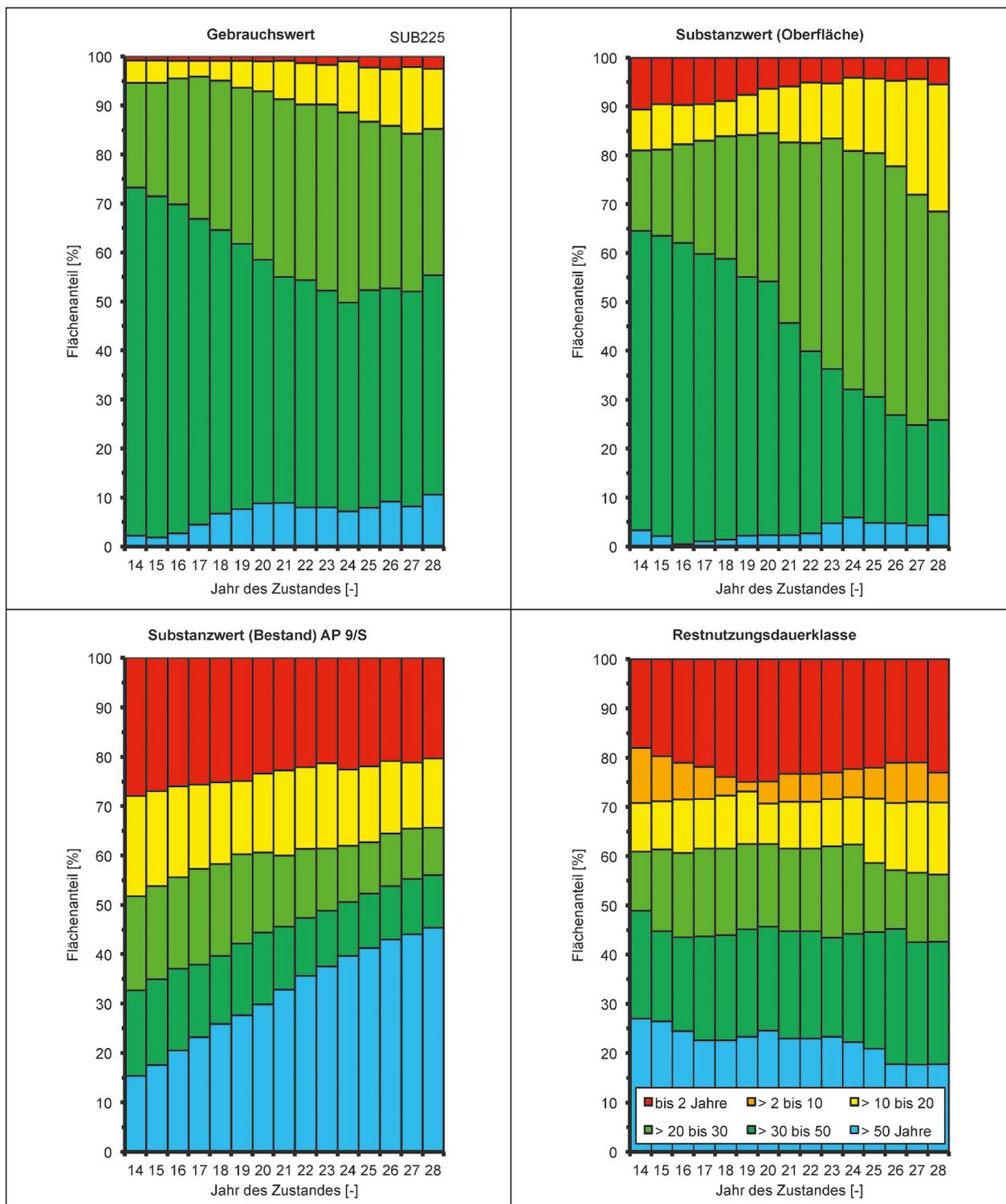


Bild 59: Entwicklung des Zustands und der Restnutzungsdauer bei Standardkonfiguration PMS mit Substanzwert (Bestand) nach dem AP 9/S (Restnutzungsdauer für Kombination 225)

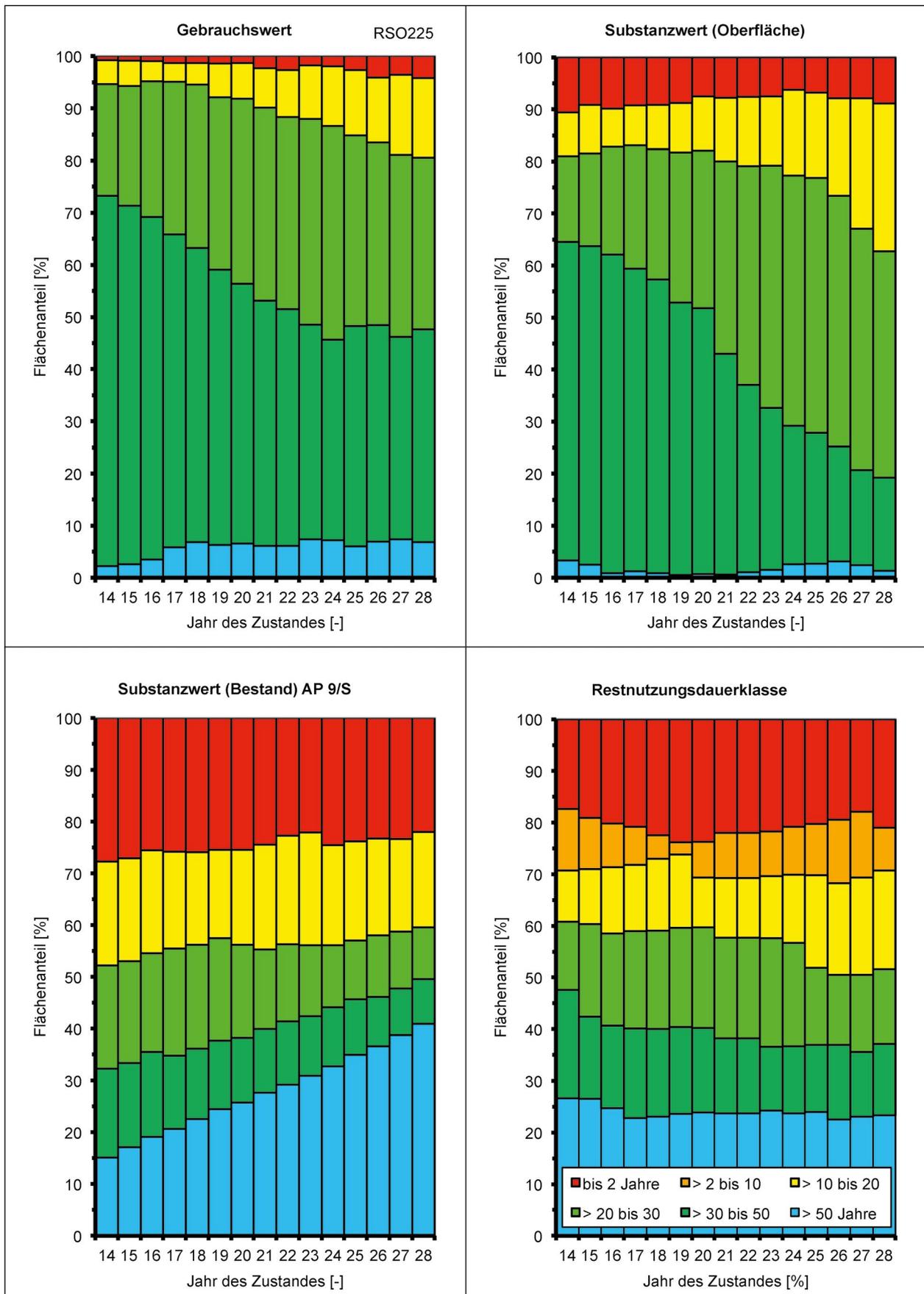


Bild 60: Entwicklung des Zustandes und der Restnutzungsdauer bei PMS Referenzvariante mit Berücksichtigung der Restnutzungsdauer für Kombination 225

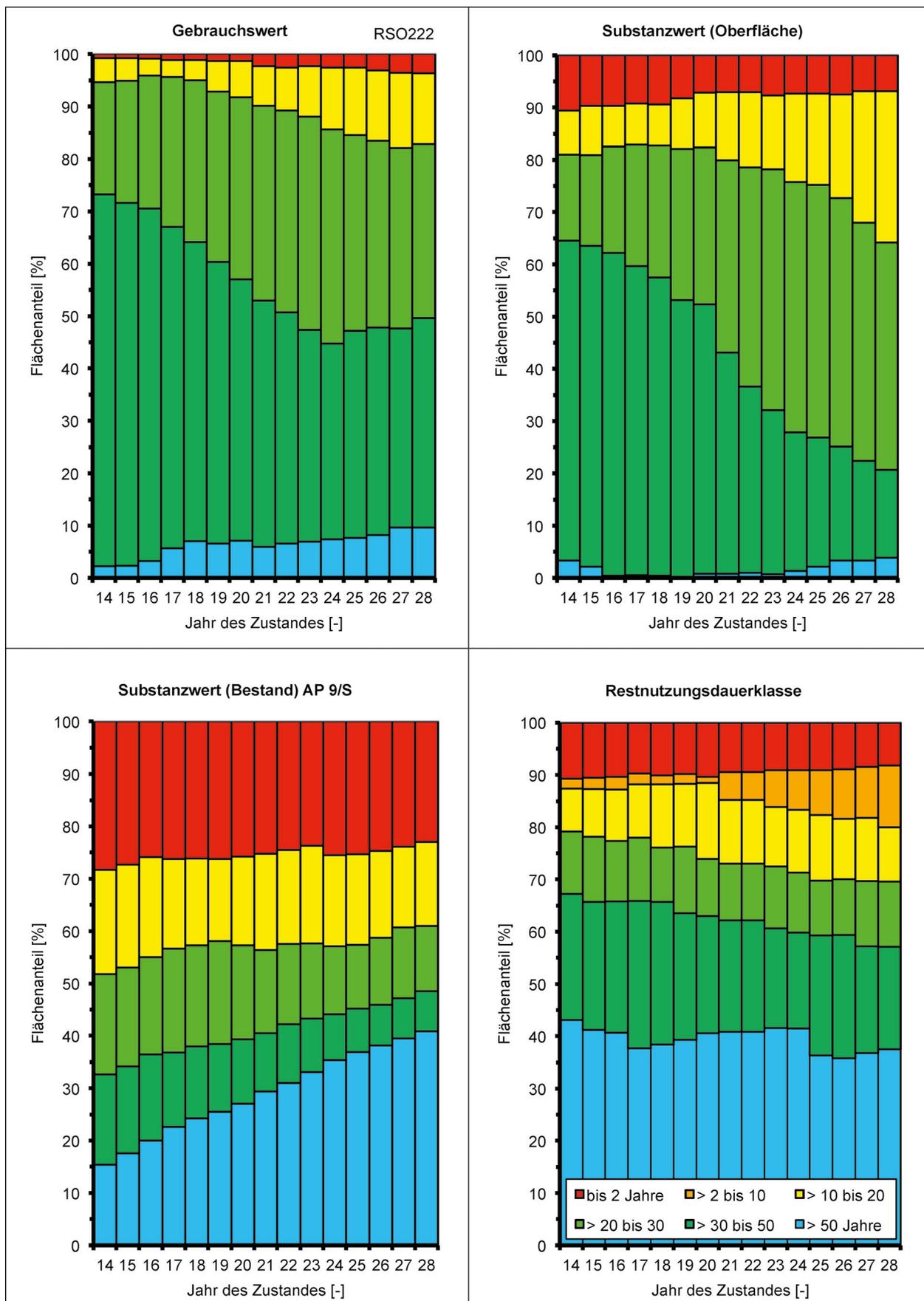


Bild 61: Entwicklung des Zustandes und der Restnutzungsdauer bei PMS Vergleichsvariante mit Berücksichtigung der Restnutzungsdauern für Kombination 222

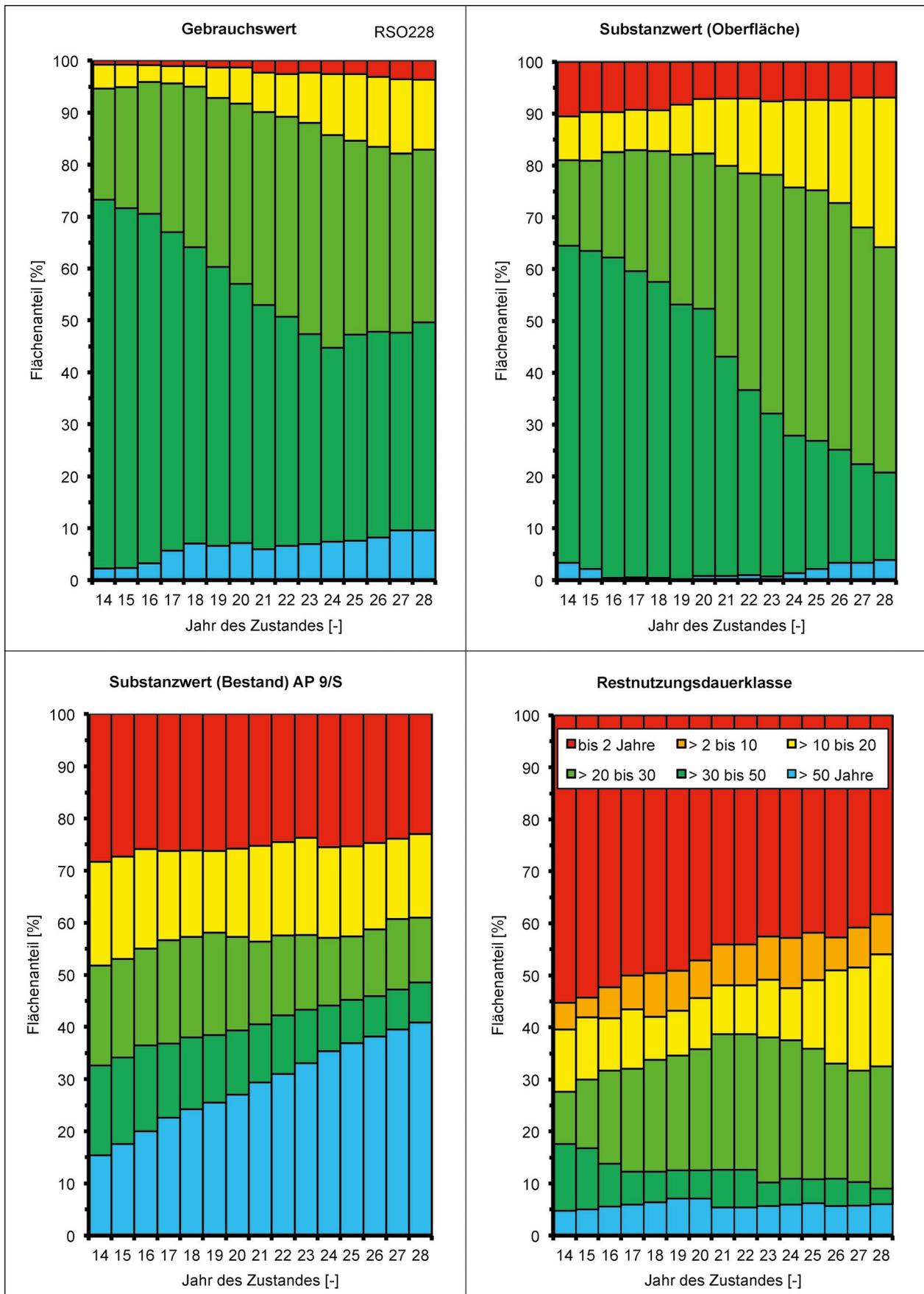


Bild 62: Entwicklung des Zustandes und der Restnutzungsdauer bei PMS Vergleichsvariante mit Berücksichtigung der Restnutzungsdauern für Kombination 228

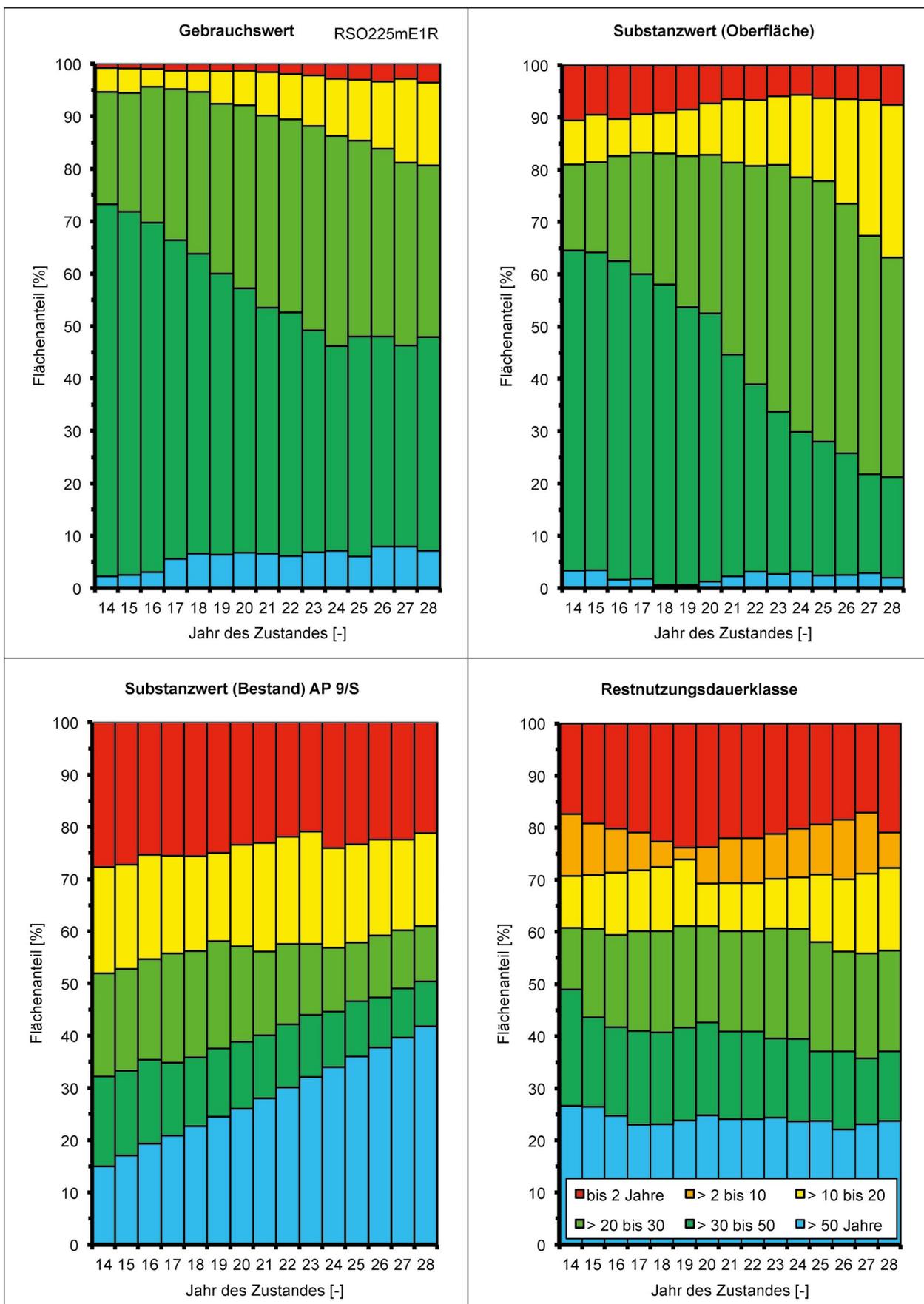


Bild 63: Entwicklung des Zustandes und der Restnutzungsdauer bei PMS Vergleichsvariante mit Berücksichtigung der Restnutzungsdauern für Kombination 225 mit Erhöhung der Restnutzungsdauern bei E1

In Bild 64 bis Bild 68 sind die Verteilungen der vier Maßnahmenkategorien I1, I2, E1 und E2 für die fünf Berechnungsvarianten dargestellt. Der rechte Teil

zeigt die Verteilungen für die Jahre innerhalb des Betrachtungszeitraumes, der linke Teil die Verteilung über den gesamten Zeitraum aggregiert.

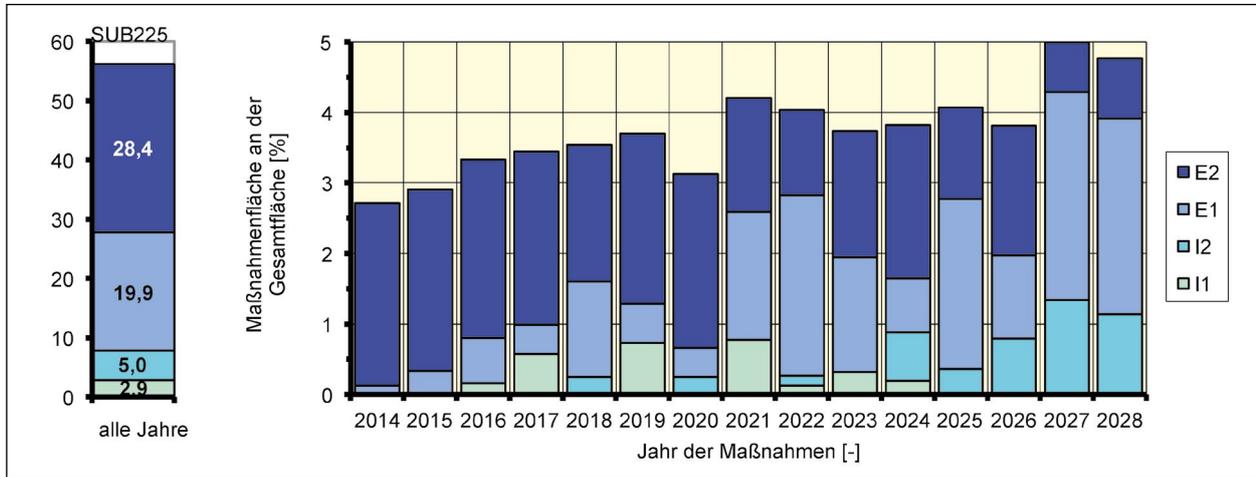


Bild 64: Verteilung der Maßnahmenkategorien bei Standardkonfiguration PMS mit Substanzwert (Bestand) nach dem AP 9/S

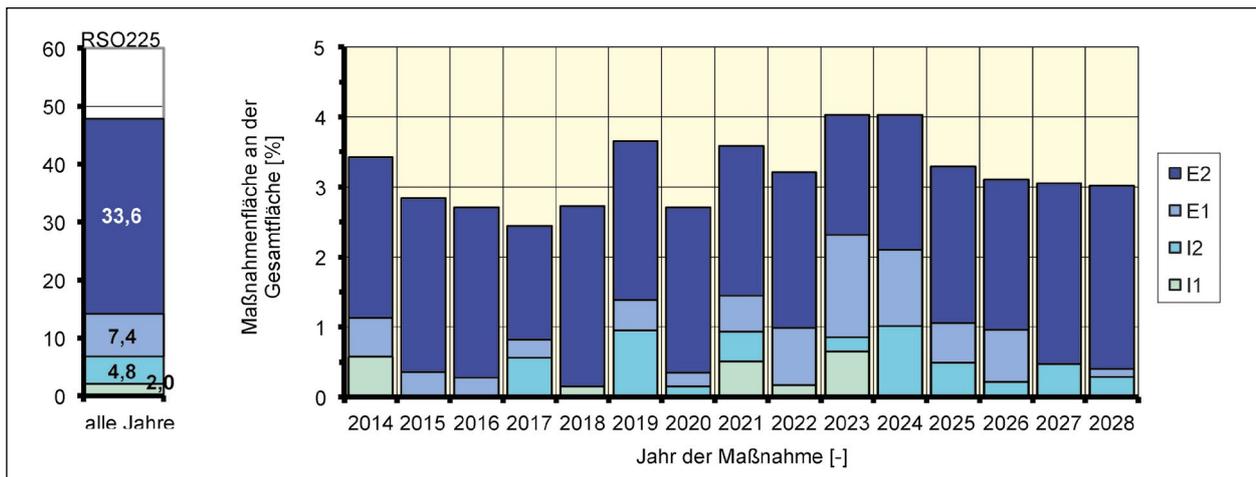


Bild 65: Verteilung der Maßnahmenkategorien bei PMS Referenzvariante mit Berücksichtigung der Restnutzungsdauern für Kombination 225

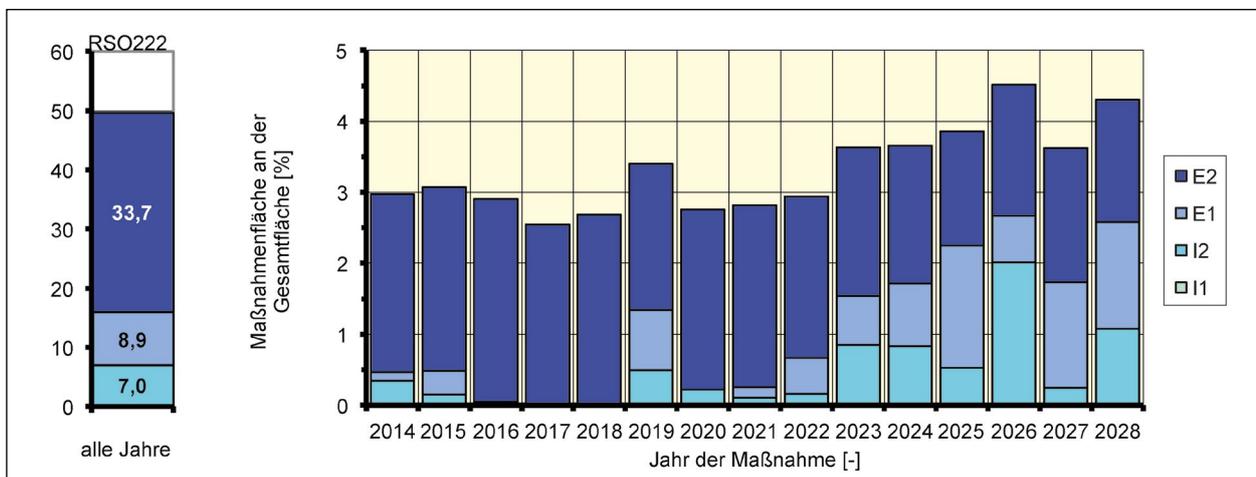


Bild 66: Verteilung der Maßnahmenkategorien bei PMS Vergleichsvariante mit Berücksichtigung der Restnutzungsdauern für Kombination 222

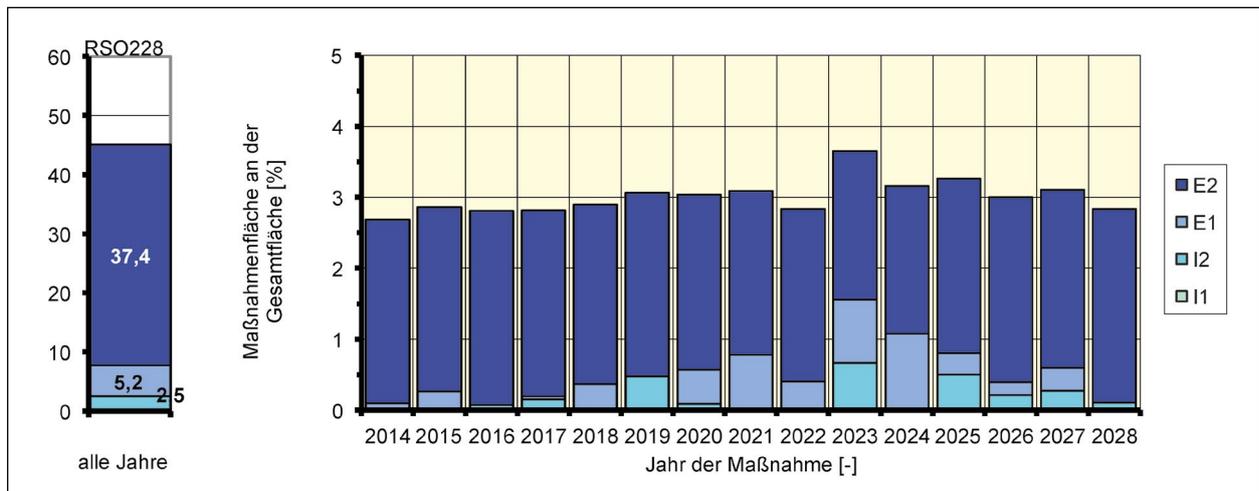


Bild 67: Verteilung der Maßnahmenkategorien bei PMS Vergleichsvariante mit Berücksichtigung der Restnutzungsdauern für Kombination 228

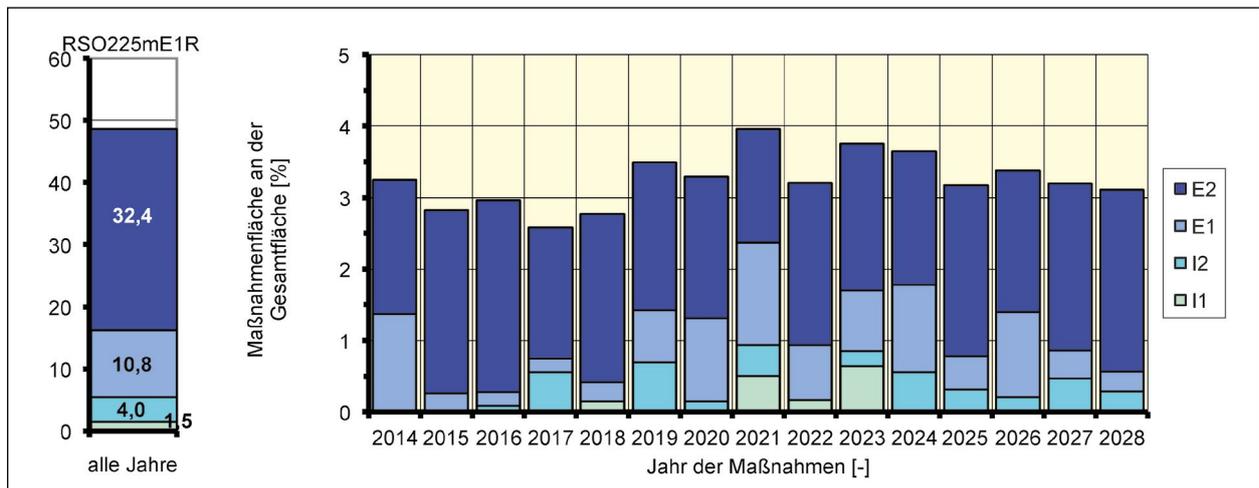


Bild 68: Verteilung der Maßnahmenkategorien bei PMS Vergleichsvariante mit Berücksichtigung der Restnutzungsdauern für Kombination 225 mit Erhöhung der Restnutzungsdauern bei E1

4.3.4 Vergleichende Bewertung

Zur Beurteilung der Auswirkungen der verschiedenen Berechnungsmethoden (SUB225, RSO225, RSO225mE1R) und der ausgewählten Kombinationen von Materialeigenschaften (RSO222, RSO225, RSO228) wurden bei allen Berechnungen neben den Zustandswerten der Einzelmerkmale und den daraus resultierenden Teilwerten sowohl der Substanzwert (Bestand) nach AP 9/S als auch die Restnutzungsdauer und der Zustandswert für die Restnutzungsdauer als Variable mitgeführt und prognostiziert. Die vergleichende Bewertung beschränkt sich auf die in Kapitel 4.3.2 genannten Variablen, da diese die zu beurteilenden Kriterien Oberflächenzustand und strukturelle Substanz hinreichend beschreiben.

Die Gegenüberstellung der PMS-Ergebnisse zeigt für alle Varianten eine vergleichbare Tendenz der voraussichtlichen Entwicklung des Oberflächenzustandes, repräsentiert durch den Gebrauchswert und den Substanzwert (Oberfläche). In jedem Fall sind bei einer Budgetvorgabe von 10 Mio. Euro pro Jahr für das Analysenetz eine leichte Verschlechterung des Gebrauchswertes und eine Reduzierung der Anteile im sehr schlechten Zustandsbereich (> 4,5) für den Substanzwert (Oberfläche) auf unterschiedlichem Niveau zu beobachten. Der Substanzwert (Bestand) im Analysenetz wird verbessert.

Bei der Verteilung der Restnutzungsdauern wird der im Startjahr der Prognose vorliegende Status quo bei den Berechnungsvarianten RSO225 und RSO225mE1R nahezu gehalten. Die Variante SUB225

zeigt eine geringfügige Verschlechterung der Restnutzungsdauern im Netz. Demgegenüber steht bei Variante SUB225 eine geringere Verschlechterung des Oberflächenzustandes als bei den RSO-Varianten. Mit der Standardkonfiguration des PMS (SUB225) wird demzufolge der Oberflächenzustand priorisiert, bei der RSO-Methodik liegt das größere Gewicht auf der Erhöhung der Restnutzungsdauern. Diese Schlussfolgerung wird auch bei der Betrachtung der Verteilungen der Maßnahmenkategorien bestätigt. Der Anteil an E2-Maßnahmen liegt bei Variante RSO225 deutlich höher als bei SUB225. Bei Erhaltungsbedarfsprognosen mit vorgegebenen Zielen hinsichtlich des Oberflächenzustandes sind folglich höhere Bedarfswerte zu erwarten, wenn eine Konfiguration mit Berücksichtigung der Restnutzungsdauer verwendet wird. Bei finanziellen Restriktionen ist die Standardkonfiguration SUB225 zur Vorbereitung der Erhaltungsplanung eher geeignet, die Gebrauchsfähigkeit zu erhalten und der Verkehrssicherungspflicht Rechnung zu tragen. Mit der RSO-Methodik wird durch die substanzorientierte Erhaltungsstrategie ein zukunftsorientiertes und nachhaltiges Handeln angestrebt, jedoch mit der Folge höherer erforderlicher Erhaltungsmittel.

Der Vergleich der Kombinationen der Materialeigenschaften (RSO222, RSO225, RSO228) zeigt für alle Varianten beim Oberflächenzustand und beim Substanzwert (Bestand) einen nahezu identischen Verlauf. Die Veränderung der Restnutzungsdauern ist geprägt durch die sehr unterschiedlichen Ausgangsverteilungen der Nutzungsdauern. Der hohe Anteil an ausgefallenen Abschnitten wird bei Variante RSO228 erkennbar verringert, während RSO225 den Status quo behält. Bei Variante RSO222 reduziert sich zwar der Anteil ausgefallener Abschnitte geringfügig, der Anteil mit Restnutzungsdauern zwischen 2 und 10 Jahren steigt aber deutlich. Erwartungsgemäß ist der Anteil an E2-Maßnahmen bei Variante RSO228 am höchsten. Eine Empfehlung, welche Kombinationen von Materialeigenschaften bei der Anwendung auf reale Netze zu bevorzugen ist, kann anhand der PMS-Ergebnisse nicht gegeben werden. Es handelt sich in jedem Fall um statistisch abgeleitete Materialeigenschaften, die abschnittsspezifisch von den durch Beprobung gewonnenen Werten abweichen können.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel des Forschungsvorhabens war es, durch die realitätsnähere Ermittlung des strukturellen Substanzwertes auf Grundlage der Entwurfsfassung der „Richtlinien zur Bewertung der strukturellen Substanz des Oberbaus von Verkehrsflächen in Asphaltbauweise“ (RSO Asphalt) anstelle des momentan angewendeten Arbeitspapiers 9, Reihe S (AP 9/S), die Ergebnisqualität der rechnergestützten Erhaltungsplanung netzweit und objektscharf erhöhen, die Erhaltung nachhaltig planen und den Straßenzustand durch zielgerichteten und wirtschaftlichen Einsatz der verfügbaren Erhaltungsmittel langfristig verbessern zu können. Dazu wurden auf Objektebene Vergleichsrechnungen vornehmlich mit dem Verfahren nach den RSO Asphalt, aber auch mit dem Verfahren nach dem AP 9/S, durchgeführt. Mittels eines synthetischen Analysenetzes, basierend auf realen Straßenabschnitten und den damit verbundenen Daten, konnten Streubreiten bei den Materialeigenschaften und den daraus resultierenden Nutzungs- bzw. Restnutzungsdauern ermittelt werden. Die so gewonnenen Daten wurden anschließend als Grundlage für Beispielrechnungen mit dem Pavement Management System (PMS) genutzt. Für die PMS-Rechnungen mussten zunächst die Ergebnisse der nach den RSO Asphalt durchgeführten ADtoPave-Berechnungen in den Bearbeitungsablauf eines PMS integriert und ein entsprechend angepasstes Modell-Setup für das PMS aufgestellt werden. Im Einzelnen wurde wie folgt vorgegangen:

- Ergänzend zu den bekannten Regelwerken wurde eine ausführliche Literaturanalyse zu Themen rund um die Restwertabschätzung im PMS durchgeführt. Dazu wurde in den folgenden Bereichen recherchiert: systematisches Erhaltungsmanagement; PMS; Datenerfassung, Aufbereitung und Analyse im Bereich des Erhaltungsmanagements sowie strukturelle Bewertung von Straßenbefestigungen. Ein besonderes Augenmerk lag dabei auf dem AP 9/S, den RSO Asphalt und dem PMS.
- Aufbauend auf den Grundlagen der systematischen Erhaltungsplanung wurde ein Bearbeitungsablauf zur Einbindung der RSO Asphalt in das PMS entwickelt, dabei entstanden zwei Varianten: Die Variante I sieht den direkten Ersatz des AP 9/S durch die RSO Asphalt vor. Die zweite Variante arbeitet mit einem veränderten An-

satz zur Entscheidungsfindung, in dem der Erhaltungsbedarf getrennt nach Oberflächeneigenschaften und Substanz nach den RSO Asphalt ermittelt wird. Ein anschließendes Optimierungsverfahren liefert eine quasi-optimale Lösung. Da für die zweite Variante weitere Grundlagenarbeit im Bereich der Entscheidungsfindung zu leisten gewesen wäre, wurde das erste Verfahren mit dem direkten Ersatz des AP 9/S gewählt. Daraus folgend musste die Datenaufbereitung geändert werden, eine Normierungsfunktion für die nach den RSO Asphalt ermittelten Restnutzungsdauern entwickelt und das PMS-Modellsetup insbesondere beim Mängelklassenmodell, der Maßnahmenwirkung und den Optimierungskriterien angepasst werden.

- Als Grundlage für die Berechnungen nach den RSO Asphalt und dem AP 9/S wurde ein synthetisches Analysenet, bestehend aus rund 500 realen Bundesautobahnabschnitten, definiert. Für dieses Analysenet lagen neben Angaben zur Lokalisierung auch Querschnittsinformationen (zum Beispiel Fahrbahnanzahl, Fahrbahnbreite, Anzahl der Fahrstreifen, DTV im Querschnitt, DTV^(SV) im Querschnitt), Angaben zu Art, Dicke und Baujahr der im Aufbau befindlichen Schichten sowie Ergebnisse der letzten Zustandserfassung und -bewertung vor.
- Da für Berechnungen nach den RSO Asphalt auch Angaben zu dem Steifigkeitsverhalten aller im Aufbau befindlichen Asphaltsschichten sowie zu dem Ermüdungsverhalten der für einen Ermüdungsnachweis maßgebenden Asphalttragschicht benötigt werden, es auf Netzebene jedoch sehr zeit- und kostenintensiv ist, objektspezifische Beprobungen durchzuführen, wurden auf Basis aller den Autoren zur Verfügung stehenden Materialuntersuchungen allgemeingültige Materialeigenschaften für Asphaltdeck-, -binde- und -tragschichten ermittelt.
- Auf Grundlage der ermittelten allgemeingültigen Materialeigenschaften und des synthetischen Analysenetzes war es möglich, die Nutzungs- und Restnutzungsdauern nach dem AP 9/S und der Entwurfsfassung der RSO Asphalt zu berechnen. Diese Nutzungs- bzw. Restnutzungsdauern wurden dabei im Rahmen des Projektes als Indiz für die Abschätzung des Restwertes genutzt. Bei den durchgeführten Analysen konnte festgestellt werden, dass der weitestgehend gleichmäßige Verlauf der AP 9/S Berechnungs-

ergebnisse auf das Abschreibungsmodell (material- und zeitabhängige Abminderung der Schichtdicken (vgl. Kapitel 2.3.1)) zurückzuführen ist und die Verläufe der RSO-Berechnungsergebnisse große Unterschiede in Hinblick auf die ermittelten Nutzungs- bzw. Restnutzungsdauern aufweisen. Die dabei auf Grundlage der RSO-Berechnungen dargestellte Bandbreite an möglichen Nutzungs- bzw. Restnutzungsdauern ist auf die in den Berechnungen berücksichtigten unterschiedlichen Materialqualitäten zurückzuführen.

- Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden PMS-Rechenläufe mit Variation der Restnutzungsdauer aufgrund der unterschiedlichen Materialkombinationen durchgeführt. Dabei zeigte sich je nach Betrachtungsfall eine Tendenz zu einem höheren Anteil am Maßnahmentyp „Grundhafte Erneuerung“.

Im Einzelnen wurden im vorliegenden Forschungsprojekt folgende Ergebnisse erzielt:

- Mit der Analyse der vorhandenen Materialkenn- und darauf aufbauend mit den Vergleichsrechnungen wurde die zu erwartende Bandbreite der im Straßennetz vorhandenen Materialien in Bezug auf die Nutzungsdauer bzw. Restnutzungsdauer aufgezeigt.
- Durch die Vergleichsrechnungen nach den RSO Asphalt und dem AP 9/S wurden die Vor- und Nachteile beider Verfahren dokumentiert. Erwartungsgemäß ist bei Anwendung der RSO Asphalt eine differenzierte und damit realitätsnähere Bewertung der Nutzungs- bzw. Restnutzungsdauern von Asphaltbauweisen zu erzielen.
- Es konnte gezeigt werden, dass das Verfahren nach den RSO Asphalt grundsätzlich in den PMS-Algorithmus integriert werden kann. Im Rahmen der Testrechnungen wurden plausible Ergebnisse erzeugt.
- Gleichzeitig liegt ein umfassender Vorschlag zur Modifikation des PMS-Setups, also der Berechnungseingangswerte und der generellen Methoden zur Einbindung der RSO-Ergebnisse in das PMS vor.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der Weg der Substanzbewertung nach den RSO Asphalt auch in einem PMS eine zielführende Lösung darstellt. Auf diesem Weg sind in Zukunft zunächst zwei Aufgabenschwerpunkte zu lösen:

(1) Im Rahmen des Projektes war es nicht möglich, allgemeingültige Materialparameter, beispielsweise nach Klassen schlechter, mittlerer oder guter Qualität, mithilfe anderer, im Datenbestand verfügbaren Kriterien den definierten Abschnitten zuzuordnen.

(2) Die Anwendung des vorgeschlagenen Modells erfordert Erweiterungen in materialbezogenen Datendefinitionen und in der Datenaufbereitung mit dem Werkzeug PMS-I/O. Im Rahmen des Projektes wurde dies lediglich im „Labormaßstab“ gelöst, da es nicht Bestandteil des vorliegenden Projektes war.

Die Ergebnisse des vorliegenden Forschungsvorhabens sind demnach noch nicht in der Praxis umsetzbar, dazu müssten beide genannten Punkte weiterbearbeitet werden. Im Rahmen des vorliegenden Projektes war dies nicht Teil der Leistungsbeschreibung und wäre auch aufgrund der Projektdauer und der damit verbundenen Aufgabenerweiterung nicht umsetzbar gewesen. Auch ein Abwarten auf die Ergebnisse der RSO-Untersuchungsstrecken hätte dieses Problem nicht gelöst.

Abschließend ergibt sich zu folgenden Punkten weiterer Forschungsbedarf, der im Rahmen des Projektes nicht realisierbar war, jedoch als wichtig erachtet und deshalb als Ausblick mit einer Einschätzung ergänzt wird:

- Wie erläutert, war es im Rahmen des Forschungsprojektes nicht möglich, den einzelnen Untersuchungsabschnitten des Analysenetzes jeweils eine der Modellvarianten (basierend auf den allgemeingültigen Materialeigenschaften) auf Grundlage lokaler Gegebenheiten zuzuordnen. Eine eindeutige Zuordnung wäre nur durch eine Beprobung der Einzelabschnitte im Sinne der RSO Asphalt möglich gewesen. Folglich konnten für die ausgewählten Untersuchungsabschnitte keine belastbaren Aussagen hinsichtlich der zu erwartenden Nutzungs- bzw. Restnutzungsdauern getroffen werden. Dies hätte verbessert werden können, wenn die Ergebnisse der sogenannten RSO-Pilotstrecken vorgelegen hätten, wobei auch hier die Stichprobe für eine allgemeingültige Aussage zu gering erscheint.
- Aufgrund der geringen Anzahl an zur Verfügung stehenden realen Beprobungsstrecken war es im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens ebenfalls nicht möglich, das Verfahren im Zusammenwirken mit dem PMS abschließend zu validieren. Um jedoch in Zukunft die Qualität

der Ergebnisse der rechnergestützten Erhaltungsplanung netzweit und objektscharf erhöhen, die Erhaltung nachhaltig planen und den Straßenzustand durch zielgerichteten und wirtschaftlichen Einsatz der verfügbaren Erhaltungsmittel langfristig verbessern zu können, ist es notwendig, die realitätsnahe Ermittlung des strukturellen Substanzwertes voranzutreiben. Darauf weisen vor allem die aufgezeigten erheblichen Streuungen bei den festgestellten Materialqualitäten hin, wobei in diesem Zusammenhang hinsichtlich der Qualitätsanforderungen an Asphaltgemische gemäß technischem Regelwerk Abstimmungsbedarf zu vermuten ist.

- Während die objektspezifische Bewertung der strukturellen Substanz von Asphaltbefestigungen nach den RSO Asphalt erfolgen kann, ist es für die realitätsnahe Ermittlung des strukturellen Substanzwertes auf Netzebene notwendig, eine statistisch hinreichende Anzahl beprobter Strecken zu analysieren, damit eine Verifizierung der netzweit anzuwendenden Materialkennwerte vorgenommen werden kann. Realitäts- und praxisnahe Ergebnisse sind nur zu erwarten, wenn abschnittsspezifisch ermittelte Materialkennwerte zugrunde gelegt werden und damit der Netzzanteil mit Restnutzungsdauern im relevanten Bereich zwischen 2 und 30 Jahren deutlich erhöht wird. Lösbar wäre dies mit einem weiterführenden Projekt zur weitestgehend flächendeckenden Erhebung der erforderlichen materialspezifischen Aussagen. Sollte dies nicht flächendeckend ausführbar sein, ist zumindest die Erhebung auf einem Teilnetz auf Bundeslandebene anzustreben.
- Gleichzeitig muss eine Überarbeitung der materialbezogenen Datengrundlagen nach OKSTRA geprüft sowie der Bearbeitungsablauf der Datenaufbereitung mit dem PMS-I/O angepasst werden, damit die erforderlichen Auswertungen als Arbeitsroutine aufgesetzt werden können.

Als Ergebnis der Deckung des genannten Forschungsbedarfs und der Anwendung der daraus gewonnenen Erkenntnisse ist davon auszugehen, dass eine signifikante Verbesserung der Erhaltungsplanung bzw. des Straßenzustandes erreicht werden kann.

Literatur

- ADtoPave Version 2018.01.006, Alexander Zeißler, IDAV GmbH, Dresden
- dTIMS Version 9.5, Deighton Europe, Vienna, Austria
- BASt (2017) Bundesanstalt für Straßenwesen (2017): Straßenerhaltungsplanung. Randbedingungen, Anforderungen, Umsetzung. Online verfügbar unter <http://www.bast.de/DE/Strassenbau/Fachthemen/g33-strassenerhaltungsplanung.html>, zuletzt geprüft am 14.01.2017
- BERTHOLD et al. (2019) Berthold, D.; Großmann, A.; Simmert, C. (2019): Verfahren zur Bildung und Beschreibung zustandshomogener Abschnitte und repräsentativer Kennzahlen für das Erhaltungsmanagement. Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 29.0360-2014-BASt (Entwurf), erstellt im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Erfurt 2019 (unveröffentlicht)
- BORRMANN et al. (2018) Borrmann, A.; Dichtl, M.; König M.; Niever, M.; Radenberg, M.; Staschkiewicz, M.; Stöckner, M. (2018): BIM-basiertes Erhaltungsmanagement im Straßenbau. Zwischenbericht zum Forschungsprojekt FE-Nr. 04.0299/2016/MRB, erstellt im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), 2018 (unveröffentlicht)
- BRZUSKA (2018) Brzuska, A. (2018): Vergleichende Analyse zur strukturellen Substanzbewertung von Bundesfernstraßen. Masterthesis an der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Fakultät Architektur und Bauwesen (unveröffentlicht), Karlsruhe 2018
- Bundesrechnungshof (2015) Bundesrechnungshof (2015): Bericht an den Haushaltsausschuss des Deutschen Bundestages nach § 88 Abs. 2 BHO über die Erhaltungsbedarfsprognose im Bundesfernstraßenbau, Stand vom 22.05.2015. Online verfügbar unter <https://www.bundesrechnungshof.de/de/veroeffentlichungen/produkte/beratungsberichte/langfassungen/langfassungen-2015/2015-bericht-erhaltungsbedarfsprognose-im-bundesfernstrassenbau>, zuletzt geprüft am 16.04.2019
- BMVI (2017) Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.) (2017): Verkehr in Zahlen 2017/2018, 46. Jahrgang. DVV Media Group, Hamburg, 2017. Online verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-pdf-2017-2018.html>, zuletzt geprüft am 16.04.2019
- BMVI (2018) Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2018): ASB, Anweisung StraßeninformationsBank, Segment: Kernsystem, Version 2.04. Stand: 19.09.2018. Online verfügbar unter: https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Verkehrstechnik/Publikationen/Regelwerke/V-asb-kernsystem.pdf?__blob=publicationFile&v=5, zuletzt geprüft am 16.04.2019
- DIN (2011) Deutsches Institut für Normung e. V. (2011): Zerstörungsfreie Prüfung – Dickenmessung mit Ultraschall; Deutsche Fassung EN 14127:2011. Beuth Verlag, Berlin 2011
- DRÖGE (2017) Dröge, C. (2017): Systematische Nutzung von Bestandsdaten. In: Straße und Autobahn 68 (4). S. 279-286
- FGSV AP9/R1 (2001) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2001): Arbeitspapier Nr. 9/R 1 zur Erhaltungsplanung, Reihe R, Rechnergestützte Erhaltungsplanung für Fahrbahnbefestigungen, Abschnitt R 1, Standardwerte der Programmkenngößen. Arbeitsausschuss Systematik der Straßenerhaltung, FGSV Verlag GmbH, Köln, Ausgabe 2001
- FGSV AP9/R2 (2001) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2001): Arbeitspapier Nr. 9/R 2 zur Erhaltungsplanung, Reihe R, Rechnergestützte Erhaltungsplanung für Fahrbahnbefestigungen, Abschnitt R 2, Anforderungen an die Eingangsgrößen. Arbeitsausschuss Systematik der Straßenerhaltung, FGSV Verlag GmbH, Köln, Ausgabe 2001
- FGSV AP9/S (2003) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2003): Arbeitspapier Nr. 9/S zur Erhaltungsplanung, Reihe S, Substanzwert (Bestand). Arbeitsausschuss Systematik der Straßenerhaltung, FGSV Verlag GmbH, Köln, Ausgabe 2003
- FGSV AP9/S (2019E) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2019): Entwurf Arbeitspapier Nr. 9/S zur Erhaltungsplanung, Reihe S, Substanzwert (Bestand). Arbeitsausschuss Management der Straßenerhaltung, Köln, Entwurf 2019 (unveröffentlicht)

- FGSV AP Georadar (2016) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2016): Arbeitspapier, Anwendung des Georadars zur Substanzbewertung von Straßen, Teil A: Bestimmung von Schichtdicken des Oberbaus von Verkehrsflächenbefestigungen mit dem Georadar-Impulssystem. FGSV Verlag GmbH, Köln, Ausgabe 2016
- FGSV AP Trag A (2013) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2013): Arbeitspapier Tragfähigkeit, Teil A: Messsysteme. FGSV Verlag GmbH, Köln, Ausgabe 2013
- FGSV AP Trag B 2.1 (2008) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2008): Arbeitspapier Tragfähigkeit, Teil B 2.1: Falling Weight Deflectometer (FWD): Gerätebeschreibung, Messdurchführung – Asphaltbauweisen. FGSV Verlag GmbH, Köln, Ausgabe 2008
- FGSV AP Trag B 4 (2012) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2012): Arbeitspapier Tragfähigkeit, Teil B 4: Curviametro, Gerätebeschreibung Messdurchführung. FGSV Verlag GmbH, Köln, Ausgabe 2012
- FGSV AP Trag B 5 (2015) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2015): Arbeitspapier – Tragfähigkeit für Verkehrsflächenbefestigungen, Teil B 5, Schnell fahrendes Messsystem – Traffic Speed Deflectometer (TSD): Gerätebeschreibung, Messdurchführung (AP Trag Teil B 5). FGSV Verlag GmbH, Köln, Ausgabe 2015
- FGSV RDO Asphalt (2009) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2009): Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht, RDO Asphalt 09. FGSV Verlag GmbH, Köln, Ausgabe 2009
- FGSV RPE-Stra (2001) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2001): Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen, RPE-Stra 01. FGSV Verlag GmbH, Köln, Ausgabe 2001
- FGSV RSO Asphalt (2014E) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2014): Entwurf Richtlinien für die Bewertung der strukturellen Substanz des Oberbaus von Verkehrsflächen in Asphaltbauweise, RSO Asphalt
14. FGSV Verlag GmbH, Köln, Entwurf 2014 (unveröffentlicht)
- FGSV RStO (2012) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2012): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, RStO 12. FGSV Verlag GmbH, Köln, Ausgabe 2012
- FGSV TP Asphalt, Teil 24 (2018) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2018): Technische Prüfvorschriften für Asphalt, Teil 24 Spaltzug-Schwellversuch – Beständigkeit gegen Ermüdung, TP Asphalt-StB. FGSV Verlag GmbH, Köln, Ausgabe 2018
- FGSV TP Asphalt, Teil 26 (2018) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2018): Technische Prüfvorschriften für Asphalt, Teil 26 Spaltzug-Schwellversuch – Bestimmung der Steifigkeit, TP Asphalt-StB. FGSV Verlag GmbH, Köln, 2018
- FGSV ZTV Asphalt (07/13) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2013): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt, ZTV Asphalt-StB. FGSV Verlag GmbH, Köln, Ausgabe 2007, Fassung 2013
- FGSV ZTV ZEB (06/18) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2018): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen, ZTV ZEB-StB. FGSV Verlag GmbH, Köln, Ausgabe 2006, korrigierter und geänderter Nachdruck 2018
- HENNIG (2009) Hennig, P. (2009): Untersuchungen zur Ermittlung von Achslastkollektiven für das nachgeordnete Straßennetz, Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Professur für Straßenbau, Dresden 2009 (unveröffentlicht)
- HINSCH et al. (2005) Hinsch K.; Krause, G.; Maerschalk, G. (2005): Katalogisierung von beschreibenden Größen für das Gebrauchsverhalten von Fahrbahnbefestigungen und die Wirkung von Erhaltungsmaßnahmen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 915, herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abt. Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn 2005

- JANSEN (2017) Jansen, D. (2017): Methoden der Substanzbewertung. In: Straße und Autobahn 68 (12), S. 958-967
- KOMMA, GRUND (2019) Komma, C.; Grund, C. (2019): PMS-Anwendung zur Erstellung eines Erhaltungsprogramms für die Landesstraßen in Hessen auf Basis der ZEB 2016. Bericht erstellt im Auftrag von Hessen Mobil Straßen- und Verkehrsmanagement, Wiesbaden 2019 (unveröffentlicht)
- KRAUSE (2000) Krause, G. (2000): Abgrenzung von Mängelklassen zur Kennzeichnung von Schadensursachen mithilfe meßtechnisch erfasster Bestands- und Zustandsmerkmale. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 790, herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abt. Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn 2000
- KRAUSE (2017) Krause, G. (2017): PMS-Anwendung zur Erhaltungsplanung der Bundesfernstraßen in Hamburg mit verbessertem Prognoseinstrumentarium auf der Grundlage aktueller Aufbaudaten. Schlussbericht im Auftrag des Landesbetriebes Straßen, Brücken und Gewässer Hamburg, München 2017 (unveröffentlicht)
- KRAUSE, MAERSCHALK (2010) Krause, G.; Maerschalk, G. (2010): Auswertung von Forschungsarbeiten zur Weiterentwicklung des Pavement Management Systems (PMS). Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1037, herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abt. Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn 2010
- KRAUSE, MAERSCHALK (2014) Krause, G.; Maerschalk, G. (2014): Weiterentwicklung des Substanzwerts Gesamt im PMS. Schlussbericht zum FE 04.228/2009/MRB, erstellt im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), München 2014 (unveröffentlicht)
- LASuV (2017) Landesamt für Straßenbau und Verkehr Sachsen (2017): Manuelle Verkehrszählung 2015 – Ergebnisse aus Staatsstraßen, Stand vom 03.02.2017. Online verfügbar unter https://www.sachsen.de/cps/rde/xbcr/SID-9B57EC1C-4AB5144C/lasuv/SVZ_2015_Staatstrassen_Sachsen.pdf, zuletzt abgerufen am 15.07.2019
- MAERSCHALK (1997) Maerschalk, G. (1997): Erstellung einer ablauffähigen Folge von Algorithmen für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen und der Mittelverwendung im Rahmen eines PMS. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 751, herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Abt. Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg 1997
- MAERSCHALK, KRAUSE (2004) Maerschalk, G.; Krause, G. (2004): Erstanwendung der vorliegenden Algorithmen für die Erhaltungsplanung in ausgewählten Bauämtern. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 878, herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abt. Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn 2004
- MAERSCHALK et al. (2013) Maerschalk, G.; Krause, G.; Socina, M.; Köhler, M.; Stöckner, M. (2013): Daten und Methoden für ein systematisches Erhaltungsmanagement innerörtlicher Straßen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1079, herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abt. Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn 2013
- MAERSCHALK et al. (2016) Maerschalk, G.; Krause, G.; Hinsch, K. (2016): Erhaltungsbedarfsprognose zum BVWP 2016 – 2030 der Bundesfernstraßen, Hintergrundbericht zum FE-Projekt 21.0054/2012, München 2016
- MAERSCHALK, SOCINA (2008) Maerschalk, G.; Socina, M. (2008): Weiterentwicklung der Bewertung des Pavement Management Systems (PMS) um ein Verfahren für die Umsetzung von Qualitätszielen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1001, herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abt. Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn 2008
- OEFNER et al. (2004) Oefner, G.; Krmek, M.; Nußrainer, C. (2004): Kostenermittlung für Erhaltungsmaßnahmen zur Bestimmung der Kosteneingangsgrößen für das PMS (Pavement Management System). Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 896, herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abt. Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn 2004

- OEFFNER et al. (2000) Oefner, G.; Kienlein, E.; Nußrainer, C.; Pindur-Nakamura, A. (2000): Erweitern des streckenbezogenen Substanzwertes im System ZEB um Kriterien wie Belastung, Aufbau, Alter und Tragfähigkeit – Testen und Abstimmen von Bewertungskonzepten. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 783, herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abt. Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn 2000
- OERTELT (2007) Oertelt, S. (2007): Empirische Absicherung der Verhaltensfunktionen für Wirtschaftlichkeitsrechnungen und PMS-Anwendungen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 965, herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abt. Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn 2007
- RÜBENSAM, SCHULZE (1996) Rübensam, J.; Schulze, F.: Entwicklung einer Methodik zur zweckmäßigen Zusammenfassung maßnahmebedürftiger Abschnitte der BAB-Betriebsstrecken auf der Grundlage von Zustands- und Bestandsdaten. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 736, herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Abt. Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg, 1996
- SCHMUCK, HEHENBERGER (1993) Schmuck, A.; Hehenberger, F. (1993): Mängelursachen, Erhaltungsmaßnahmen und Auswirkungen auf das künftige Zustandsniveau – Entwicklung einer Systematik für das Management der Straßenerhaltung. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 652, herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Abt. Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg 1993
- Setra (2000) Réseau technique (2000): Note d'information: IQRN – Image Qualite du Réseau routier National, Setra, Ausgabe Juli 2000
- SKAKUJ, GRUND (2019) Skakuj, M., Grund, C. (2019): PMS I/O Toolbox (Weiterentwicklung von PMS I/O), Grobkonzept. Bericht erstellt im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Bergisch Gladbach 2019 (unveröffentlicht)
- SOCINA, KOMMA (2015). Socina, M.; Komma, C. (2015): Kennzahlen für die gesamtwirtschaftliche Bewertung von Erhaltungsstrategien. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1113, herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn 2015
- STÖCKERT (2018) Stöckert, U. (2018): Vortrag zum aktuellen Stand des PMS anlässlich der Sitzung des FGSV-Arbeitsausschusses 4.1 „Management der Straßenerhaltung“, Hamburg 22. und 23.03.2018 (unveröffentlicht)
- QUINTUS et al. (2009) Quintus, H. L. von; Minchin, Jr. R. E.; Nazarian, S.; Maser, K. R.; Prowell, B. (2009): NCHRP Report 626, NDT Technology for Quality Assurance of HMA Pavement Construction. Transportation Research Board, Washington, D.C. 2009
- WELLNER, DRAGON (2011) Wellner, F.; Dragon, I. (2011): Einfluss der Zusammensetzung von Asphaltgemischen auf ihre primären Gebrauchseigenschaften. Schlussbericht zum AiF-Projekt Nr. 15624 BR/1, Dresden 2011
- WELLNER, ZEIBLER (2013) Wellner, F.; Zeißler, A. (2013): Untersuchungsstrecke zur Dimensionierung von Oberbauvarianten in Asphaltbauweise. Schlussbericht zum FE 89.0256/2011, erstellt im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Dresden 2013
- WENINGER-VYCUDIL et al. (2009) Weninger-Vycudil, A.; Simanek, P.; Rohringer, Th.; Haberl, J. (2009): Handbuch Pavement Management in Österreich 2009. Straßenforschung, Heft 584, herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien 2009
- WENINGER-VYCUDIL et al. (2014) Weninger-Vycudil, A.; Brozek, B.; Litzka, J.; Petschacher, M.; Maerschalk, G. (2014): Erhaltungsziel integraler Substanzwert im Anlagenmanagement der ASFINAG. Schlussbericht zum Projekt Nr. FFG 840488 im Auftrag von ASFINAG und BMVIT, Wien 2014
- ZANDER (2017) Zander, U. (2017): Integration der Substanzbewertung in die Erhaltungsplanung. In: Straße und Autobahn 68 (5), S. 351-356

Bilder

- Bild 1: Übersicht zur Begriffssystematik der Straßenerhaltung (FGSV RPE-Stra 2001)
- Bild 2: Struktur des Erhaltungsmanagements mit einem PMS, überarbeitet nach STÖCKERT (2018)
- Bild 3: Module des rechnergestützten Pavement Management Systems, in Anlehnung an KRAUSE und MAERSCHALK (2010)
- Bild 4: Berechnungsschema Substanzwert (Bestand), überarbeitet nach (KRAUSE 2017)
- Bild 5: Normierungsfunktion für den Substanzwert (Bestand) nach (FGSV AP9/S 2019E)
- Bild 6: Berechnung der Dickenäquivalenzfaktoren für unterschiedliche Materialtypen über 40 Jahre, in Anlehnung an KRAUSE und MAERSCHALK (2014)
- Bild 7: Ablaufschema zur Substanzbewertung von Asphaltbefestigungen (FGSV RSO Asphalt 2014E)
- Bild 8: Methodik zur Ermittlung des Verkehrsbelastungskoeffizienten; eigene Darstellung auf Grundlage von WENINGER-VYCUDIL et al. (2009)
- Bild 9: Struktur des Erhaltungsmanagements mit direkter Einbindung der RSO Asphalt/Variante I, überarbeitet und ergänzt in Anlehnung an STÖCKERT (2018)
- Bild 10: Struktur des Erhaltungsmanagements mit getrennter Datenanalyse/Variante II, überarbeitet und ergänzt in Anlehnung an STÖCKERT (2018)
- Bild 11: Grobstruktur des Datenflusses im PMS
- Bild 12: Zusammenhang zwischen dem RSO-Ergebnis und dem PMS-Setup
- Bild 13: Vorschlag einer Normierungsfunktion für die Restnutzungsdauer als ZW_{RND}
- Bild 14: Hauptkurven Asphaltdeckschichtgemische (blau: Frisch, rot: Bestand, schwarz: Kalibrierasphalt Asphaltdeckschichtgemisch)
- Bild 15: Hauptkurven Asphaltbinderschichtgemische (blau: Frisch, rot: Bestand, schwarz: Kalibrierasphalt Asphaltbinderschichtgemisch)
- Bild 16: Hauptkurven Asphalttragschichtgemische (blau: Frisch, rot: Bestand, schwarz: Kalibrierasphalt Asphalttragschichtgemisch)
- Bild 17: Ermüdungsfunktionen Asphalttragschichtgemische (blau: Frisch, rot: Bestand, schwarz: Kalibrierasphalt Asphalttragschichtgemisch)
- Bild 18: Ausgewählte Hauptkurven Asphaltdeckschichtgemische
- Bild 19: Ausgewählte Hauptkurven Asphaltbinderschichtgemische
- Bild 20: Ausgewählte Hauptkurven Asphalttragschichtgemische
- Bild 21: Ausgewählte Ermüdungsfunktionen Asphalttragschichtgemische
- Bild 22: Temperaturzonenkarte Deutschland (seitens des Auftraggebers zur Verfügung gestellt)
- Bild 23: Häufigkeitsverteilung des Achslastkollektives BAB Fernverkehr, rel. Häufigkeit für 1-t-Achslastklassen (seitens des Auftraggebers zur Verfügung gestellt)
- Bild 24: Häufigkeitsverteilung des Achslastkollektives Mülsen (HENNIG 2009)
- Bild 25: Ausschnitt Bundesfernstraßennetz sowie Markierung des Analysenetzes
- Bild 26: Anzahl der im Analysenetze enthaltenen homogenen Abschnitte, unterteilt nach der Anzahl der gebundenen Schichten nach BRZUSKA (2018)
- Bild 27: Altersverteilung der im Analysenetze enthaltenen Schichten nach BRZUSKA (2018)
- Bild 28: Datenstruktur der Schnittstellendatei zwischen PMS und ADtoPave; grau hinterlegte Spalten sind händisch auszufüllen
- Bild 29: Übersetzung der Schicht-/Materialzuordnung aus der vorhandenen PMS-Struktur in die vorgegebene ADtoPave-Struktur

- Bild 30: Aus Schnittstellendatei gefilterte Eingangsdaten, mit Angabe der innerhalb von ADtoPave automatisiert ermittelten Klimazonen
- Bild 31: Ausgabedatei von ADtoPave
- Bild 32: Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Abschnitts-ID; je Abschnitt für neun Befestigungsvarianten berechnet, die sich in der Wahl des Asphaltmaterials der für den Ermüdungsnachweis maßgebenden Asphalttragschicht unterscheiden; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %
- Bild 33: Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Abschnitts-ID; je Abschnitt für neun Befestigungsvarianten berechnet, die sich in der Wahl des Asphaltmaterials der für den Ermüdungsnachweis maßgebenden Asphalttragschicht unterscheiden; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %
- Bild 34: Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Nutzungsdauer; je Abschnitt für neun Befestigungsvarianten berechnet, die sich in der Wahl des Asphaltmaterials der für den Ermüdungsnachweis maßgebenden Asphalttragschicht unterscheiden; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %
- Bild 35: Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Restnutzungsdauer; je Abschnitt für neun Befestigungsvarianten berechnet, die sich in der Wahl des Asphaltmaterials der für den Ermüdungsnachweis maßgebenden Asphalttragschicht unterscheiden; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %
- Bild 36: Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Restnutzungsdauer; je Abschnitt für neun Befestigungsvarianten berechnet, die sich in der Wahl des Asphaltmaterials der für den Ermüdungsnachweis maßgebenden Asphalttragschicht unterscheiden; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 0 % (links) und um 3 % (rechts)
- Bild 37: Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Restnutzungsdauer; je Abschnitt für 18 Befestigungsvarianten berechnet, die sich in der Wahl des Asphaltmaterials der Binderschichten und der für den Ermüdungsnachweis maßgebenden Asphalttragschicht unterscheiden; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %
- Bild 38: Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Restnutzungsdauer; je Abschnitt für neun Befestigungsvarianten berechnet, die sich in der Wahl des Asphaltdeck- und -binderschichtmaterials unterscheiden; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %
- Bild 39: Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Restnutzungsdauer; je Abschnitt für eine Befestigungsvariante berechnet, Berechnungsvarianten unterscheiden sich in der Wahl der angenommenen Klimazone; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %
- Bild 40: PMS-Prognosefunktionen Zustandsentwicklung als Ergänzung zum AP 9/S
- Bild 41: Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte sortiert nach Abschnitts-ID; je Abschnitt für die beiden Prognosefunktionen aus Bild 40 berechnet; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %
- Bild 42: Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte sortiert nach Abschnitts-ID; je Abschnitt für die beiden Prognosefunktionen aus Bild 40 berechnet; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %
- Bild 43: Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte sortiert nach Nutzungsdauer; je Abschnitt für die beiden Prognosefunktionen aus Bild 40 berechnet; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %

- Bild 44: Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte sortiert nach Nutzungsdauer; je Abschnitt für die beiden Prognosefunktionen aus Bild 40 berechnet; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %
- Bild 45: Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte sortiert nach Nutzungsdauer; je Abschnitt für die beiden Prognosefunktionen aus Bild 40 berechnet; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 0 %
- Bild 46: Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Restnutzungsdauer; Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %; Berechnungsergebnisse basierend auf den RSO Asphalt und dem AP 9/S (vgl. Bild 35 und Bild 44)
- Bild 47: Kumulierte relative Häufigkeit der Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %; Berechnungsergebnisse nach den RSO Asphalt (Variation ATS-Material) und dem AP 9/S (vgl. Bild 35 und Bild 44)
- Bild 48: Kumulierte relative Häufigkeit der Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte; Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 0 %; Berechnungsergebnisse nach den RSO Asphalt (Variation ATS-Material) und dem AP 9/S (vgl. Bild 36 und Bild 45)
- Bild 49: Kumulierte relative Häufigkeit der Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte; Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %; Berechnungsergebnisse nach den RSO Asphalt (Variation ABS- und ATS-Material) und dem AP 9/S (vgl. Bild 37 und Bild 44)
- Bild 50: Kumulierte relative Häufigkeit der Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte; Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %; Berechnungsergebnisse nach den RSO Asphalt (Variation ADS- und ABS-Material) und dem AP 9/S (vgl. Bild 38 und Bild 44)
- Bild 51: Kumulierte relative Häufigkeit der Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte; Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %; Berechnungsergebnisse nach den RSO Asphalt (Variation Temperaturzone) und dem AP 9/S (vgl. Bild 39 und Bild 44)
- Bild 52: Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Restnutzungsdauer; Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %; Annahme verschiedener Materialkombinationen (225 und Kalibrierasphalt) und Befestigungsvarianten (realer Aufbau der Untersuchungsabschnitte, Aufbau gemäß RStO 12, Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1 und RStO 12, Tafel 1, Spalte 1, Zeile 2.1), Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 % (detaillierte Aufschlüsselung der Legende in Tabelle 15)
- Bild 53: Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Restnutzungsdauer; Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %; Annahme verschiedener Materialkombinationen (221, 222, 225 und 228) in Kombination mit zwei Befestigungsvarianten (realer Aufbau der Untersuchungsabschnitte und Aufbau gemäß RStO 12, Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1) (Detaillierte Aufschlüsselung der Legende in Tabelle 15)
- Bild 54: Restnutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Restnutzungsdauer; Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %; Annahme verschiedener Materialkombinationen (221, 222, 225 und 228) in Kombination mit zwei Befestigungsvarianten (Aufbau gemäß RStO 12, Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1 und Aufbau gemäß RStO 12, Tafel 1, Spalte 1, Zeile 2.1) (detaillierte Aufschlüsselung der Legende in Tabelle 15)
- Bild 55: Vergleich der beim Bau geplanten Restnutzungsdauern mit den berechneten Restnutzungsdauern der Abschnitte A0 bis A4 der S 286 bei Mülten in Bezug auf das Jahr 2018
- Bild 56: Verknüpfungsschema ESS zu PMS-Datengruppen (KRAUSE 2017)
- Bild 57: Verteilung der Restnutzungsdauerklassen im Analysenetz in % der Fläche

- Bild 58: Verteilung der Restnutzungsdauern im Analysenetz nach Relevanz im PMS in % der Fläche
- Bild 59: Entwicklung des Zustands und der Restnutzungsdauer bei Standardkonfiguration PMS mit Substanzwert (Bestand) nach dem AP 9/S (Restnutzungsdauer für Kombination 225)
- Bild 60: Entwicklung des Zustandes und der Restnutzungsdauer bei PMS Referenzvariante mit Berücksichtigung der Restnutzungsdauer für Kombination 225
- Bild 61: Entwicklung des Zustandes und der Restnutzungsdauer bei PMS Vergleichsvariante mit Berücksichtigung der Restnutzungsdauern für Kombination 222
- Bild 62: Entwicklung des Zustandes und der Restnutzungsdauer bei PMS Vergleichsvariante mit Berücksichtigung der Restnutzungsdauern für Kombination 228
- Bild 63: Entwicklung des Zustandes und der Restnutzungsdauer bei PMS Vergleichsvariante mit Berücksichtigung der Restnutzungsdauern für Kombination 225 mit Erhöhung der Restnutzungsdauern bei E1
- Bild 64: Verteilung der Maßnahmenkategorien bei Standardkonfiguration PMS mit Substanzwert (Bestand) nach dem AP 9/S
- Bild 65: Verteilung der Maßnahmenkategorien bei PMS Referenzvariante mit Berücksichtigung der Restnutzungsdauern für Kombination 225
- Bild 66: Verteilung der Maßnahmenkategorien bei PMS Vergleichsvariante mit Berücksichtigung der Restnutzungsdauern für Kombination 222
- Bild 67: Verteilung der Maßnahmenkategorien bei PMS Vergleichsvariante mit Berücksichtigung der Restnutzungsdauern für Kombination 228
- Bild 68: Verteilung der Maßnahmenkategorien bei PMS Vergleichsvariante mit Berücksichtigung der Restnutzungsdauern für Kombination 225 mit Erhöhung der Restnutzungsdauern bei E1

Anhang:

- Bild 69: Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Nutzungsdauer; je Abschnitt für neun Befestigungsvarianten berechnet, die sich in der Wahl des Asphaltmaterials der für den Ermüdungsnachweis maßgebenden Asphalttragschicht unterscheiden; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 0 %
- Bild 70: Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Nutzungsdauer; je Abschnitt für neun Befestigungsvarianten berechnet, die sich in der Wahl des Asphaltdeck- und -binderschichtmaterials unterscheiden; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %
- Bild 71: Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Nutzungsdauer; je Abschnitt für eine Befestigungsvariante berechnet, Berechnungsvarianten unterscheiden sich in der Wahl der angenommenen Klimazone; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %
- Bild 72: Nutzungsdauer aller Untersuchungsabschnitte sortiert nach Nutzungsdauer; je Abschnitt für die beiden Prognosefunktionen aus Bild 40 berechnet; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 0 %
- Bild 73: Kumulierte relative Häufigkeit der Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %; Berechnungsergebnisse nach den RSO Asphalt (Variation ATS-Material) und dem AP 9/S
- Bild 74: Kumulierte relative Häufigkeit der Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte; Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 0 %; Berechnungsergebnisse nach den RSO Asphalt (Variation ATS-Material) und dem AP 9/S
- Bild 75: Kumulierte relative Häufigkeit der Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte; Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %; Berechnungsergebnisse

- nach den RSO Asphalt (Variation ADS- und ABS-Material) und dem AP 9/S
- Bild 76: Kumulierte relative Häufigkeit der Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte; Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %; Berechnungsergebnisse nach den RSO Asphalt (Variation Temperaturzone) und dem AP 9/S
- Bild 77: Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Restnutzungsdauer; Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %; Annahme verschiedener Materialkombinationen (225 und Kalibrierasphalt) und Befestigungsvarianten (realer Aufbau der Untersuchungsabschnitte, Aufbau gemäß RStO 12, Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1 und RStO 12, Tafel 1, Spalte 1, Zeile 2.1) (Aufschlüsselung der Legende in Tabelle 15 bzw. Tabelle 27)
- Bild 78: Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Restnutzungsdauer; Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %; Annahme verschiedener Materialkombinationen (221, 222, 225 und 228) in Kombination mit zwei Befestigungsvarianten (realer Aufbau der Untersuchungsabschnitte und Aufbau gemäß RStO 12, Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1) (Aufschlüsselung der Legende in Tabelle 15 bzw. Tabelle 27)
- Bild 79: Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Restnutzungsdauer; Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %; Annahme verschiedener Materialkombinationen (221, 222, 225 und 228) in Kombination mit zwei Befestigungsvarianten (Aufbau gemäß RStO 12, Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1 und Aufbau gemäß RStO 12, Tafel 1, Spalte 1, Zeile 2.1) (Aufschlüsselung der Legende in Tabelle 15 bzw. Tabelle 27)
- Bild 80: Hauptkurven der Asphaltdeck-, -binder- und -tragschichten des Abschnitts A0 der S 286 bei Mülsen
- Bild 81: Hauptkurven der Asphaltdeck-, -binder- und -tragschichten des Abschnitts A1 der S 286 bei Mülsen
- Bild 82: Hauptkurven der Asphaltdeck-, -binder- und -tragschichten des Abschnitts A2 der S 286 bei Mülsen
- Bild 83: Hauptkurven der Asphaltdeck-, -binder- und -tragschichten des Abschnitts A3 der S 286 bei Mülsen
- Bild 84: Hauptkurven der Asphaltdeck-, -binder- und -tragschichten des Abschnitts A4 der S 286 bei Mülsen
- Bild 85: Ermüdungsfunktion der Asphalttragschicht des Abschnitts A0 der S 286 bei Mülsen
- Bild 86: Ermüdungsfunktion der Asphalttragschicht des Abschnitts A1 der S 286 bei Mülsen
- Bild 87: Ermüdungsfunktion der Asphalttragschicht des Abschnitts A2 der S 286 bei Mülsen
- Bild 88: Ermüdungsfunktion der Asphalttragschicht des Abschnitts A3 der S 286 bei Mülsen
- Bild 89: Ermüdungsfunktion der Asphalttragschicht des Abschnitts A4 der S 286 bei Mülsen

Tabellen

- Tab. 1: Bewertungsrelevante Zustandsgrößen (FGSV ZTV ZEB 06/18)
- Tab. 2: Erforderliche Datengruppen für systematische Erhaltungsplanung, in Anlehnung an MAERSCHALK et al. (2013)
- Tab. 3: Äquivalenzfaktoren und Koeffizienten der Abminderungsfunktionen in Abhängigkeit der Schichtart nach (FGSV AP9/S 2019E)
- Tab. 4: Koeffizienten zur Ermittlung der erforderlichen äquivalenten Dicken nach (FGSV AP9/S 2019E)
- Tab. 5: Aufbau BAB A2, NRW, zwischen Netzknoten 4409124A und 4408119A
- Tab. 6: Schichtkoeffizienten zur Berechnung der Tragfähigkeitszahl nach WENINGER-VYCUDIL et al. (2009)
- Tab. 7: Grobvergleich der PMS-Berechnungsvarianten mit + für Vorteile und – für Nachteile
- Tab. 8: Differenzierungskriterien
- Tab. 9: Anzahl einbezogener Materialien
- Tab. 10: Materialparameter der ausgewählten Hauptkurven der Asphaltdeck-, -binder-

- und -tragschichtgemische, ermittelt mit den Funktionsansätzen der FGSV TP Asphalt, Teil 26 (2018)
- Tab. 11: Materialparameter der ausgewählten Ermüdungsfunktionen der Asphalttragschichtgemische, ermittelt mit den Funktionsansätzen der FGSV TP Asphalt, Teil 24 (2018)
- Tab. 12: Anpassungsfaktoren (AF) deterministisches Verfahren, ermittelt für jede Zeile der Tafel 1 (bzw. Tafel 4) der RStO 12 in Abhängigkeit der jeweiligen Belastungsklasse (seitens des Auftraggebers zur Verfügung gestellt)
- Tab. 13: Kodierung der in ADtoPave verwendeten Materialbezeichnungen für Asphaltgemische sowie jeweils hinterlegte tatsächliche Materialeigenschaften, repräsentiert durch die abgeleiteten allgemeingültigen Materialeigenschaften
- Tab. 14: Zusammenfassung aller Berechnungsvarianten
- Tab. 15: Erläuterung der Legendeneinträge für die Bild 52 bis Bild 54 und Bild 77 bis Bild 79 (im Anhang)
- Tab. 16: Dimensionierungsrelevante Eingangsparameter für den beprobten Streckenabschnitt S 286 Mülsen (LASuV 2017; FGSV RStO 2012)
- Tab. 17: Schichtdicken, Nutzungs- und Restnutzungsdauern der Abschnitte A0 bis A4 der S 286 bei Mülsen (eigene Berechnungen; WELLNER, ZEIBLER 2013)
- Tab. 18: Berechnungseingangswerte für das PMS
- Anhang:**
- Tab. 19: Materialparameter der Hauptkurven der Asphaltdeckschichtgemische der Zuordnung frisch gemäß (FGSV TP Asphalt, Teil 24 2018; FGSV TP Asphalt, Teil 26 2018)
- Tab. 20: Materialparameter der Hauptkurven der Asphaltbinderschichtgemische der Zuordnung frisch gemäß (FGSV TP Asphalt, Teil 24 2018; FGSV TP Asphalt, Teil 26 2018)
- Tab. 21: Materialparameter der Hauptkurven der Asphalttragschichtgemische der Zuordnung frisch gemäß (FGSV TP Asphalt, Teil 24 2018; FGSV TP Asphalt, Teil 26 2018)
- Tab. 22: Materialparameter der Hauptkurven der Asphaltdeckschichtgemische der Zuordnung Bestand gemäß (FGSV TP Asphalt, Teil 24 2018; FGSV TP Asphalt, Teil 26 2018)
- Tab. 23: Materialparameter der Hauptkurven der Asphaltbinderschichtgemische der Zuordnung Bestand gemäß (FGSV TP Asphalt, Teil 24 2018; FGSV TP Asphalt, Teil 26 2018)
- Tab. 24: Materialparameter der Hauptkurven der Asphalttragschichtgemische der Zuordnung Bestand gemäß (FGSV TP Asphalt, Teil 24 2018; FGSV TP Asphalt, Teil 26 2018)
- Tab. 25: Materialparameter der Ermüdungsfunktion der Asphalttragschichtgemische der Zuordnung frisch gemäß (FGSV TP Asphalt, Teil 24 2018; FGSV TP Asphalt, Teil 26 2018)
- Tab. 26: Materialparameter der Ermüdungsfunktion der Asphalttragschichtgemische der Zuordnung Bestand gemäß (FGSV TP Asphalt, Teil 24 2018; FGSV TP Asphalt, Teil 26 2018)
- Tab. 27: Erläuterung der Legendeneinträge für die Bild 52 bis Bild 54 und Bild 77 bis Bild 79
- Tab. 28: Materialparameter der ermittelten Hauptkurven der Asphaltdeck-, -binder- und -tragschichtgemische der jeweiligen Abschnitte, ermittelt mit den Funktionsansätzen (FGSV TP Asphalt, Teil 26 2018)
- Tab. 29: Materialparameter der ermittelten Ermüdungsfunktionen der Asphaltdeck-, -binder- und -tragschichtgemische der jeweiligen Abschnitte, ermittelt mit den Funktionsansätzen der (FGSV TP Asphalt, Teil 24 2018)

Anhang

Mat.-Nr.	E_{\min}	E_{\max}	m	b_1	b_0	T_0
1	0	33.534	23.037	-0,66153669	2,16579271	20
2	0	24.904	23.315	-0,64660623	2,18792909	20
3	0	23.504	23.028	-0,62871518	2,29467715	20
4	0	48.864	28.347	-0,46613571	2,21957176	20
5	0	25.632	26.036	-0,56568	1,26943198	20
6	0	23.504	23.941	-0,95728387	2,06573213	20
7	0	24.464	26.086	-0,73667697	1,83832207	20
8	0	23.373	23.737	-0,76680513	1,72566396	20
9	0	25.564	24.531	-0,76790332	1,78833764	20
10	0	23.917	24.084	-0,8008123	1,57290338	20
11	0	26.633	24.832	-0,60696484	1,76420009	20
12	0	24.050	25.217	-0,66033116	2,04922789	20
13	0	23.153	24.070	-0,63726333	1,91422079	20
14	0	26.869	24.770	-0,74764109	1,80670382	20
15	0	26.159	24.753	-0,66077089	1,73360415	20
16	0	25.995	26.208	-0,64375298	1,58465286	20
17	0	26.199	26.853	-0,62358786	1,44093147	20
18	0	21.577	22.959	-0,62004663	1,69054702	20
19	0	19.862	21.941	-0,66568537	1,54945401	20
20	0	33.847	22.293	-0,61308006	1,58842762	20
21	0	26.402	20.520	-0,73521537	1,32142089	20
22	0	32.872	19.977	-0,73003002	1,38641574	20
23	0	29.744	22.405	-0,67579536	1,37970822	20
24	0	24.931	23.053	-0,65880072	1,77620206	20
25	0	28.415	25.419	-0,68098305	1,96830613	20
26	0	27.373	26.359	-0,68570983	2,22797818	20
27	0	25.251	21.558	-0,69851352	1,91822508	20
28	0	22.214	23.854	-0,76925984	1,9362535	20
29	0	32.131	25.913	-0,55882267	2,22198147	20
30	0	23.151	24.673	-0,56335025	1,94201403	20
31	0	23.034	22.244	-0,6477581	1,88286932	20
32	0	27.103	23.035	-0,66817515	1,88565927	20
33	0	32.166	23.461	-0,59004206	2,16268251	20
34	0	20.431	21.625	-0,62828323	1,9441551	20
35	0	22.049	20.183	-0,67270212	1,94912212	20
36	0	28.306	23.529	-0,54470463	1,9488851	20
37	0	24.219	23.106	-0,68011097	1,83145475	20
38	0	25.186	18.248	-0,58956327	1,40212509	20
39	0	20.787	21.070	-0,70229063	1,80147061	20
40	0	25.778	21.025	-0,78305882	1,45441837	20
41	0	25.943	20.302	-0,75128098	1,39704407	20
42	0	28.808	21.973	-0,66131265	1,44944356	20
43	0	24.939	19.671	-0,55077271	1,09178155	20
44	0	23.187	22.763	-0,71967727	2,02443396	20
45	0	22.950	22.437	-0,68300485	1,39902669	20

Tab. 19: Materialparameter der Hauptkurven der Asphaltdeckschichtgemische der Zuordnung frisch gemäß (FGSV TP Asphalt, Teil 24 2018; FGSV TP Asphalt, Teil 26 2018)

Mat.-Nr.	E_{\min}	E_{\max}	m	b_1	b_0	T_0
1	0	42.558	27.082	-0,50393124	1,994864	20
2	0	37.328	25.610	-0,47674536	1,98283808	20
3	0	38.607	24.840	-0,49913388	1,90762834	20
4	0	31.742	22.616	-0,67801232	1,20173922	20
5	0	26.615	22.364	-0,70513986	1,20968808	20
6	0	33.829	25.203	-0,57847309	1,22873949	20
7	0	34.991	24.924	-0,61407542	1,29698078	20
8	0	37.884	25.024	-0,42965353	1,14354069	20
9	0	30.752	25.308	-0,58342986	1,17959482	20
10	0	31.427	24.270	-0,64764439	1,19948275	20
11	0	35.010	26.443	-0,54991503	1,49435007	20
12	0	32.422	25.798	-0,56814638	1,34120543	20
13	0	28.689	25.017	-0,59380215	1,12286214	20
14	0	27.078	22.806	-0,7005012	0,97630421	20
15	0	29.474	24.739	-0,54437342	1,98760222	20
16	0	29.340	17.741	-0,69355905	1,41874706	20
17	0	23.103	19.391	-0,67538046	1,67463437	20
18	0	28.892	19.545	-0,68543101	1,52319192	20
19	0	21.817	17.388	-0,75989244	1,21618157	20
20	0	28.078	20.192	-0,72930036	1,5081398	20
21	0	24.598	19.146	-0,65577241	1,60518636	20
22	0	19.668	17.758	-0,65857652	1,34166334	20
23	0	29.189	24.933	-0,68413117	1,68450943	20
24	0	27.253	22.730	-0,68306549	1,12145691	20

Tab. 20: Materialparameter der Hauptkurven der Asphaltbinderschichtgemische der Zuordnung frisch gemäß (FGSV TP Asphalt, Teil 24 2018; FGSV TP Asphalt, Teil 26 2018)

Mat.-Nr.	E_{\min}	E_{\max}	m	b_1	b_0	T_0
1	0	31.380	23.457	-0,66167395	1,29925492	20
2	0	32.775	23.019	-0,61978868	1,24513879	20
3	0	32.180	23.560	-0,55650996	1,07427108	20
4	0	37.194	28.777	-0,42789517	2,03347404	20
5	0	24.749	24.019	-0,74083736	1,45011356	20
6	0	24.445	24.448	-0,68017243	1,49775267	20
7	0	25.197	22.519	-0,80587691	1,44826006	20
8	0	29.276	21.754	-0,71022764	1,35408046	20
9	0	32.387	22.555	-0,59271161	1,30075919	20
10	0	31.924	19.696	-0,61332638	1,27811022	20
11	0	29.947	21.328	-0,68417741	1,34711125	20
12	0	32.215	21.581	-0,74462497	1,48916469	20
13	0	29.467	22.979	-0,7115944	1,20588972	20
14	0	29.896	22.719	-0,72933247	1,23078456	20
15	0	26.267	22.916	-0,67363677	1,18122173	20
16	0	27.618	22.351	-0,70951047	1,47579028	20
17	0	27.813	22.346	-0,69631122	1,51459275	20
18	0	39.939	21.319	-0,63305347	1,72656037	20
19	0	33.789	22.830	-0,67044679	1,96982128	20
20	0	19.064	21.705	-0,67395523	1,54398283	20
21	0	25.045	21.329	-0,66555581	1,55029	20
22	0	27.478	23.063	-0,62822217	1,55598125	20
23	0	28.784	22.522	-0,67017548	1,77054191	20
24	0	32.317	21.940	-0,72772605	2,00849246	20
25	0	23.930	26.693	-0,60225713	1,53707412	20
26	0	25.244	24.389	-0,68597906	1,53923363	20
27	0	21.768	21.441	-0,78881814	1,59226948	20
28	0	17.253	22.833	-0,66165426	1,22114533	20
29	0	24.280	23.653	-0,65289466	1,24027746	20
30	0	24.211	21.643	-0,74802698	1,44822937	20
31	0	32.405	26.664	-0,59265077	1,88989752	20
32	0	30.128	25.175	-0,38601867	1,41930148	20
33	0	28.874	24.539	-0,50686013	1,21694862	20
34	0	33.170	25.312	-0,48358206	1,39041305	20
35	0	28.949	24.047	-0,73717915	1,73320494	20
36	0	24.851	21.555	-0,61768158	1,5159196	20
37	0	30.341	21.567	-0,6838377	1,55046289	20
38	0	35.984	23.848	-0,61084468	1,73120514	20
39	0	28.279	23.691	-0,85533867	2,04480156	20
40	0	46.811	23.109	-0,57431779	2,27531855	20
41	0	34.161	21.482	-0,6615586	1,96559601	20
42	0	26.961	22.419	-0,71273785	1,89514694	20
43	0	27.719	23.067	-0,69891164	2,15419615	20
44	0	34.498	22.125	-0,72333301	1,39879753	20
45	0	29.371	21.564	-0,71617211	1,45255105	20
46	0	42.490	19.822	-0,53552959	1,27376477	20
47	0	35.381	21.474	-0,49431734	1,59288453	20

48	0	34.914	21.498	-0,5116343	1,20547358	20
49	0	42.012	21.006	-0,53941268	1,48628585	20
50	0	34.178	22.266	-0,58518423	1,50564219	20
51	0	34.063	22.402	-0,70676193	1,46967833	20
52	0	34.152	22.569	-0,68464945	1,38082267	20
53	0	30.570	21.499	-0,67535427	1,20139083	20

Tab. 21: Materialparameter der Hauptkurven der Asphalttragschichtgemische der Zuordnung frisch gemäß (FGSV TP Asphalt, Teil 24 2018; FGSV TP Asphalt, Teil 26 2018)

Mat.-Nr.	E_{\min}	E_{\max}	m	b_1	b_0	T_0
1	0	23.357	26.183	-0,67	1,67	20
2	0	23.470	24.795	-0,67	1,91	20
3	0	25.950	26.332	-0,71	1,94	20
4	0	23.697	24.468	-0,95	2,10	20
5	0	24.369	26.362	-0,85	2,13	20
6	0	24.888	24.102	-0,98	2,16	20
7	0	29.881	23.423	-0,59	1,29	20
8	0	29.512	22.202	-0,60	1,20	20
9	0	28.559	25.982	-0,53	1,22	20
10	0	28.986	22.189	-0,74	1,54	20
11	0	33.712	25.961	-0,61	2,01	20
12	0	17.317	17.168	-0,75	1,98	20
13	0	32.769	24.650	-0,62	2,19	20
14	0	27.137	11.855	-0,67	1,06	20
15	0	27.141	22.626	-0,67	2,03	20
16	0	31.667	19.231	-0,54	0,86	20
17	0	32.386	19.556	-0,52	0,83	20
18	0	30.029	17.767	-0,63	0,87	20
19	0	32.396	21.044	-0,55	1,05	20
20	0	27.269	24.540	-0,68	2,52	20
21	0	28.521	23.308	-0,73	2,14	20
22	0	21.189	23.341	-0,70	1,94	20
23	0	27.919	23.106	-0,78	2,16	20
24	0	33.550	23.224	-0,68	2,62	20
25	0	18.599	22.694	-0,67	1,60	20
26	0	21.192	23.993	-0,65	1,80	20

Tab. 22: Materialparameter der Hauptkurven der Asphaltdeckschichtgemische der Zuordnung Bestand gemäß (FGSV TP Asphalt, Teil 24 2018; FGSV TP Asphalt, Teil 26 2018)

Mat.-Nr.	E_{\min}	E_{\max}	m	b_1	b_0	T_0
1	0	28.536	24.801	-0,72	1,24	20
2	0	28.408	23.528	-0,68	1,15	20
3	0	32.571	25.905	-0,65	1,31	20
4	0	26.922	21.371	-0,65	0,68	20
5	0	28.115	25.094	-0,68	1,09	20
6	0	26.490	19.931	-0,66	0,31	20
7	0	30.868	18.313	-0,76	1,94	20
8	0	28.395	20.091	-0,76	1,38	20
9	0	39.027	22.461	-0,76	2,15	20
10	0	31.626	21.329	-0,83	1,35	20
11	0	40.811	25.616	-0,52	1,59	20
12	0	37.824	24.088	-0,54	1,60	20
13	0	23.227	19.990	-0,71	1,89	20
14	0	34.326	23.916	-0,51	1,55	20
15	0	26.421	15.614	-0,69	1,39	20
16	0	30.289	22.188	-0,57	1,66	20
17	0	30.707	24.570	-0,55	1,14	20
18	0	24.422	24.178	-0,56	1,38	20
19	0	26.342	24.161	-0,58	1,18	20
20	0	30.270	23.179	-0,59	1,19	20
21	0	23.190	22.417	-0,75	1,69	20

Tab. 23: Materialparameter der Hauptkurven der Asphaltbinderschichtgemische der Zuordnung Bestand gemäß (FGSV TP Asphalt, Teil 24 2018; FGSV TP Asphalt, Teil 26 2018)

Mat.-Nr.	E_{\min}	E_{\max}	m	b_1	b_0	T_0
1	0	33.862	23.864	-0,76	1,13	20
2	0	33.450	22.861	-0,81	1,39	20
3	0	22.635	16.672	-0,57	0,36	20
4	0	17.305	11.094	-0,68	0,28	20
5	0	25.796	24.153	-0,71	0,45	20
6	0	30.215	25.576	-0,73	1,32	20
7	0	33.128	30.973	-0,59	2,14	20
8	0	25.877	19.349	-0,52	0,94	20
9	0	23.369	18.408	-0,66	0,97	20
10	0	14.791	14.746	-0,84	1,43	20
11	0	30.046	21.307	-0,66	1,37	20
12	0	27.233	26.755	-0,59	1,66	20
13	0	27.233	20.408	-0,57	1,48	20
14	0	23.816	17.918	-0,72	1,11	20
15	0	25.951	14.464	-0,72	1,01	20
16	0	36.095	23.843	-0,62	1,42	20
17	0	31.148	24.305	-0,62	1,66	20
18	0	32.929	23.279	-0,60	1,81	20
19	0	58.118	24.501	-0,50	2,28	20
20	0	22.247	14.481	-0,93	2,33	20
21	0	29.974	22.523	-0,60	1,77	20
22	0	34.651	22.400	-0,67	1,17	20
23	0	33.483	24.076	-0,55	1,07	20
24	0	36.404	21.172	-0,58	1,58	20
25	0	29.908	22.976	-0,52	0,88	20
26	0	29.649	22.303	-0,67	1,56	20
27	0	27.119	20.809	-0,90	1,47	20
28	0	30.142	21.515	-0,74	1,33	20

Tab. 24: Materialparameter der Hauptkurven der Asphalttragschichtgemische der Zuordnung Bestand gemäß (FGSV TP Asphalt, Teil 24 2018; FGSV TP Asphalt, Teil 26 2018)

Mat.-Nr.	a ₁	a ₂
1	26,5366574	-2,31643128
2	4,53855526	-2,99990292
3	2,73941344	-3,60298975
4	1,15562022	-3,84056372
5	5,62342973	-3,03981038
6	4,28051864	-3,61912399
7	2,89746296	-3,12575804
8	4,56400203	-3,51231818
9	0,54954303	-5,11597111
10	0,87325109	-4,04863735
11	0,43949668	-4,12018082
12	0,20783733	-5,23411754
13	2,80274746	-3,17601079
14	50,9019911	-1,97904486
15	14,8649181	-2,40020573
16	9,57976116	-2,51009722
17	8,30691635	-2,62991346
18	9,05989669	-2,55336935
19	16,1080528	-2,07973282
20	9,61838958	-2,55896687
21	17,7492163	-2,29456561
22	5,28727632	-2,76804485
23	4,16606509	-3,01271579
24	8,08690622	-2,88735101
25	13,5436005	-2,51401005
26	7,5222737	-2,62765044
27	10,4620229	-2,80854295
28	13,1131514	-2,99432895
29	6,69262366	-3,50083434
30	9,16439723	-2,42963423
31	1,26516642	-3,64543106
32	17,1162538	-2,53226346
33	2,14516186	-3,24833808
34	9,44074529	-2,77107484
35	2,63999405	-3,39212804
36	6,51619074	-2,91883871
37	6,45652594	-2,81991839
38	1,00856832	-3,86693142
39	0,68400309	-4,03582947
40	5,6351581	-3,32436744
41	5,24763407	-3,31984104
42	12,3894926	-2,50187991
43	9,23366925	-2,6183543
44	34,2957747	-2,24354538
45	8,58811244	-3,10301027
46	5,28195968	-3,523044
47	5,67942491	-3,66014771

48	6,49415208	-3,62690871
49	2,82030771	-3,07993464
50	6,14608442	-2,96619158

Tab. 25: Materialparameter der Ermüdungsfunktion der Asphalttragschichtgemische der Zuordnung frisch gemäß (FGSV TP Asphalt, Teil 24 2018; FGSV TP Asphalt, Teil 26 2018)

Mat.-Nr.	a ₁	a ₂
1	2,54586659	-3,40450833
2	1,73040275	-3,35117273
3	2,82892132	-3,69649778
4	1,04881285	-3,9086008
5	2,89966855	-3,54528573
6	1,38215851	-3,68594866
7	7,37672151	-2,6559189
8	1,21968652	-3,87948139
9	0,46071887	-4,31451562
10	0,64571717	-4,31755226
11	10,3949463	-2,76469327
12	1,78324779	-3,87838487
13	3,59508705	-3,22615924
14	2,69015931	-3,59365164
15	4,92836355	-3,21161007
16	2,34676686	-3,76935233
17	7,7597479	-2,71633882
18	12,889653	-2,54776262
19	5,063643	-2,94357096
20	26,5366574	-2,31643128
21	2,86861266	-2,88895022
22	0,74815172	-4,0899026
23	2,2362867	-3,3909874
24	2,89894621	-3,06393225
25	1,93693323	-3,30135697
26	0,93300365	-3,85116775
27	4,55654028	-3,67106564

Tab. 26: Materialparameter der Ermüdungsfunktion der Asphalttragschichtgemische der Zuordnung Bestand gemäß (FGSV TP Asphalt, Teil 24 2018; FGSV TP Asphalt, Teil 26 2018)

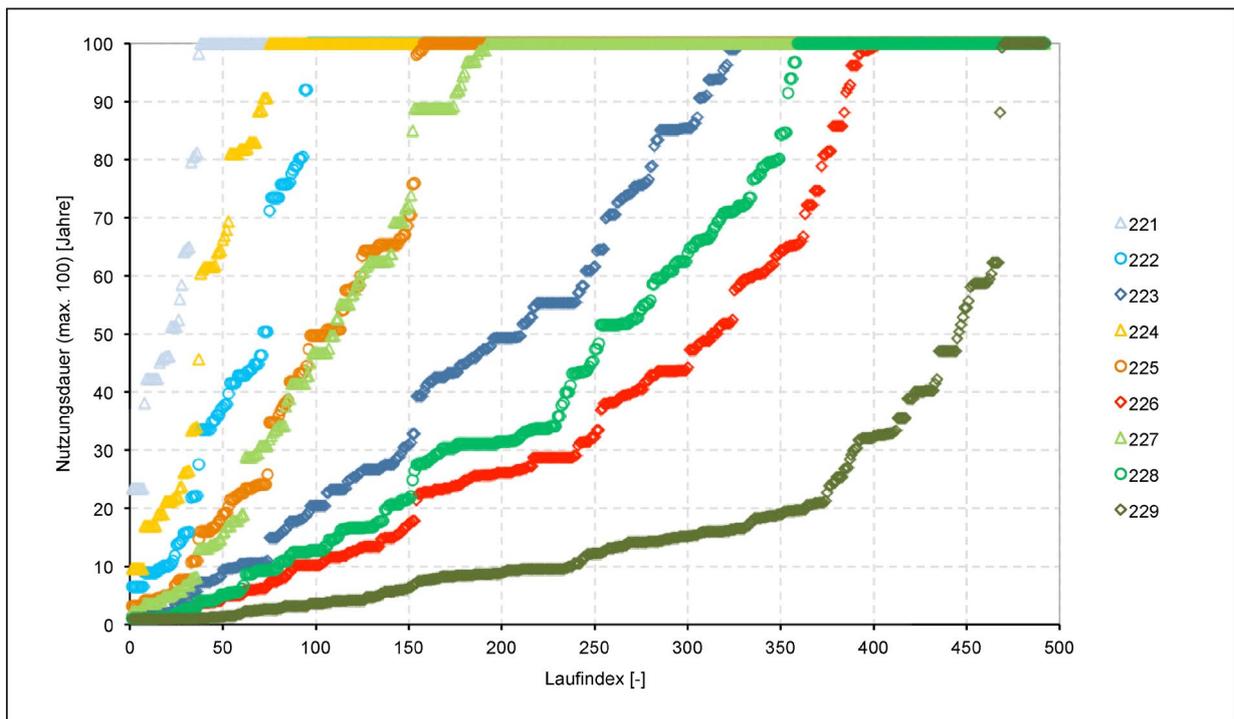


Bild 69: Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Nutzungsdauer; je Abschnitt für neun Befestigungsvarianten berechnet, die sich in der Wahl des Asphaltmaterials der für den Ermüdungsnachweis maßgebenden Asphalttragschicht unterscheiden; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 0 %

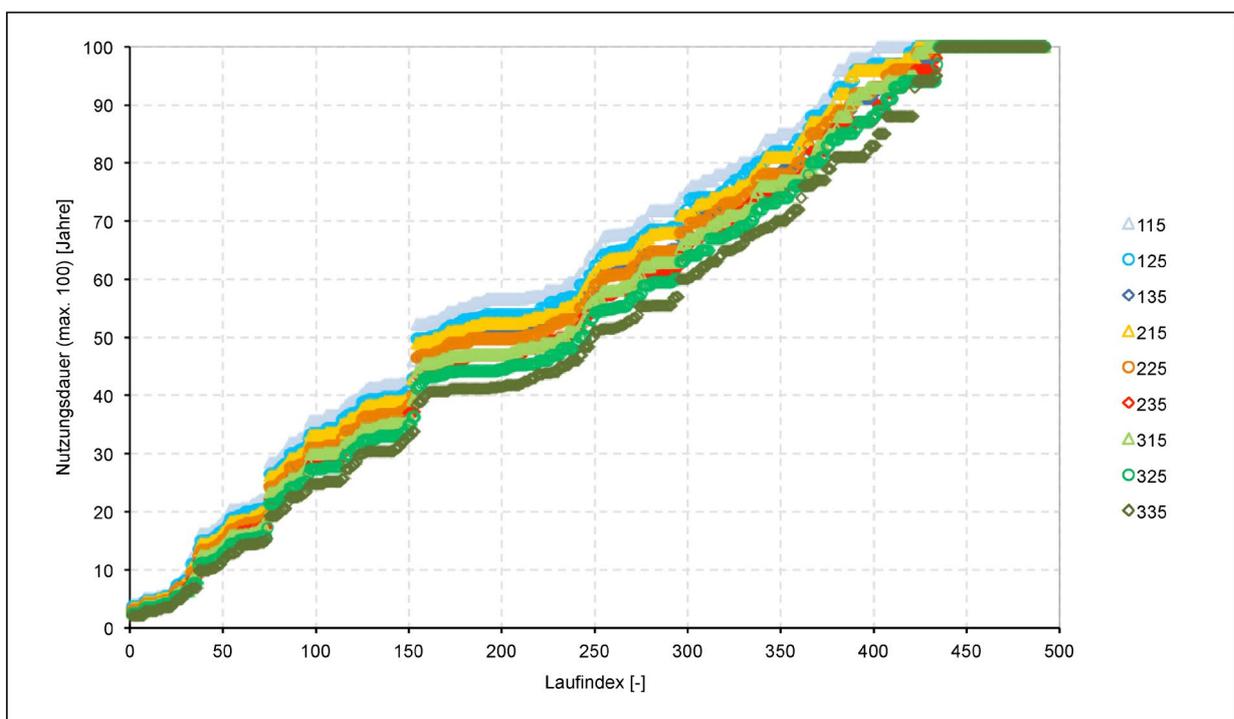


Bild 70: Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Nutzungsdauer; je Abschnitt für neun Befestigungsvarianten berechnet, die sich in der Wahl des Asphaltdeck- und -binderschichtmaterials unterscheiden; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %

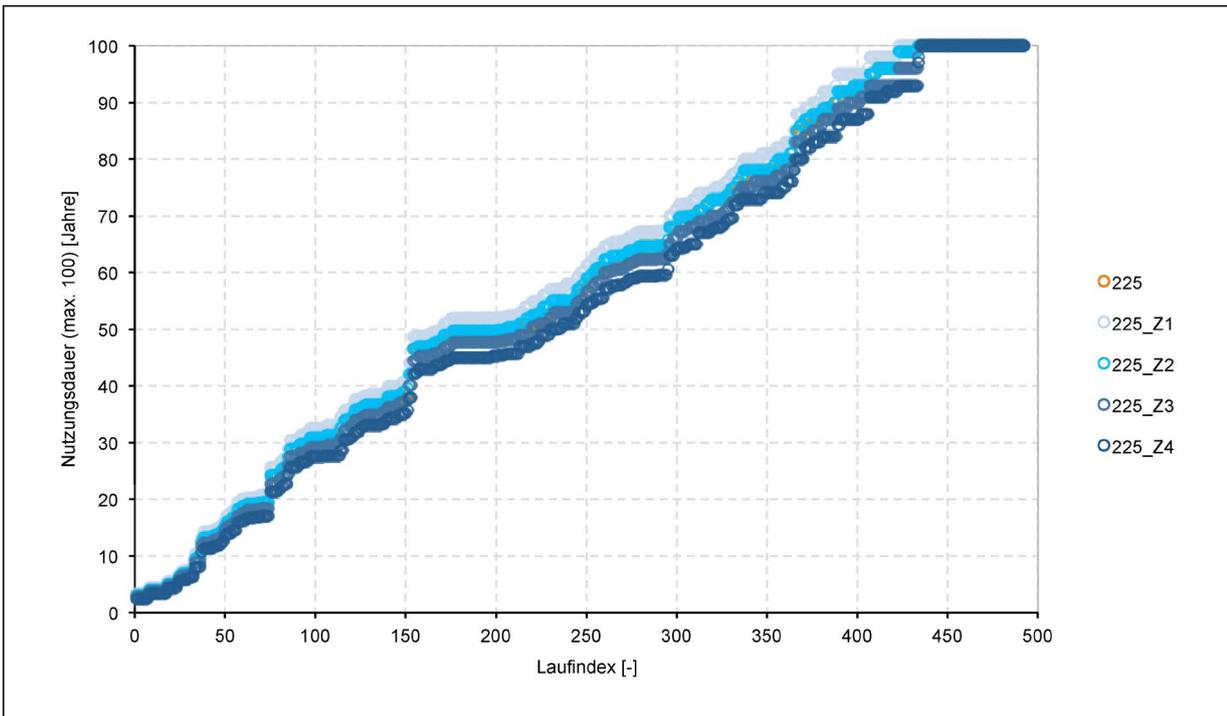


Bild 71: Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Nutzungsdauer; je Abschnitt für eine Befestigungsvariante berechnet, Berechnungsvarianten unterscheiden sich in der Wahl der angenommenen Klimazone; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %

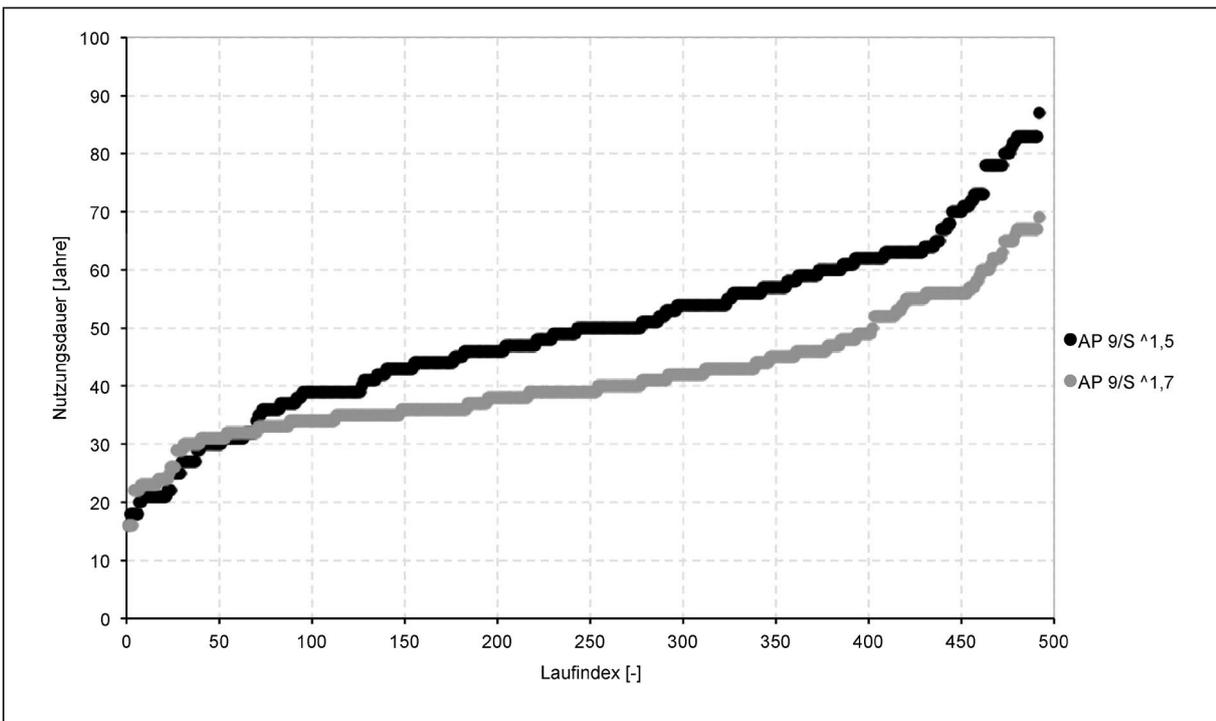


Bild 72: Nutzungsdauer aller Untersuchungsabschnitte sortiert nach Nutzungsdauer; je Abschnitt für die beiden Prognosefunktionen aus Bild 40 berechnet; Berücksichtigung der Zunahme des Schwerververkehrsanteils um 0 %

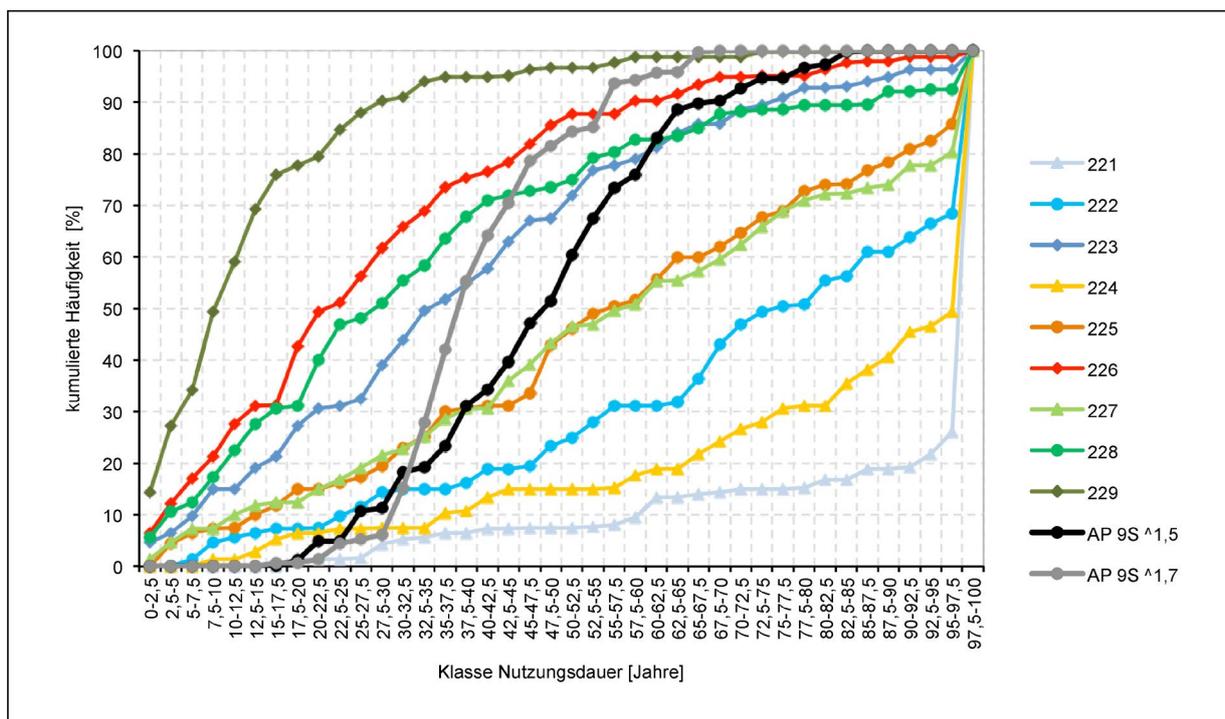


Bild 73: Kumulierte relative Häufigkeit der Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %; Berechnungsergebnisse nach den RSO Asphalt (Variation ATS-Material) und dem AP 9/S

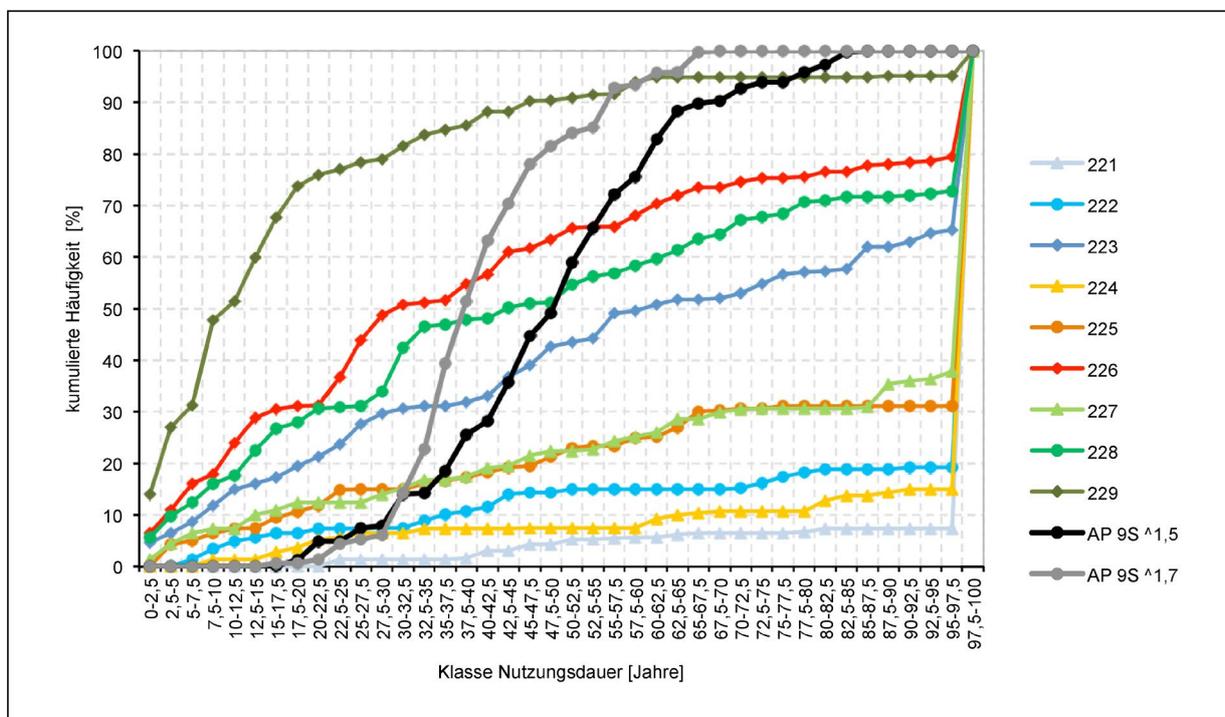


Bild 74: Kumulierte relative Häufigkeit der Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte; Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 0 %; Berechnungsergebnisse nach den RSO Asphalt (Variation ATS-Material) und dem AP 9/S

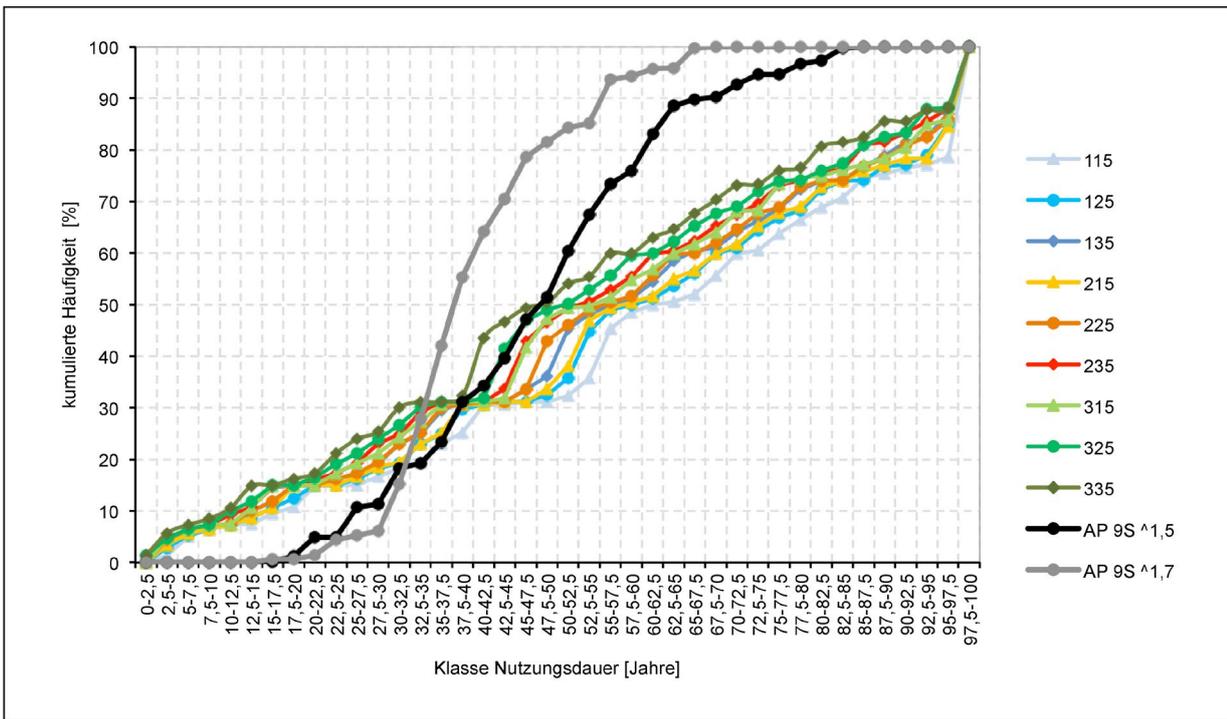


Bild 75: Kumulierte relative Häufigkeit der Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte; Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %; Berechnungsergebnisse nach den RSO Asphalt (Variation ADS- und ABS-Material) und dem AP 9/S

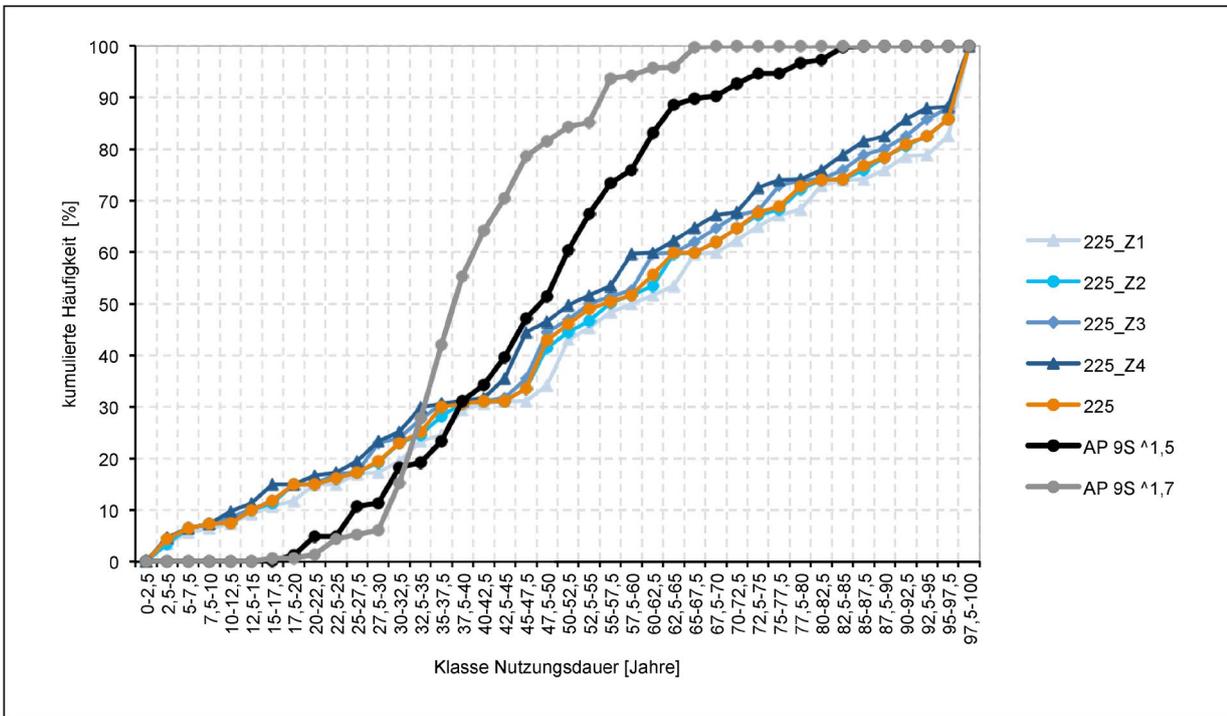


Bild 76: Kumulierte relative Häufigkeit der Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte; Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %; Berechnungsergebnisse nach den RSO Asphalt (Variation Temperaturzone) und dem AP 9/S

Bezeichnung des Szenarios	Zusammensetzung und Erklärung des Szenarios	
M_Kali-A_real	M_Kali	Kalibrierasphalt in allen Schichten
	A_real	realer Aufbau der Untersuchungsabschnitte
M_Kali-A_Z1	M_Kali	Kalibrierasphalt in allen Schichten
	A_Z1	Aufbau gemäß RStO 12 Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1 für alle Untersuchungsabschnitte
M_Kali-A_Z1_Z2.1	M_Kali	Kalibrierasphalt in allen Schichten
	A_Z1_Z2.1	Aufbau gemäß RStO 12 Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1 für alle Untersuchungsabschnitte, die im realen Aufbau keine HGT enthalten und Tafel 1, Spalte 1, Zeile 2.1 für alle Untersuchungsabschnitte, die im realen Aufbau eine HGT enthalten
M_228-A_real	M_228	Materialkombination 228 mit mittlerer Steifigkeit in der Asphaltdeck- und -binderschicht sowie mit niedriger Steifigkeit und mittlerer Ermüdung in der Asphalttragschicht
	A_real	realer Aufbau der Untersuchungsabschnitte
M_228-A_Z1	M_228	Materialkombination 228 mit mittlerer Steifigkeit in der Asphaltdeck- und -binderschicht sowie mit niedriger Steifigkeit und mittlerer Ermüdung in der Asphalttragschicht
	A_Z1	Aufbau gemäß RStO 12 Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1 für alle Untersuchungsabschnitte
M_228-A_Z1_Z2.1	M_228	Materialkombination 228 mit mittlerer Steifigkeit in der Asphaltdeck- und -binderschicht sowie mit niedriger Steifigkeit und mittlerer Ermüdung in der Asphalttragschicht
	A_Z1_Z2.1	Aufbau gemäß RStO 12 Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1 für alle Untersuchungsabschnitte, die im realen Aufbau keine HGT enthalten und Tafel 1, Spalte 1, Zeile 2.1 für alle Untersuchungsabschnitte, die im realen Aufbau eine HGT enthalten
M_225-A_real	M_225	Materialkombination 225 mit mittleren Materialeigenschaften (Steifigkeit und Ermüdung) in allen Schichten
	A_real	realer Aufbau der Untersuchungsabschnitte
M_225-A_Z1	M_225	Materialkombination 225 mit mittleren Materialeigenschaften (Steifigkeit und Ermüdung) in allen Schichten
	A_Z1	Aufbau gemäß RStO 12 Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1 für alle Untersuchungsabschnitte
M_225-A_Z1_Z2.1	M_225	Materialkombination 225 mit mittleren Materialeigenschaften (Steifigkeit und Ermüdung) in allen Schichten
	A_Z1_Z2.1	Aufbau gemäß RStO 12 Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1 für alle Untersuchungsabschnitte, die im realen Aufbau keine HGT enthalten und Tafel 1, Spalte 1, Zeile 2.1 für alle Untersuchungsabschnitte, die im realen Aufbau eine HGT enthalten
M_222-A_real	M_222	Materialkombination 222 mit mittlerer Steifigkeit in der Asphaltdeck- und -binderschicht sowie mit hoher Steifigkeit und mittlerer Ermüdung in der Asphalttragschicht
	A_real	realer Aufbau der Untersuchungsabschnitte
M_222-A_Z1	M_222	Materialkombination 222 mit mittlerer Steifigkeit in der Asphaltdeck- und -binderschicht sowie mit hoher Steifigkeit und mittlerer Ermüdung in der Asphalttragschicht
	A_Z1	Aufbau gemäß RStO 12 Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1 für alle Untersuchungsabschnitte
M_222-A_Z1_Z2.1	M_222	Materialkombination 222 mit mittlerer Steifigkeit in der Asphaltdeck- und -binderschicht sowie mit hoher Steifigkeit und mittlerer Ermüdung in der Asphalttragschicht
	A_Z1_Z2.1	Aufbau gemäß RStO 12 Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1 für alle Untersuchungsabschnitte, die im realen Aufbau keine HGT enthalten und Tafel 1, Spalte 1, Zeile 2.1 für alle Untersuchungsabschnitte, die im realen Aufbau eine HGT enthalten
M_221-A_real	M_221	Materialkombination 221 mit mittlerer Steifigkeit in der Asphaltdeck- und -binderschicht sowie mit hoher Steifigkeit und hoher Ermüdung in der Asphalttragschicht

	A_real	realer Aufbau der Untersuchungsabschnitte
M_221-A_Z1	M_221	Materialkombination 221 mit mittlerer Steifigkeit in der Asphaltdeck- und -binderschicht sowie mit hoher Steifigkeit und hoher Ermüdung in der Asphalttragschicht
	A_Z1	Aufbau gemäß RStO 12 Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1 für alle Untersuchungsabschnitte
M_221-A_Z1_Z2.1	M_221	Materialkombination 221 mit mittlerer Steifigkeit in der Asphaltdeck- und -binderschicht sowie mit hoher Steifigkeit und hoher Ermüdung in der Asphalttragschicht
	A_Z1_Z2.1	Aufbau gemäß RStO 12 Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1 für alle Untersuchungsabschnitte, die im realen Aufbau keine HGT enthalten und Tafel 1, Spalte 1, Zeile 2.1 für alle Untersuchungsabschnitte, die im realen Aufbau eine HGT enthalten

Tab. 27: Erläuterung der Legendeneinträge für die Bild 52 bis Bild 54 und Bild 77 bis Bild 79

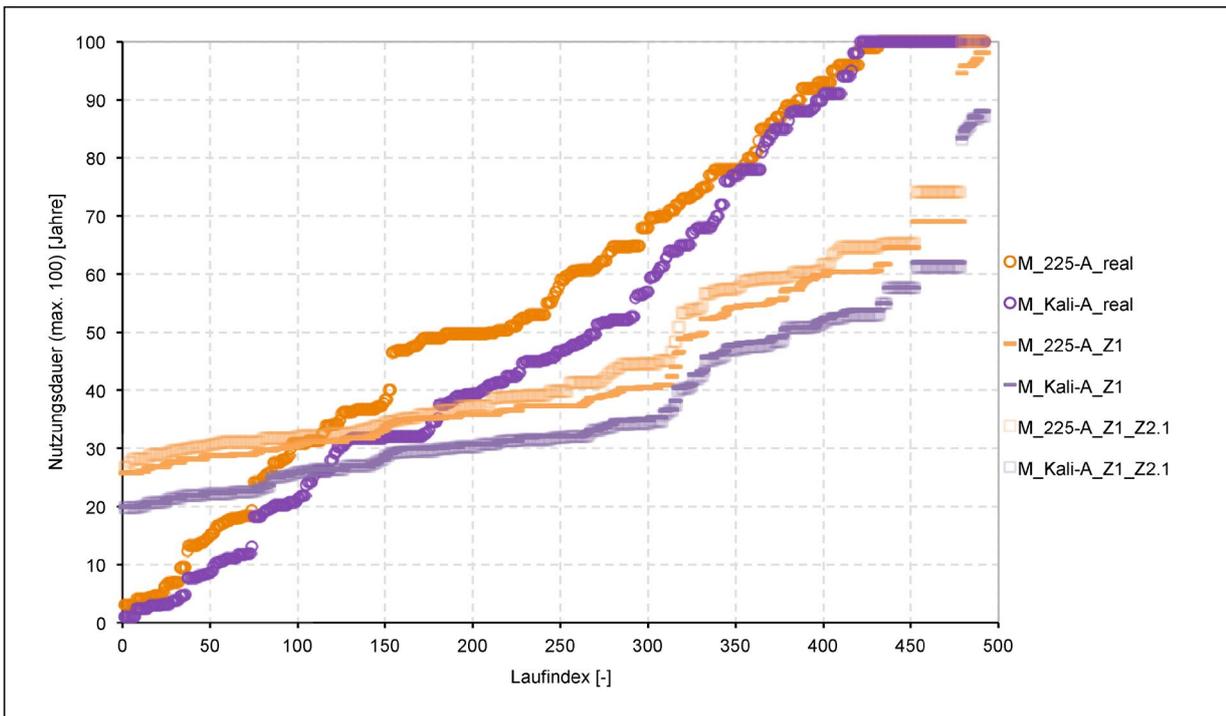


Bild 77: Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Restnutzungsdauer; Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %; Annahme verschiedener Materialkombinationen (225 und Kalibrierasphalt) und Befestigungsvarianten (realer Aufbau der Untersuchungsabschnitte, Aufbau gemäß RStO 12, Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1 und RStO 12, Tafel 1, Spalte 1, Zeile 2.1) (Aufschlüsselung der Legende in Tab. 15 bzw. Tab. 27)

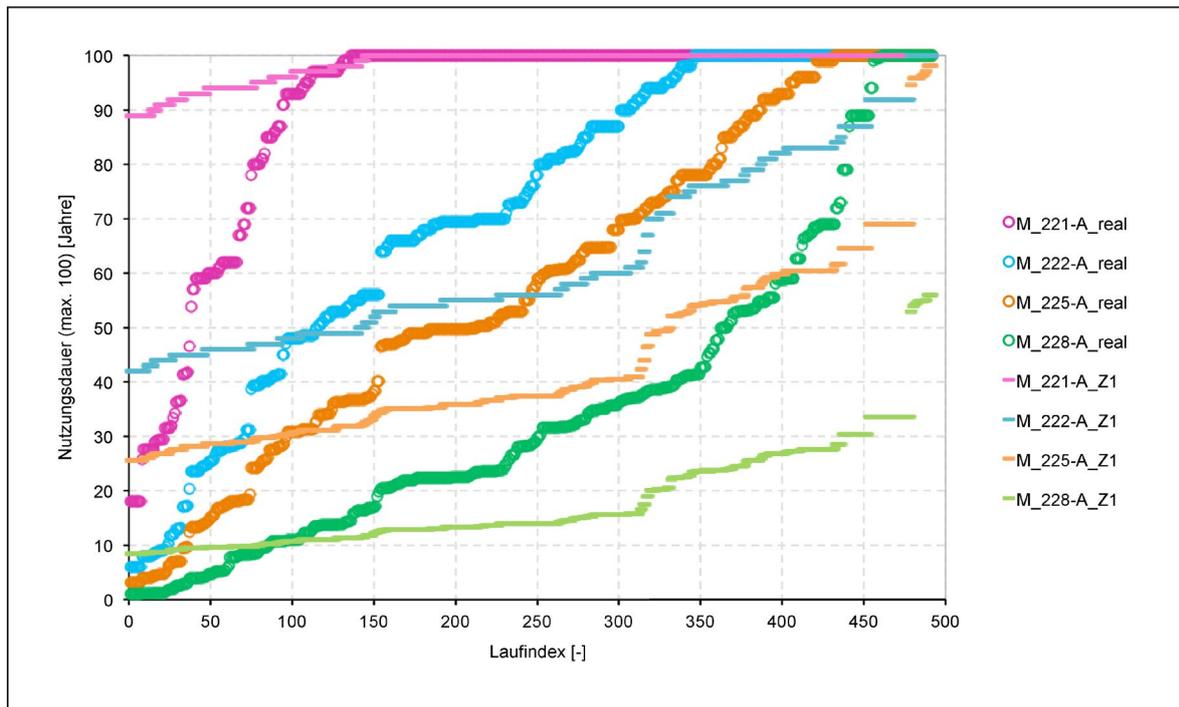


Bild 78: Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Restnutzungsdauer; Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %; Annahme verschiedener Materialkombinationen (221, 222, 225 und 228) in Kombination mit zwei Befestigungsvarianten (realer Aufbau der Untersuchungsabschnitte und Aufbau gemäß RStO 12, Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1) (Aufschlüsselung der Legende in Tab. 15 bzw. Tab. 27)

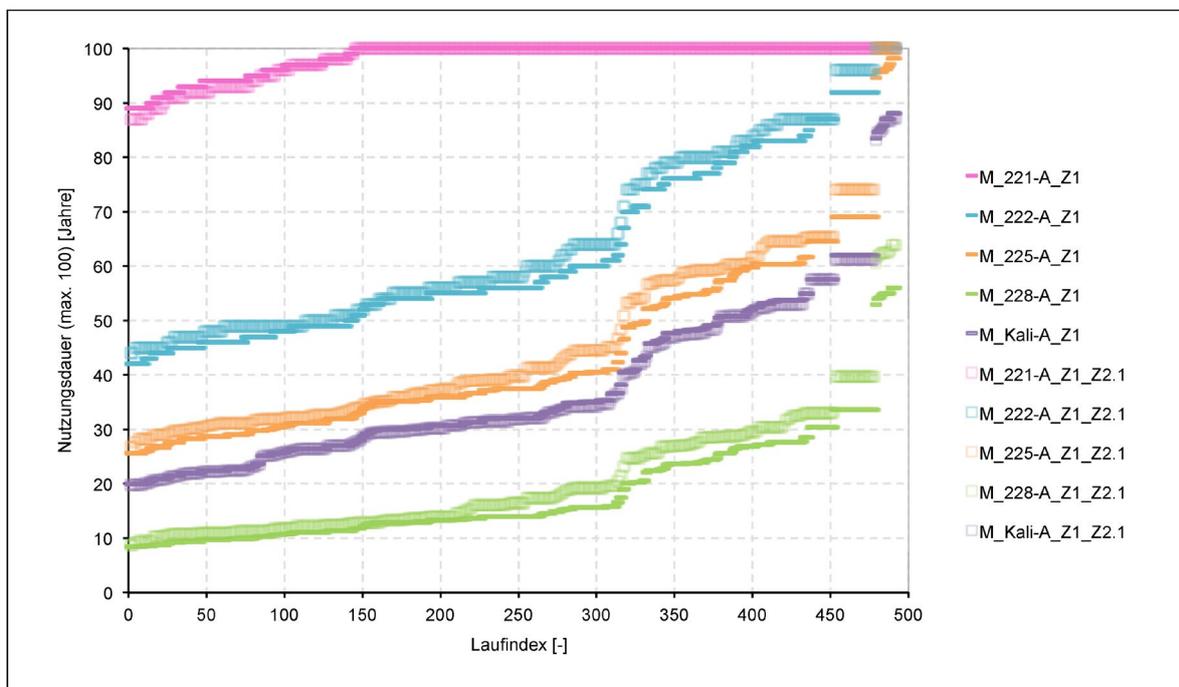


Bild 79: Nutzungsdauern aller Untersuchungsabschnitte, sortiert nach Restnutzungsdauer; Zunahme des Schwerverkehrsanteils um 3 %; Annahme verschiedener Materialkombinationen (221, 222, 225 und 228) in Kombination mit zwei Befestigungsvarianten (Aufbau gemäß RStO 12, Tafel 1, Spalte 1, Zeile 1 und Aufbau gemäß RStO 12, Tafel 1, Spalte 1, Zeile 2.1) (Aufschlüsselung der Legende in Tab. 15 bzw. Tab. 27)

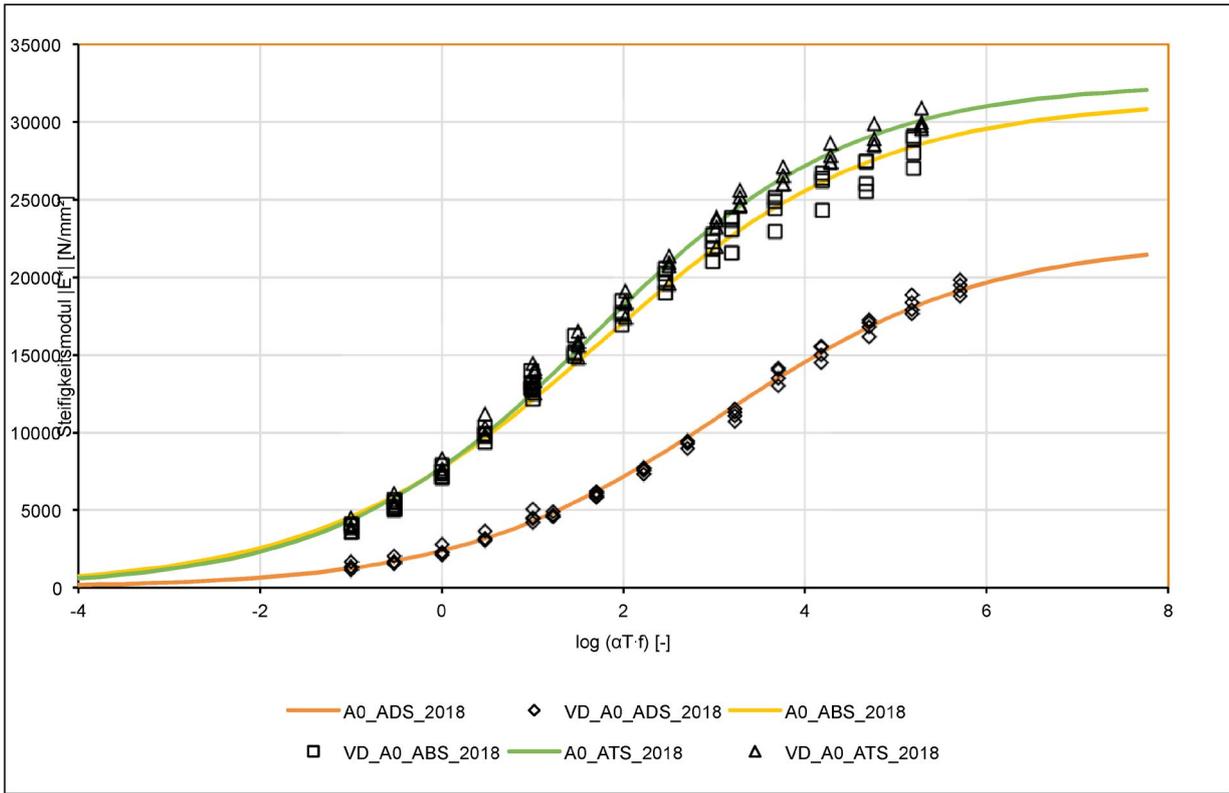


Bild 80: Hauptkurven der Asphaltdeck-, -binder- und -tragschichten des Abschnitts A0 der S 286 bei Mülisen

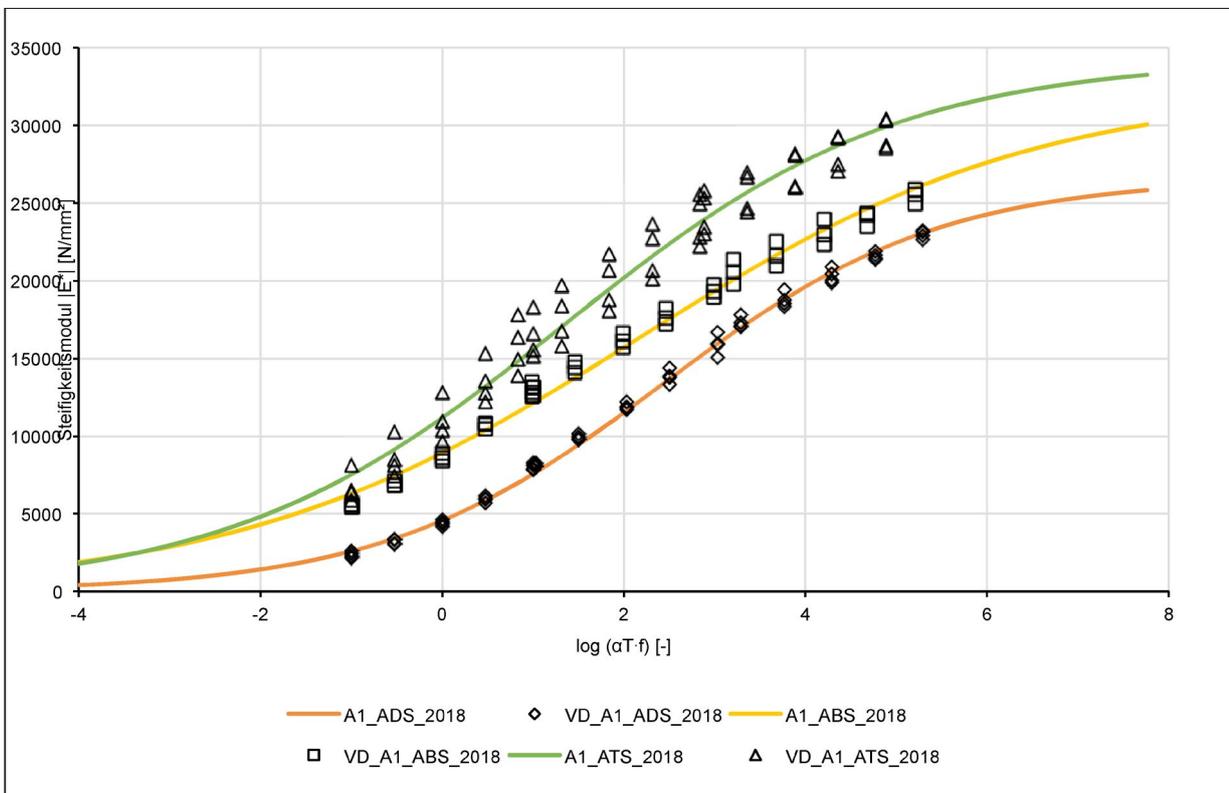


Bild 81: Hauptkurven der Asphaltdeck-, -binder- und -tragschichten des Abschnitts A1 der S 286 bei Mülisen

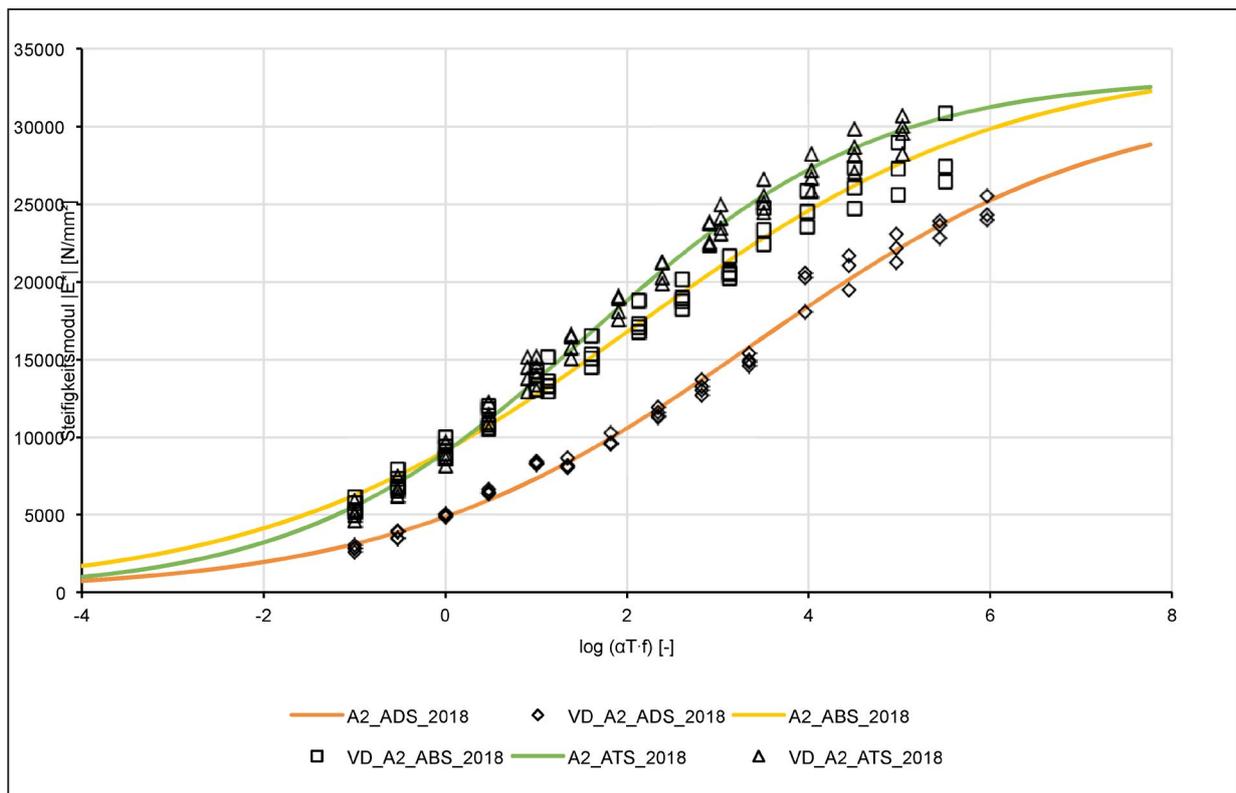


Bild 82: Hauptkurven der Asphaltdeck-, -binder- und -tragschichten des Abschnitts A2 der S 286 bei Mülisen

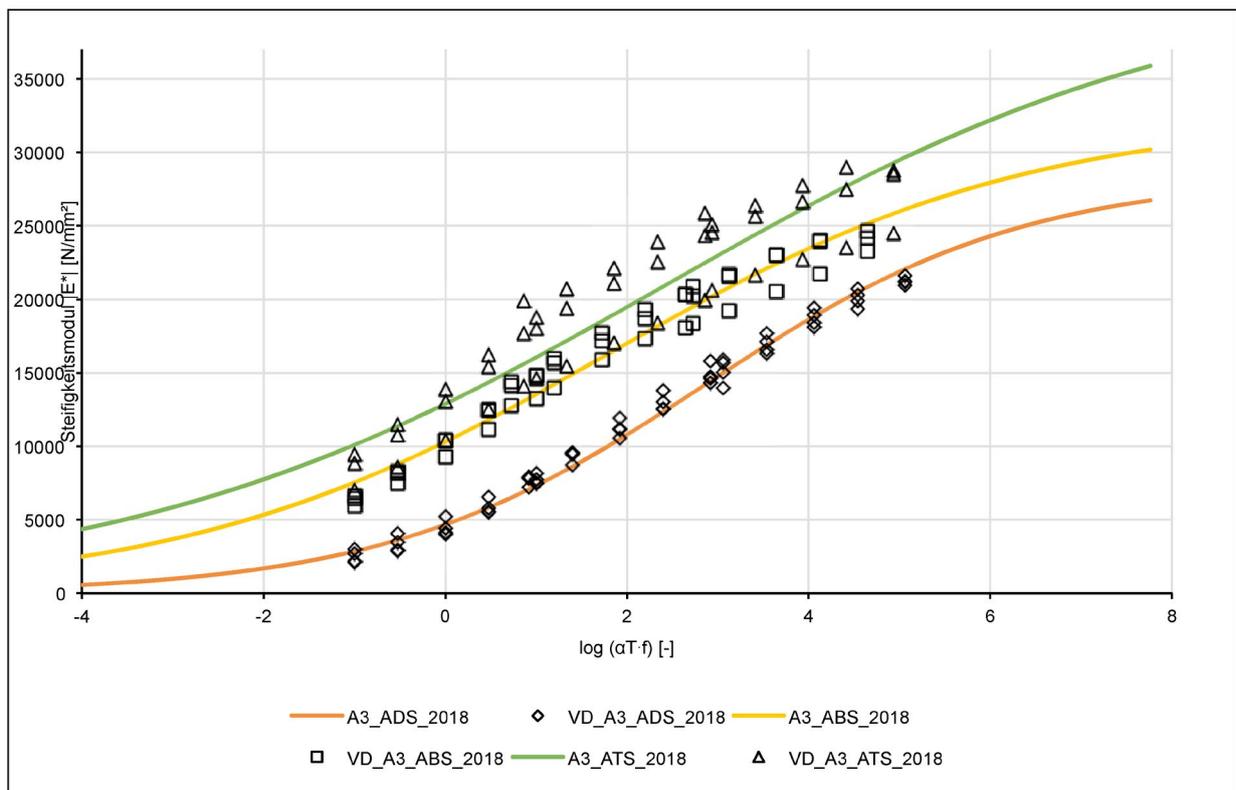


Bild 83: Hauptkurven der Asphaltdeck-, -binder- und -tragschichten des Abschnitts A3 der S 286 bei Mülisen

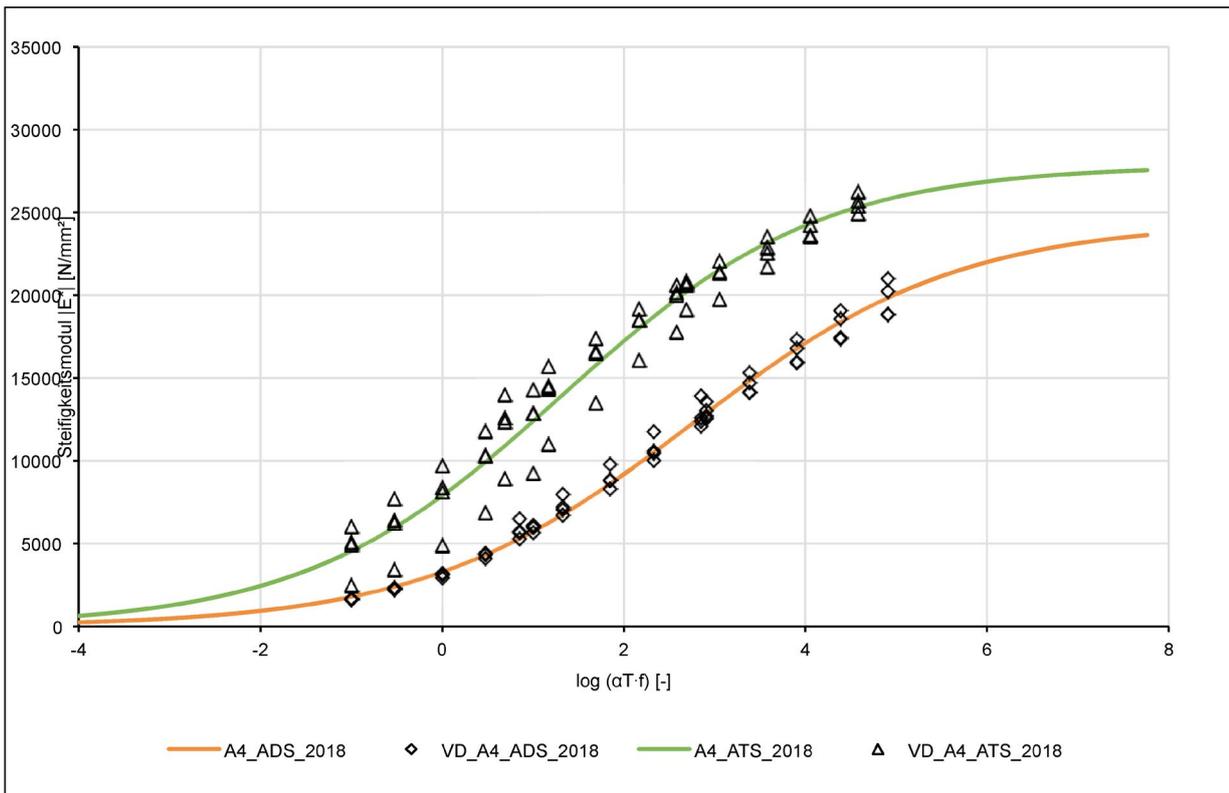


Bild 84: Hauptkurven der Asphaltdeck-, -binder- und -tragschichten des Abschnitts A4 der S 286 bei Mülsen

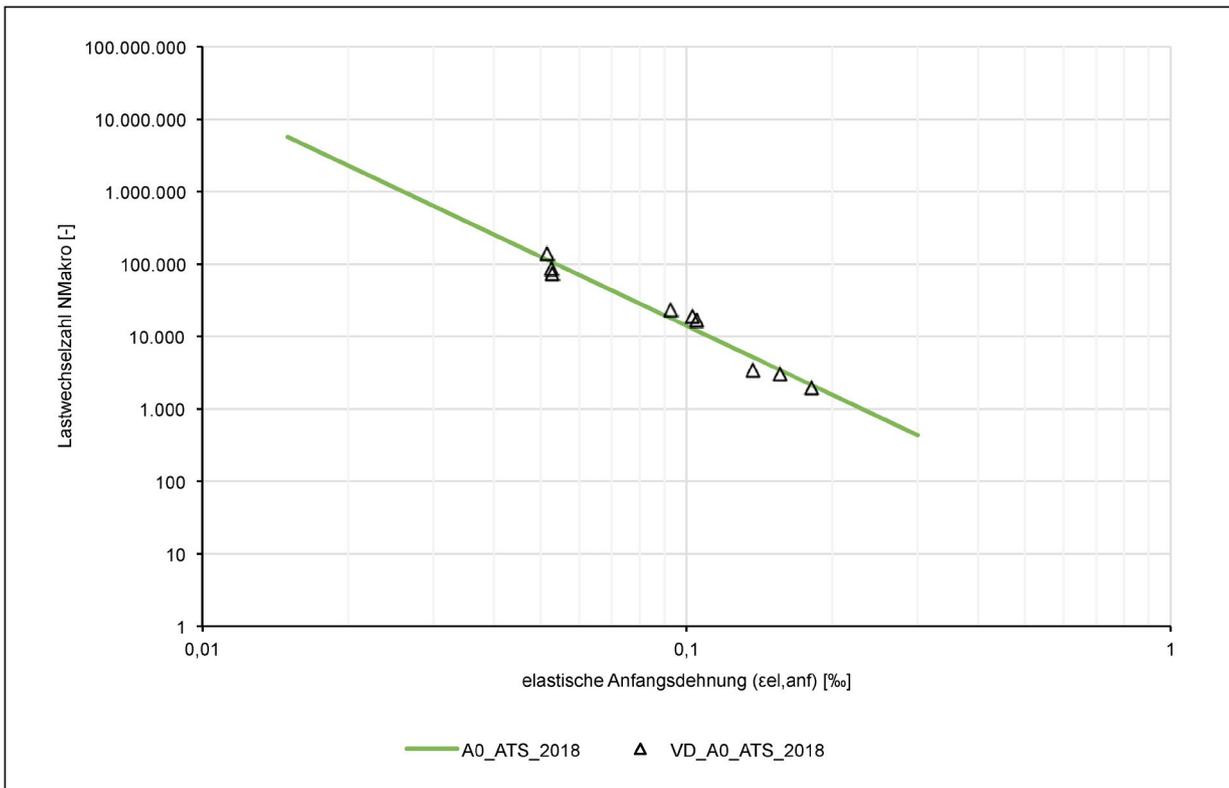


Bild 85: Ermüdungsfunktion der Asphalttragschicht des Abschnitts A0 der S 286 bei Mülsen

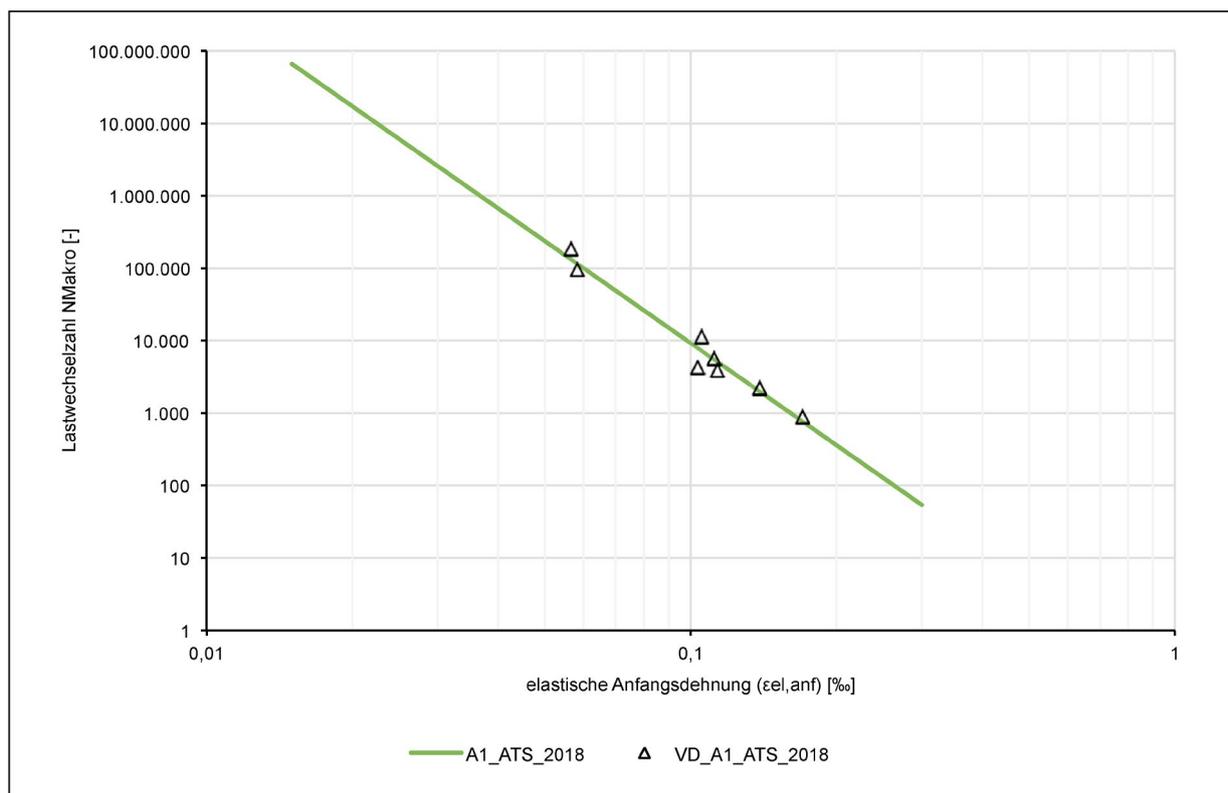


Bild 86: Ermüdungsfunktion der Asphalttragschicht des Abschnitts A1 der S 286 bei Mülten

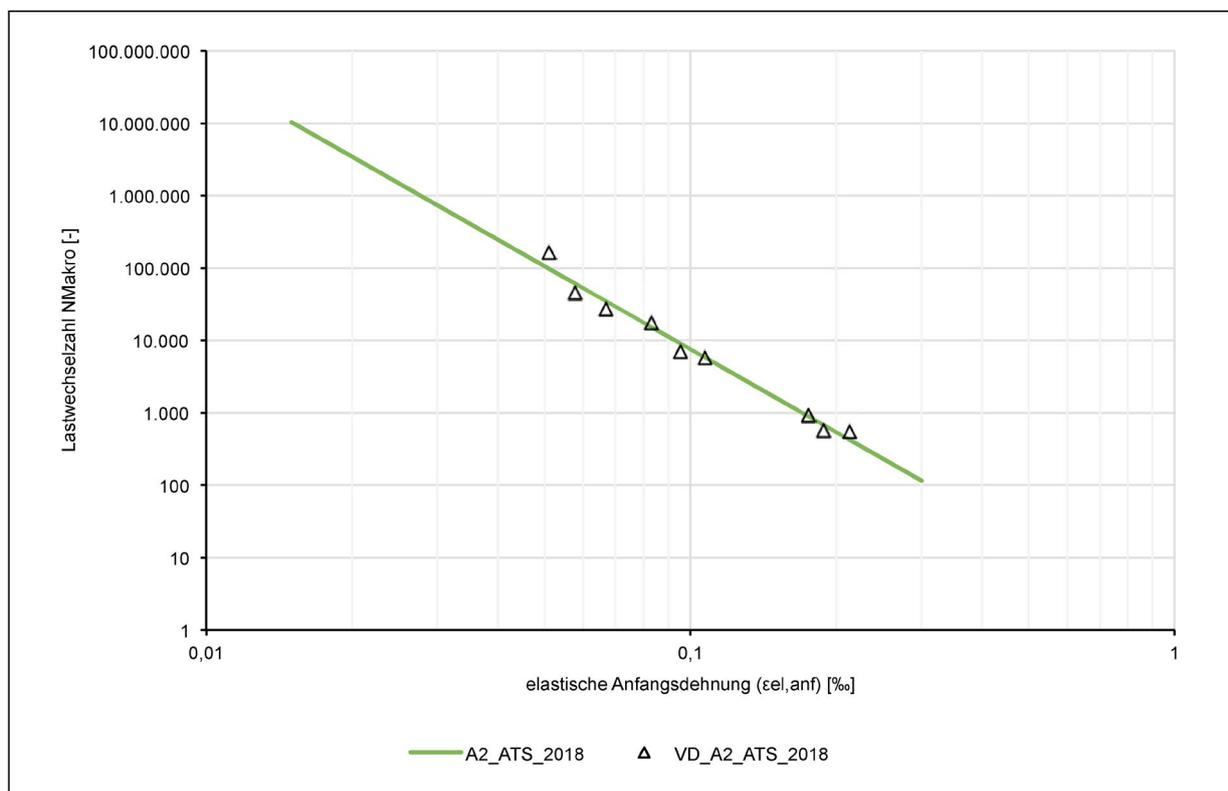


Bild 87: Ermüdungsfunktion der Asphalttragschicht des Abschnitts A2 der S 286 bei Mülten

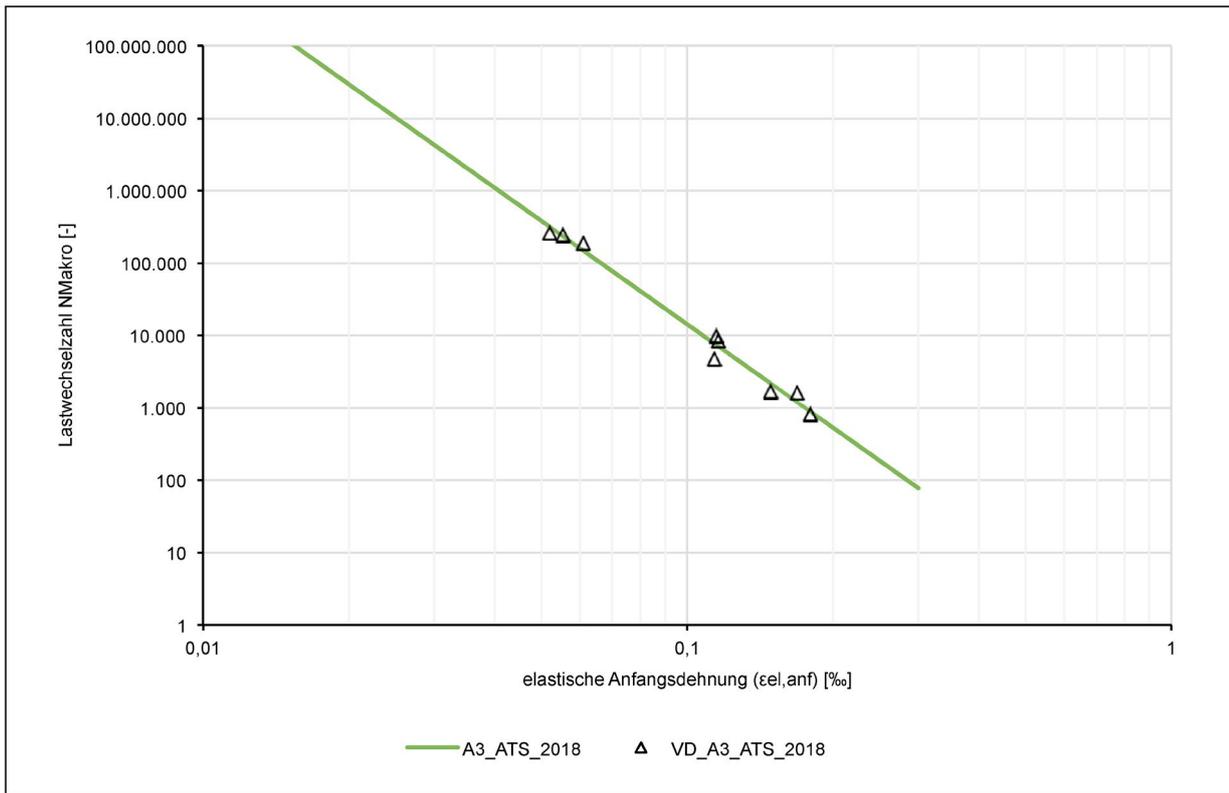


Bild 88: Ermüdungsfunktion der Asphalttragschicht des Abschnitts A3 der S 286 bei Mülten

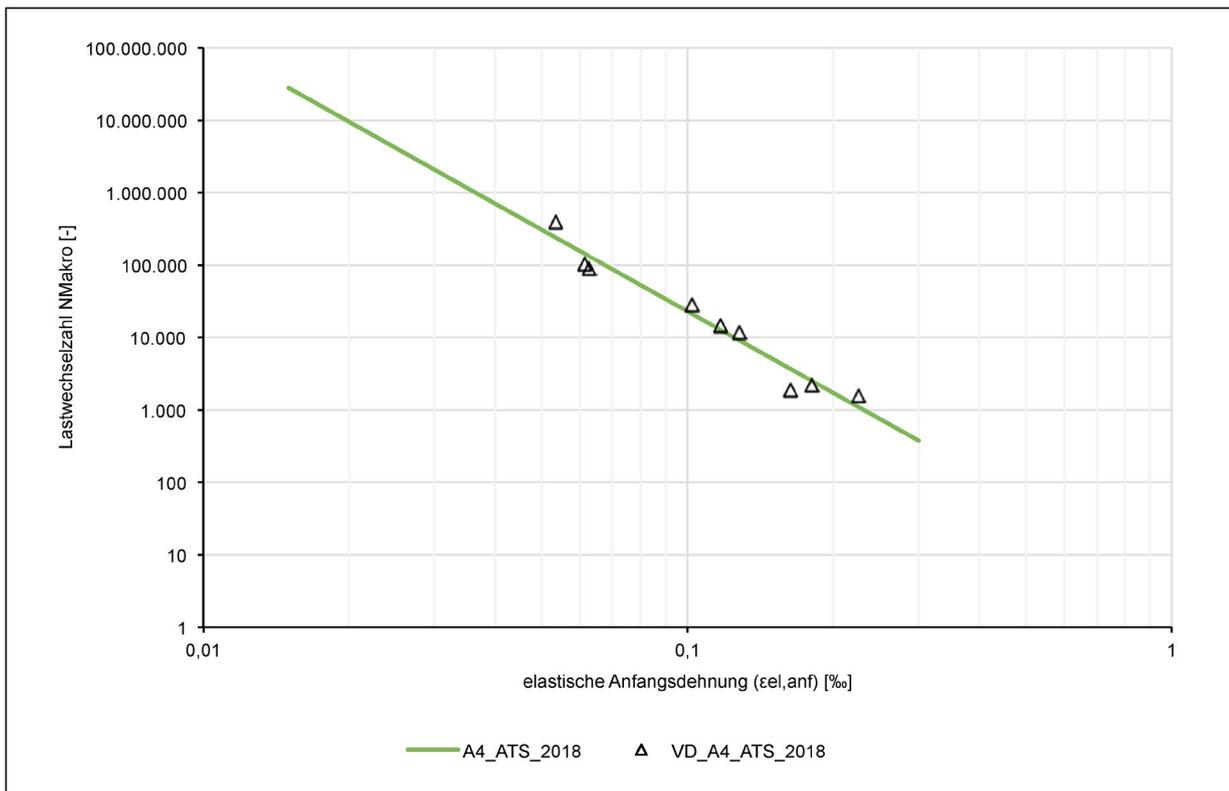


Bild 89: Ermüdungsfunktion der Asphalttragschicht des Abschnitts A4 der S 286 bei Mülten

Material	E_{\min}	E_{\max}	m	b_1	b_0	T_0
A0 ADS	0	22279	27843	-0,68971904	2,12565257	20
A0 ABS	0	31402	24827	-0,65040671	1,12164561	20
A0 ATS	0	32499	25359	-0,69968928	1,16305689	20
A1 ADS	0	26621	25396	-0,65196828	1,57725284	20
A1 ABS	0	32395	24881	-0,45388781	0,96907747	20
A1 ATS	0	34275	22988	-0,54321834	0,72683597	20
A2 ADS	0	32000	29375	-0,50631372	1,71942812	20
A2 ABS	0	34321	26659	-0,48602213	1,01781553	20
A2 ATS	0	33217	23856	-0,62425604	0,98424700	20
A3 ADS	0	28387	24039	-0,56797848	1,62501509	20
A3 ABS	0	32492	21572	-0,43033417	0,76691048	20
A3 ATS	0	41852	23292	-0,33571795	0,81033206	20
A4 ADS	0	24432	23146	-0,67776742	1,8609261	20
A4 ATS	0	27850	21185	-0,70609653	0,92782091	20

Tab. 28: Materialparameter der ermittelten Hauptkurven der Asphaltdeck-, -binder- und -tragschichtgemische der jeweiligen Abschnitte, ermittelt mit den Funktionsansätzen der (FGSV TP Asphalt, Teil 24 2018)

Material	C_1	C_2
A0 ATS	9,587774	-3,165927
A1 ATS	0,192176	-4,679833
A2 ATS	1,184153	-3,80541
A3 ATS	0,257226	-4,743195
A4 ATS	4,168958	-3,741452

Tab. 29: Materialparameter der ermittelten Ermüdungsfunktionen der Asphaltdeck-, -binder- und -tragschichtgemische der jeweiligen Abschnitte, ermittelt mit den Funktionsansätzen der (FGSV TP Asphalt, Teil 24 2018)

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2017

S 105: **Untersuchungen zur Überprüfung des Luftporenanteils als Verdichtungsanforderung bei feinkörnigen Böden und bindigen Mischböden**

Lypp, Birle, Heyer, Vogt € 20,50

S 106: **Zusammenhang zwischen Bitumenchemie und straßenbautechnischen Eigenschaften**

Radenberg, Nytus, Gehrke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 107: **Baustoffe für standfeste Bankette**

Koukoulidou, Birle, Heyer € 15,50

S 108: **Neue Wege zur Finanzierung des Straßenbaus – Entwicklungen des europäischen Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2015 in Bonn**

Durner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 109: **RIVA – Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels**

Korn, Leupold, Mayer, Kreienkamp, Spekat € 15,50

S 110: **Vergleichbarkeit der Auslaugraten von Materialien mit und ohne Sandzumischung nach dem Säulenkurzverfahren (DIN 19528)**

Lin, Linnemann, Vollpracht € 16,50

S 111: **Bitumenextraktion aus Asphalt mit dem nachwachsenden Rohstoff Octansäuremethylester (Kokosester)**

Alisov, Wistuba
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 112: **Nachweis der flächendeckenden Verdichtungskontrolle von Asphalt**

Zander, Buch, Birbaum
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 113: **Einfluss der Temperatur auf die Probekörperherstellung bei Niedrigtemperaturgussasphalt im Rahmen der Kontrollprüfungen**

Schellenberg
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 114: **Studie zum Anwendungspotenzial von werksgemischtem Kaltbauweisen – Asphalt**

Mollenhauer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2018

S 115: **Performance-orientierte Asphaltspezifikation – Entwicklung eines praxisgerechten Prüfverfahrens zur Ansprache des Verformungswiderstandes**

Wistuba, Isailović
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 116: **Weiterführende Untersuchungen zur Beurteilung des Adhäsionsverhaltens zwischen Bitumen und Gestein**

Radenberg, Nytus, Boetcher, Diedel, Miehl
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 117: **Bauzeitenverkürzung durch optimierten Asphaltbau**

Böhm, Tielmann, Ulrich, Verges, Muschalla
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 118: **Untersuchung der Dauerhaftigkeit unterschiedlicher Asphaltbinderkonzepte**

Renken, Wistuba
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 119: **Grundfragen des straßenrechtlichen Nutzungsregimes – Straßenrecht im Zeichen des Klimawandels**

Durner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 120: **Temperaturuntersuchungen am und im Mobile Load Simulator MLS30 – Analyse des Temperatureinflusses während eines Dauerversuchs für weitere Versuchsprogramme**

Wacker, Scherkenbach, Jansen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 121: **Repräsentative Ermittlung der performance-relevanten Asphalteeigenschaften als Grundlage neuer Vertragsbedingungen**

Roos, Plachkova-Dzhurova, Grafmüller, Milch, Hase, Schindler, Schröter, Zumsande, Wörner, Kazakova, Patzak
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 122: **Ermittlung neuer Zuordnungswerte zur Einteilung bindiger Böden in Fest- und Lockergesteine**

Möller, Bundschuh, Birle, Heyer € 18,50

S 123: **Bindemitteldesign für Asphaltstraßen – Definition eines chemisch-rheologischen Anforderungsprofils**

Stephan, Weigel € 19,00

S 124: **Dauerhafte Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung aktueller ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte**

Müller, Schulte-Schrepping, Benra, Ludwig, Breitenbücher
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 125: **Potenzial innovativer Messsysteme für den Erdbau – Literaturstudie**

Radenberg, Manke, Steeb, Jänicke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 126: **Bau und Messungen an einer Versuchsstrecke mit optimierter Kiestragschicht unter der Betondecke**

Freudenstein, Neudert
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 127: **Entwicklung eines Finite Elemente Modells für die rechnerische Dimensionierung von Straßen gemäß RDO Beton**
Villaret, Kiehne, Riwe, Villaret

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 128: **Reduzierung der Schwindverformungen des Straßenbetons durch den Einsatz neuartiger Schwindreduzierer**

Breitenbücher, Penttilä, Schulte-Schrepping

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2019

S 129: **Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt**

Hase, Beyersdorf, Hase, Rademacher

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 130: **Entwicklung einer Prüfsystematik für Porous Mastic Asphalt (PMA)**

Radenberg, Holzwarth

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 131: **Einfluss viskositäts- verändernder Zusätze auf den Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe**

Radenberg, Gehrke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 132: **Temperierte Straße Untersuchungen zur Realisierung eines Demonstrators auf dem duraBAST**

Oeser, Carreño, Renken, Kemper, Kneer, Höfler,

Al-Sibai, Hess, Gouya, zu Dohna, Steins € 15,50

S 133: **Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw – Stufe 2: Nacherhebung**

Wolf, Uhlig

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 134: **Temperatureinfluss auf die Sichtbarkeit von Substanzmerkmalen (Oberfläche)**

Skakuj, Balck, Beckedahl, Schrödter, Koppers, Ramadan

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 135: **Eignung von Boden-Bindemittel-Gemischen als Baustoff für den Hinterfüllbereich von Bauwerken**

Botor, Tost

€ 15,50

S 136: **KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Asphalt**

Augter, Kayser

€ 16,50

S 137: **Ressourcenschonung Bedingungen für die Verwendung organogener und weicher Böden sowie von Sekundärbaustoffen als Massenbaustoffe im Erdbau**

Cudmani, Heyer, Engel, Schoenherr

€ 22,50

S 138: **Entwicklung eines scannenden Prüfgeräts zur Detektion von Delaminationen in Betonfahrbahndecken**

Groschup, Große, Eger, Freudenstein

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 139: **Unterhaltung und Sanierung des Straßennetzes – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 17. und 18. September 2018 in Bonn**

Durner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 140: **Erfahrungssammlung Bitumendaten – Frischbitumen**

Radenberg, Flottmann, Drewes

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 141: **Ermittlung des Bindemittelgehaltes von Asphalt mit gummimodifiziertem Bindemittel**

Radenberg, Manke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2020

S 142: **Untersuchungen zur Verbesserung der Methode zum fachgerechten Schließen von Bohrkernentnahmestellen**

Beckedahl, Koppers, Schrödter

€ 15,50

S 143: **s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch**

Bräu, Vogt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 144: **Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen**

Radenberg, Staschkiewicz

€ 17,50

S 145: **Schadenskategorie-spezifische Bewertung von AKR-Prüfverfahren**

Weise, Werner, Maier, Wilsch

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 146: **Untersuchungen zur Möglichkeit der Verarbeitung von Gussasphalt bei maximal 230 °Celsius ohne viskositätsverändernde Zusätze**

Radenberg, Gehrke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2021

S 147: **Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST**

Birle, Cudmani, Melsbach

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 148: **Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken**

Freudenstein, Eger, Pichotka, Riwe, K. Villaret, S. Villaret, Frohböse

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 149: **Untersuchungen zur Durchsickerung von RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten bei Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen**

Koukoulidou, Birle, Cudmani

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 150: **Abschätzung des Restwerts im PMS am Ende des Bewertungszeitraums**

Stöckner, Sagnol, Brzuska, Wellner, Blasl, Sommer, Krause,

Komma € 19,50

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG

Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen

Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.